



SCUOLA DOTTORALE IN INGEGNERIA
SEZIONE SCIENZE DELL'INGEGNERIA CIVILE

XXVI Ciclo

Tesi di Dottorato

Stima delle emissioni inquinanti in una rete stradale urbana:
definizione e sviluppo di un modello mesoscopico basato su
assegnazione dinamica del traffico

Dottorando: Simone La Spada

Docente guida: Prof. Stefano Carrese

Coordinatore del dottorato: Prof. Aldo Fiori

Roma, Aprile 2014

Collana delle tesi di Dottorato di Ricerca
In Scienze dell'Ingegneria Civile
Università degli Studi Roma Tre
Tesi n° 44

Sommario

Il tema della sostenibilità ambientale e il miglioramento della qualità della vita nei grandi centri urbani riveste sempre di più un ruolo centrale nelle scelte politiche, economiche e personali di ognuno di noi.

La necessità di compiere spostamenti da parte di merci e di persone ha caratterizzato la storia dell'uomo determinando assetti urbani e abitativi imprescindibili da infrastrutture e sistemi di trasporto più o meno sviluppati.

Focalizzando l'attenzione nei centri urbani di medie e grandi dimensioni è possibile sottolineare l'importanza che rivestono i sistemi di trasporto nella quantità e qualità degli spostamenti.

In riferimento alla sostenibilità ambientale un elemento di notevole importanza è la qualità dell'aria e la presenza di sostanze inquinanti rilasciate da diverse fonti di emissione.

I sistemi di trasporto, soprattutto in ambito urbano, rappresentano una sorgente importante e significativa. Il trasporto privato (per lo più costituito da autovetture private) è il principale responsabile dell'emissione in atmosfera di sostanze inquinanti.

Pertanto nell'ambito della presente tesi viene studiato il problema delle emissioni inquinanti legate al traffico veicolare, con particolare riferimento all'ambito urbano e al trasporto privato (domanda privata).

Il presente lavoro è fondato su una ricca ricerca bibliografica sulla quale sono state poste le basi per lo sviluppo dei modelli e delle applicazioni proposti.

Il lavoro si propone una duplice finalità: sviluppare una modellazione per la stima delle emissioni inquinanti a livello dinamico-mesoscopico su più intervalli temporali ovvero con dinamica intra-periodale; poter simulare e valutare i benefici indotti dall'adozione di interventi di pianificazione e ottimizzazione off-line fino ad arrivare alla simulazione di interventi on-line di "traffic management".

La scala mesosopica è stata scelta per poter analizzare con un livello di dettaglio superiore a quello proposto da un modello macroscopico pur mantenendo tempi computazionali contenuti reti di medie e grandi dimensioni; dall'altro lato un modello microscopico a fronte di risultati sicuramente più precisi di un modello mesoscopico pone il problema della conoscenza di molti dati di input (non sempre disponibili) oltre quello della calibrazione di un elevato numero di variabili.

La scelta di utilizzare un approccio dinamico (con dinamica intraperiodale) risiede nella volontà di poter analizzare diverse finestre temporali attraverso la definizione di una domanda variabile (oraria,

giornaliera, settimanale ecc) ed un'assegnazione dinamica del traffico (DTA).

In virtù delle finalità appena illustrate sono stati sviluppati due modelli di tipo mesoscopico con dinamica intra-periodale; un modello a due stadi (M2) e un modello a tre stadi (M3) evoluzione del precedente.

Un modello con dinamica intra-periodale oltre a consentire l'analisi di diverse finestre temporali offre il grande vantaggio di poter simulare gli effetti di interventi di gestione del traffico in quanto capace di descrivere esplicitamente i meccanismi di formazione delle code e di reciproca interazione tra i flussi in un dato istante e quelli relativi agli istanti precedente

Il modello di riferimento per la valutazione dei risultati ottenuti è rappresentato da Corinair (EEA), ovvero un modello macroscopico stazionario e basato su valori medi d'arco.

I due modelli sviluppati, insieme con una serie di sotto-modelli (per la stima delle emissioni nelle intersezioni semaforizzate, di quelle non semaforizzate, dei veicoli ibridi e dei veicoli elettrici), sono stati applicati nella rete stradale di Brindisi e in quella del quartiere Eur di Roma ottenendo interessanti risultati.

Abstract

In the contemporary “*automobile city*” (Gori *et al.*, 2012), the increase of congestion has implied an increase of travel times and land consumption, but also an excessive production of noise and air pollutions. In such a context the road vehicle emissions have become a key aspect to work on in order to improve the life quality and sustainability.

Road vehicle emissions have become an important aspect related to the life quality and sustainability.

To estimate emissions on congested urban network, usually macroscopic or mesoscopic approaches are followed, but due to their approximations they can't match the results of the microscopic one. Moreover temporal variations of traffic conditions are masked in the current approaches, thus biasing vehicle emissions estimates.

The microscopic approach can substantially improve the emission estimation, however it is usually applied to a subset of links of the network, due to the need of huge input data.

The aim of the study is to develop a method that overtakes the limits of the previous approaches to obtain reliable values of pollutant emissions and that can be applied to evaluate the results of off-line and on-line traffic management strategies in congested urban networks. It takes advantage of the development of dynamic assignment models, where the adoption of dynamical flow models provide a more realistic representation of traffic congestion.

The method has been applied to the real case of the city of Brindisi (Italy) and in the Eur district of Rome (Italy) demonstrating its reliability and efficiency

Indice

ELENCO DELLE FIGURE.....	IX
ELENCO DELLE TABELLE	XIV
ELENCO DEI SIMBOLI	XV
1 INTRODUZIONE	1
2 TRASPORTI ED EMISSIONI ATMOSFERICHE	4
2.1 POLVERI SOTTILI (PM)	4
2.2 OSSIDI DI AZOTO (NOX)	8
2.3 MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)	11
2.4 CONSIDERAZIONI SUI TREND EUROPEI	13
3 I MODELLI PER LO STUDIO DELLE RETI STRADALI.....	15
3.1 I MODELLI MACROSCOPICI	17
3.2 I MODELLI MICROSCOPICI	19
3.3 I MODELLI MESOSCOPICI CON DINAMICA INTRA-PERIODALE	21
4 I MODELLI PER LA STIMA DELLE EMISSIONI INQUINANTI	27
4.1 CONSIDERAZIONI E CONFRONTO SUI MODELLI DI LETTERATURA	34
5 PROPOSTA DI UN MODELLO INTEGRATO PER LA STIMA DELLE EMISSIONI INQUINANTI	37
5.1 PROPOSTA DI UN MODELLO A DUE STADI (M2)	37
5.2 PROPOSTA DI UN MODELLO A TRE STADI (M3).....	43
5.2.1 <i>Il sotto-modello per la stima delle code alle intersezioni semaforizzate.</i>	48
5.2.2 <i>Il sotto-modello per la stima delle code alle intersezioni non semaforizzate</i>	51
5.2.3 <i>Il sotto- modello per la stima delle emissioni per i veicoli elettrici</i>	57
5.2.4 <i>Il sotto-modello per la stima dei fattori di emissione</i>	59
6 APPLICAZIONI REALI.....	70
6.1 MODELLO A DUE STADI	70
6.1.1 <i>Città di Brindisi</i>	70
6.1.2 <i>Città di Roma (quartiere Eur)</i>	88
6.2 MODELLO A TRE STADI.....	94
6.2.1 <i>Città di Brindisi</i>	94
6.2.2 <i>Città di Roma (quartiere Eur)</i>	101
7 SIMULAZIONE DI INTERVENTI DI “TRAFFIC MANAGEMENT”	110
7.1 RETE DI BRINDISI:	110
7.2 RETE DELL’EUR (ROMA):	116

8 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI..... 122

Elenco delle figure

<i>Figura 1. Trend del PM2.5 in Europa per diversi settori a partire dagli anni '90</i>	5
<i>Figura 2. Trend del PM10 in Europa per diversi settori a partire dagli anni '90</i>	5
<i>Figura 3. Distribuzione delle concentrazioni medie annue di PM2.5 in Europa (2009)</i>	6
<i>Figura 4. Distribuzione delle concentrazioni medie giornaliere di PM10 in Europa (2009)</i>	7
<i>Figura 5. Trend del NOx in Europa per diversi settori a partire dagli anni '90</i>	9
<i>Figura 6. Distribuzione delle concentrazioni medie orarie di NO2 in Europa (2009)</i>	10
<i>Figura 7. Distribuzione delle concentrazioni medie annue di NO2 in Europa (2009)</i>	10
<i>Figura 8. Trend della CO in Europa per diversi settori a partire dagli anni '90</i>	12
<i>Figura 9. Distribuzione delle concentrazioni medie di CO (su otto ore) in Europa (2009)</i>	13
<i>Figura 10. Diagramma fondamentale semplificato (triangolare)</i>	19
<i>Figura 11. Catena modellistica</i>	28
<i>Figura 12. Procedura "Corinair"</i>	30
<i>Figura 13. Layout del modello proposto</i>	37
<i>Figura 14. Layout modello a due stadi</i>	39
<i>Figura 15. Rappresentazione di un arco (a due stadi)</i>	40
<i>Figura 16. Rappresentazione di un arco stradale</i>	43
<i>Figura 17. Diagramma tipo per il flusso Q_{ns}</i>	46
<i>Figura 18. Diagramma di marcia negli archi corti</i>	47
<i>Figura 19. Rappresentazione dei flussi in una intersezione sottosatura</i> .	49
<i>Figura 20. Rappresentazione dei flussi in una intersezione sovra-satura</i>	50
<i>Figura 21. Rappresentazione di una intersezione a tre braccia</i>	52
<i>Figura 22. Legge di emissione di NOx in funzione di VSP</i>	61
<i>Figura 22. Legge di emissione di NOx in funzione di VSP</i>	62
<i>Figura 22. Parametri cinematici. Vlibera ≤ 50 km/h; categoria auto</i> ...	64
<i>Figura 23. VSP, CO e NOX. Vlibera ≤ 50 km/h; categoria auto</i>	64

<i>Figura 24. parametri cinematici. Vlibera ≤ 50 km/h; categoria veicoli pesanti</i>	65
<i>Figura 25. VSP, CO e NOX. Vlibera ≤ 50 km/h; categoria veicoli pesanti</i>	65
<i>Figura 26. Profili di emissione per differenti tecnologie di trazione</i>	68
<i>Figura 27. Rete stradale di Brindisi</i>	71
<i>Figura 28. Domanda oraria tra le 05.00 e le 23.00 (Brindisi)</i>	72
<i>Figura 29. Funzione di emissione specifica di CO (Brindisi)</i>	74
<i>Figura 30. Funzione di emissione specifica di NOx (Brindisi)</i>	74
<i>Figura 31. Funzione di emissione specifica di PM (Brindisi)</i>	75
<i>Figura 32. Stima emissione oraria di CO con il modello a due stadi (Brindisi)</i>	77
<i>Figura 33. Stima emissione oraria di NOx con il modello a due stadi (Brindisi)</i>	77
<i>Figura 34. Stima emissione oraria di PM10 con il modello a due stadi (Brindisi)</i>	77
<i>Figura 35. Ruolo della funzione specifica di emissione nella stima delle emissioni</i>	79
<i>Figura 36. valori di A, B ed αA per le strade urbane della rete di Brindisi (valori relativi alla CO nell'ora di punta 8.00-9.00 con l'utilizzo della funzione continua)</i>	80
<i>Figura 37. Profili di emissione orari scenario 1 (CO); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico</i>	81
<i>Figura 38. Profili di emissione orari scenario 1 (NOx); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico</i>	81
<i>Figura 39. Profili di emissione orari scenario 1 (PM); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico</i>	82
<i>Figura 40. Profili di emissione orari scenario 2 (CO); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico</i>	83
<i>Figura 41. Profili di emissione orari scenario 2 (NOx); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico</i>	83

<i>Figura 42. Profili di emissione orari scenario 2 (PM); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico</i>	84
<i>Figura 43. Variazione dei flussi e delle emissioni di CO tra un approccio dinamico ed uno statico per un set di archi della rete di Brindisi (superstrada 379)</i>	86
<i>Figura 44. Variazione delle velocità tra un approccio dinamico ed uno statico in termini per un set di archi della rete di Brindisi (superstrada 379)</i>	87
<i>Figura 45. La rete stradale dell'Eur</i>	88
<i>Figura 46. Distribuzione della domanda nella rete dell'Eur</i>	89
<i>Figura 47. Funzione specifica di emissione di CO (Eur, Roma)</i>	90
<i>Figura 48. Funzione specifica di emissione di NOx (Eur, Roma)</i>	91
<i>Figura 49. Funzione specifica di emissione di PM (Eur, Roma)</i>	91
<i>Figura 50. Stima dell'emissione di CO nella rete dell'Eur di Roma</i>	92
<i>Figura 51. Stima dell'emissione di NOx nella rete dell'Eur di Roma</i>	92
<i>Figura 52. Stima dell'emissione di PM nella rete dell'Eur di Roma</i>	93
<i>Figura 53. Stima emissione oraria di CO con il modello a tre stadi (Brindisi)</i>	94
<i>Figura 54. Stima emissione oraria di NOx con il modello a tre stadi (Brindisi)</i>	95
<i>Figura 55. Stima emissione oraria di PM10 con il modello a tre stadi (Brindisi)</i>	95
<i>Figura 56. Variazioni di CO nelle intersezioni semaforizzate</i>	96
<i>Figura 57. Variazioni di NOx nelle intersezioni semaforizzate</i>	97
<i>Figura 57. Variazioni di NOx nelle intersezioni semaforizzate</i>	97
<i>Figura 58. Stima dell'emissione di CO nelle intersezioni</i>	98
<i>Figura 59. Stima dell'emissione di CO per le intersezioni semaforizzate (Brindisi)</i>	99
<i>Figura 60. Stima dell'emissione di NOx per le intersezioni semaforizzate (Brindisi)</i>	100
<i>Figura 61. Stima dell'emissione di PM per le intersezioni semaforizzate (Brindisi)</i>	100
<i>Figura 62. Emissioni di CO nella rete dell'Eur (Roma)</i>	102
<i>Figura 63. Emissioni di NOx nella rete dell'Eur (Roma)</i>	102
<i>Figura 64. Emissioni di PM nella rete dell'Eur (Roma)</i>	103
<i>Figura 65. Emissioni di CO nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma)</i>	103

<i>Figura 66. Emissioni di NOx nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 67. Emissioni di PM nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 68. Distribuzione spaziale delle emissioni di CO relative alla fase di coda nelle intersezioni semaforizzate delle rete dell'Eur (Roma).</i>	<i>105</i>
<i>Figura 69. Distribuzione spaziale delle emissioni di CO nella rete dell'Eur (Roma).....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 70. Differenza di emissione di CO nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma) tra l'approccio Corinair e il modello M3... </i>	<i>106</i>
<i>Figura 71. Differenza di emissione di NOx nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma) tra l'approccio Corinair e il modello M3.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 72. Differenza di emissione di PM nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma) tra l'approccio Corinair e il modello M3... </i>	<i>107</i>
<i>Figura 73. Emissioni di CO nelle intersezioni non semaforizzate della rete dell'Eur (Roma)</i>	<i>108</i>
<i>Figura 74. Emissioni di NOx nelle intersezioni non semaforizzate della rete dell'Eur (Roma)</i>	<i>108</i>
<i>Figura 75. Emissioni di PM nelle intersezioni non semaforizzate della rete dell'Eur (Roma)</i>	<i>109</i>
<i>Figura 76. Rappresentazione delle code in Dynameq nella rete di Brindisi allo stato attuale (sinistra) e dopo gli interventi di ottimizzazione opt.1 (destra).</i>	<i>111</i>
<i>Figura 77. Riduzione dell'emissione di CO nella rete di Brindisi (opt.1)</i>	<i>112</i>
<i>Figura 78. Riduzione percentuale delle emissioni di CO a seguito degli interventi di ottimizzazione (opt.1).....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 79. Riduzione percentuale delle emissioni di NOx a seguito degli interventi di ottimizzazione (opt.1).....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 80. Riduzione percentuale delle emissioni di PM a seguito degli interventi di ottimizzazione (opt.1).....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 81. Riduzione percentuale delle emissioni nello scenario 2 a seguito degli interventi di ottimizzazione (opt.2)</i>	<i>115</i>
<i>Figura 82. Riduzione percentuale delle emissioni nello scenario 4 a seguito degli interventi di ottimizzazione (opt.2)</i>	<i>115</i>
<i>Figura 83. Profili di emissione di CO nella rete dell'Eur – hp.1</i>	<i>117</i>

<i>Figura 84. Profili di emissione di CO per la produzione di energia elettrica (centrale a carbone) dei veicoli elettrici circolanti sulla rete dell'Eur – hp.1.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 85. Profili di emissione di CO per la produzione di energia elettrica (centrale a gas) dei veicoli elettrici circolanti sulla rete dell'Eur – hp.1.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 86. Profili di emissione di CO nella rete dell'Eur – hp.2</i>	<i>119</i>
<i>Figura 87. Profili di emissione di CO nella rete dell'Eur – hp.3</i>	<i>120</i>
<i>Figura 88. Emissione complessiva di CO nella rete dell'Eur (Roma)...</i>	<i>120</i>

Elenco delle tabelle

<i>Tabella 1. Soglie limite e target delle polveri sottili imposti dalle direttive comunitarie.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabella 2. Soglie limite delle polveri sottili secondo l’OMS.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabella 3. Soglie limite e target degli ossidi di nitrogeno imposti dalle direttive comunitarie</i>	<i>11</i>
<i>Tabella 4. Tipologie di assegnazione.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabella 5. Caratteristiche di alcuni veicoli elettrici</i>	<i>59</i>
<i>Tabella 6. Fattori specifici di emissione per.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabella 7. Valori di emissione specifica in funzione di VSP (EPA).....</i>	<i>60</i>
<i>Tabella 8. valori emissione specifica in accelerazione e_c.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabella 9. Confronto tra l’approccio macroscopico (Emme) e quello mesoscopico Dynameq nell’ora di punta (8.00-11.00); funzione di emissione discontinua</i>	<i>84</i>
<i>Tabella 10. Confronto tra l’approccio macroscopico (Emme) e quello mesoscopico Dynameq nell’ora di punta (8.00-11.00); funzione di emissione continua.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabella 11. Domanda nella rete dell’Eur (Roma)</i>	<i>88</i>
<i>Tabella 12. Scenari di ottimizzazione proposti nella rete dell’Eur.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabella 13. Confronto tra la rete stradale di Brindisi e quella dell’Eur (Roma).....</i>	<i>123</i>

Elenco dei simboli

Nell'elenco che segue sono riportati i principali simboli che compaiono nei capitoli della tesi.

a	<i>accelerazione</i>
cm_x	<i>capacità reale della manovra x</i>
cp_x	<i>capacità teorica della manovra x</i>
d_{od}	<i>domanda tra le coppie o-d</i>
dt	<i>durata della finestra temporale di analisi</i>
dx	<i>distanza</i>
e_{ai}	<i>fattore specifico di emissione per la parte percorsa a deflusso libero</i>
e_{bi}	<i>fattore specifico di emissione per la parte percorsa in coda</i>
ec	<i>consumo specifico di energia elettrica di un veicolo</i>
e_{ci}	<i>fattore specifico di emissione per la parte percorsa in accelerazione</i>
e_{cold}	<i>fattore di emissione specifica a freddo</i>
EF	<i>fattore di emissione specifica in funzione del consumo di carburante</i>
e_{hot}	<i>fattore di emissione specifica a caldo</i>
E_i	<i>emissione della sostanza inquinante iesima</i>
ei	<i>fattore specifico di emissione per l'inquinante iesimo</i>
e_{spec}	<i>fattore di emissione specifica per la produzione di un kWh</i>
FC	<i>consumo di carburante</i>
i	<i>inquinante iesimo</i>
k	<i>tecnologia veicolare</i>
l	<i>arco l</i>
L_A	<i>lunghezza d'arco percorsa in condizioni di deflusso libero</i>
L_B	<i>lunghezza d'arco percorsa in coda</i>
L_C	<i>lunghezza d'arco percorsa in fase di accelerazione</i>
L_j	<i>lunghezza caratteristica del veicolo</i>
L_{tot}	<i>lunghezza d'arco</i>
M_k	<i>monte chilometri dei veicoli di tecnologia k</i>
N_k	<i>numero di veicoli di tecnologia k</i>
q	<i>flusso d'arco</i>
Q_{95}	<i>coda relativa al 95 percentile</i>

Q_{ns}	<i>flusso di attraversamento di una intersezione coinvolto nella coda</i>
Q_{nv}	<i>flusso indisturbato di attraversamento di una intersezione</i>
SI	<i>velocità media</i>
$SI_{(A)}$	<i>velocità a flusso libero</i>
$SI_{(B)}$	<i>velocità in coda</i>
t	<i>finestra temporale di analisi</i>
$t_{c,x}$	<i>valore del critical gap per la manovra x</i>
v	<i>velocità</i>
VSP	<i>vehicle specific power</i>
v_x	<i>volumi nella manovra x</i>
ρ	<i>densità veicolare</i>
τ	<i>istante temporale</i>

1 Introduzione

Negli ultimi anni è cresciuta notevolmente l'attenzione nei confronti delle emissioni inquinanti in atmosfera e degli aspetti connessi con la sostenibilità ambientale e qualità della vita. Una significativa quota di queste emissioni sono causate dal settore dei trasporti con particolare riferimento alla modalità di trasporto stradale che tradizionalmente utilizza motori a combustione. In Europa l'inquinamento atmosferico prodotto dal settore dei trasporti (EEA – report N°12/20011) varia tra il 25% ed il 50%.

Queste emissioni sono infatti responsabili di effetti nocivi sulla salute umana, dell'acidificazione degli ecosistemi, di un più grave degrado dei beni monumentali ed archeologici e più in generale dei cambiamenti climatici. Secondo l'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) in Italia sono circa 8.000 le morti/annue legate ad inquinamento atmosferico.

Sin dagli anni 90 le autorità locali e la pubblica amministrazione in generale hanno speso tempo e risorse cercando di ridurre le emissioni inquinanti in atmosfera.

In Europa sono stati introdotti diversi strumenti normativi al fine di regolare le emissioni prodotte dai veicoli stradali (Air quality in Europe, 2011) definendo soglie standard di emissione per gli ossidi di nitrogeno (NOX), gli idrocarburi con e senza metano (HC e NMHC), il monossido di carbonio (CO) e per le polveri sottili (PM).

Lo standard EURO 4 è stato introdotto con la direttiva 98/70/EC (EU, 1998a, 1998b) e con la direttiva 205/55/EC (EU, 2005) mentre gli standard EURO 5 e 6 sono stati introdotti dalle normative (EC) No 692/2008 (EU, 2008a) e No 595/2009 (EU, 2009b). E' utile sottolineare come nonostante l'introduzione di queste importanti novità legislative di livello europeo alcuni paesi non si aspettano di rispettare le soglie imposte “...many European countries do not expect to comply with one or more pollutant-specific emission ceilings set under EU and UN agreements for 2010...” (Air quality in Europe, 2011). Inoltre sebbene siano stati compiuti notevoli passi in avanti nella riduzione delle emissioni per chilometro (attraverso miglioramenti tecnologici sul parco veicolare circolante), le emissioni inquinanti hanno continuato a crescere lo stesso negli ultimi anni.

Studi recenti (Shukla and Alam, 2010, Lumbreras *et al.*, 2007, Viti *et al.*, 2008, Roupail *et al.*, 2001) mostrano come i profili di velocità del veicolo ed quelli delle emissioni inquinanti siano legati tra loro. L'aumento della congestione stradale porta ad un aumento delle emissioni inquinanti e inoltre comportamenti di guida differenti comportano

quantitativi di emissione differenti. In questo contesto è possibile ridurre le emissioni inquinanti attraverso la riduzione della congestione ovvero mediante interventi di pianificazione e di gestione del traffico sia di tipo off-line che on-line (Barth *et al.*, 1999).

Ad oggi, al fine di stimare le emissioni da traffico veicolare, esistono principalmente tre differenti livelli di analisi: macroscopico, mesoscopico e microscopico.

Un approccio di tipo macroscopico è basato sulla conoscenza della velocità media dei veicoli oltre che di altre grandezze aggregate quali flusso veicolare, lunghezza degli archi della rete, chilometri percorsi dai veicoli sulla rete (Bai *et al.*, 2007, Bai *et al.*, 2008, EMEP/EEA emission inventory guide book 2010). In questo contesto è possibile stimare le emissioni veicolari in reti di estese dimensioni poiché si fa uso di valori aggregati, poco dettagliati e facilmente maneggiabili. La scala di riferimento di un approccio di tipo macroscopico è in genere di livello regionale/nazionale per scendere fino al livello comunale; raramente si trova un'utilità nell'utilizzare un simile approccio in scale più piccole quali boulevard e singole intersezioni. I veicoli vengono analizzati rispetto alle velocità medie trascurando le fasi di accelerazione e decelerazione.

Un approccio di tipo microscopico può essere invece utilizzato per migliorare la stima delle emissioni inquinanti poiché si basa sulla conoscenza dettagliata di molti parametri caratteristici della cinematica di ogni singolo veicolo sulla rete. In particolare si fa riferimento ad al ciclo di guida di ogni veicolo sulla rete includendo le fasi di accelerazione e decelerazione. Per ottenere queste informazioni si fa spesso ricorso all'utilizzo di software e/o modelli di microsimulazione del traffico quali Traf-Netsim, Infrac e Vissim. In ogni caso i modelli di microsimulazione sono utilizzati per un sottoinsieme di archi della rete proprio per la necessità di dover conoscere un elevato numero di dati di input; di conseguenza questi modelli sono utilizzati per lo studio di singole intersezioni, boulevard o reti di piccole dimensioni (Stevanovic *et al.*, 2009).

L'approccio di tipo mesoscopico è stato sviluppato con particolare riferimento ai veicoli leggeri (LDV, Light Duty Vehicles) al fine di stimare il consumo di carburante e il tasso di emissioni su ogni arco della rete. Il calcolo è basato sulla conoscenza della velocità media, sul numero di stop per unità di distanza percorsa e sulla durata temporale degli stop. Attraverso queste variabili si costruisce un ciclo di guida "sintetico" nel

quale sono incluse quattro fasi: decelerazione, stop, accelerazione e fase di crociera.

I risultati forniti da un approccio mesoscopico non sono della stessa accuratezza di quelli forniti da un modello microscopico in quanto i cicli di guida utilizzati sono di tipo “sintetico” ovvero semplificati e fissi a priori. In ogni caso un approccio di tipo mesoscopico rappresenta una valida alternativa all’uso di modelli microscopici soprattutto laddove non si hanno a disposizione dati dettagliati su accelerazione e velocità dei veicoli (Yue and Rakha, 2009).

Per la stima delle emissioni in reti urbane di grandi dimensioni si fa ricorso all’utilizzo di modelli macroscopici e/o mesoscopici. Sebbene basati su dati di tipo aggregato entrambi possono fornire valori di stima delle emissioni variabili nel tempo considerando diverse finestre temporali di analisi; i dati di uscita forniti da un’analisi di tipo dinamico possono essere impiegati come dati di input dei più precisi modelli/solutori per la risoluzione di reti stradali migliorando di conseguenza la stima delle emissioni (Bai *et al.* 2008).

2 Trasporti ed emissioni atmosferiche

Nel presente capitolo si riportano alcune considerazioni inerenti il sistema dei trasporti e l'emissione di sostanze inquinanti in atmosfera. Un'analisi di dettaglio delle principali emissioni inquinanti e oggetto di interesse pubblico è stata affrontata in "Air Quality in Europe", un documento redatto dall'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA 2011).

In questo documento si fa riferimento alle seguenti sostanze inquinanti:

- Polveri sottili (PM)
- Ozono (O₃)
- Diossidi di Nitrogeno (NO₂)
- Diossido di solfuro (SO₂)
- Monossido di carbonio (CO)
- Metalli pesanti
- Benzene

Nel documento, oltre ad elencare e definire le sostanze inquinanti, sono state riportate sia le principali attività sorgenti responsabili dell'immissione in aria di sostanze inquinanti che i dati rilevati nel corso degli ultimi anni. Per ragioni di tempo e risorse, nel presente lavoro di ricerca si è posta l'attenzione su tre di questi inquinanti (Polveri Sottili, Diossido di Nitrogeno e Monossido di Carbonio).

2.1 Polveri sottili (PM)

Le polveri sottili possono variare sia nella dimensione che nella composizione chimica. Il PM_{2.5} indica polveri sottili di misura inferiore ai 2.5 micrometri; mentre il PM₁₀ indica polveri sottili di misura inferiore ai 10 micrometri.

Le polveri sottili si formano sia per attività naturali (sale marino, polline, ecc.) che soprattutto per attività antropiche; la principale responsabile è la combustione di carburanti e.g. produzione di energia elettrica, inceneritori, riscaldamento delle abitazioni e trasporti. In ambito urbano la combustione di carburante legata ai veicoli stradali è una tra le principali responsabili di formazione delle polveri sottili.

L'andamento della produzione di polveri sottili in Europa a partire dal 1990 è riportata in Figura 1 (PM_{2.5}) e Figura 2 (PM₁₀):

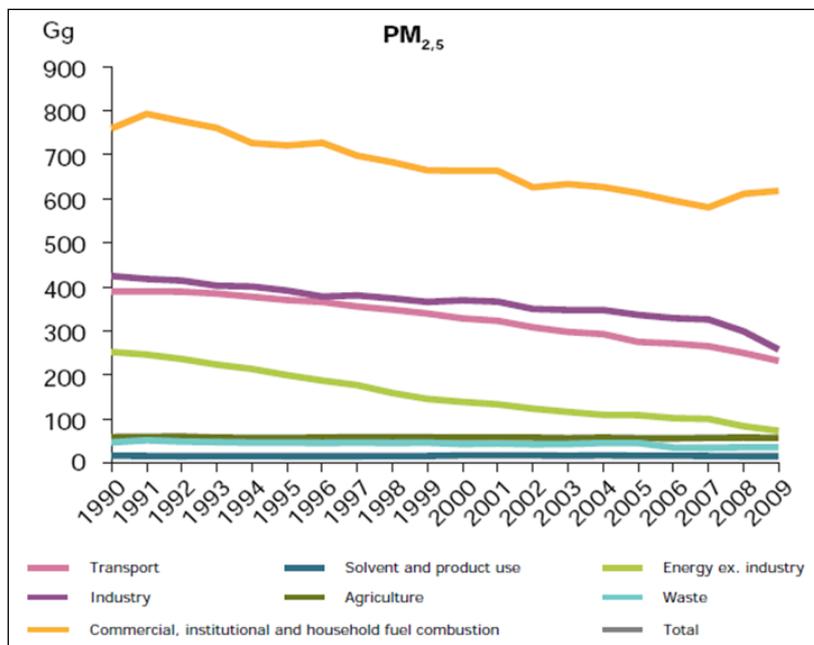


Figura 1. Trend del PM_{2.5} in Europa per diversi settori a partire dagli anni '90

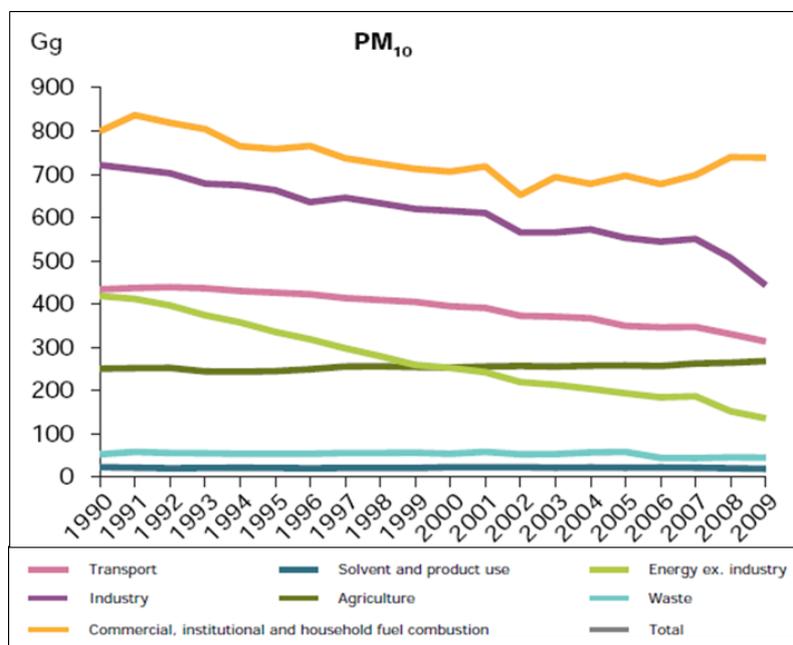


Figura 2. Trend del PM₁₀ in Europa per diversi settori a partire dagli anni '90

Dai dati appena riportati è evidente come il sistema dei trasporti svolga un ruolo centrale posizionandosi come terza sorgente dopo “riscaldamento delle abitazioni” e “industria”. Bisogna precisare inoltre che i valori sono riferiti all’intera comunità Europea e pertanto nei paesi con minore necessità di riscaldamento delle abitazioni (area del mediterraneo) l’incidenza dei trasporti nell’emissione di PM in atmosfera potrebbe essere ancora più importante.

A livello comunitario sono state stabilite delle soglie di concentrazione sia a livello giornaliero che annuale. Le concentrazioni in aria sono misurate per mezzo di centraline posizionate in 4 siti tipo:

- Rurale
- Urbano (senza traffico)
- Traffico
- Altri

Nel corso della presente ricerca è evidente come l’interesse sia rivolto all’ambito “traffico”. In Figura 3 si riportano i valori misurati nel corso del 2009 (Air Quality in Europe 2011, EEA) relativamente al PM_{2.5}, mentre in Figura 4 si riportano i valori del PM₁₀.

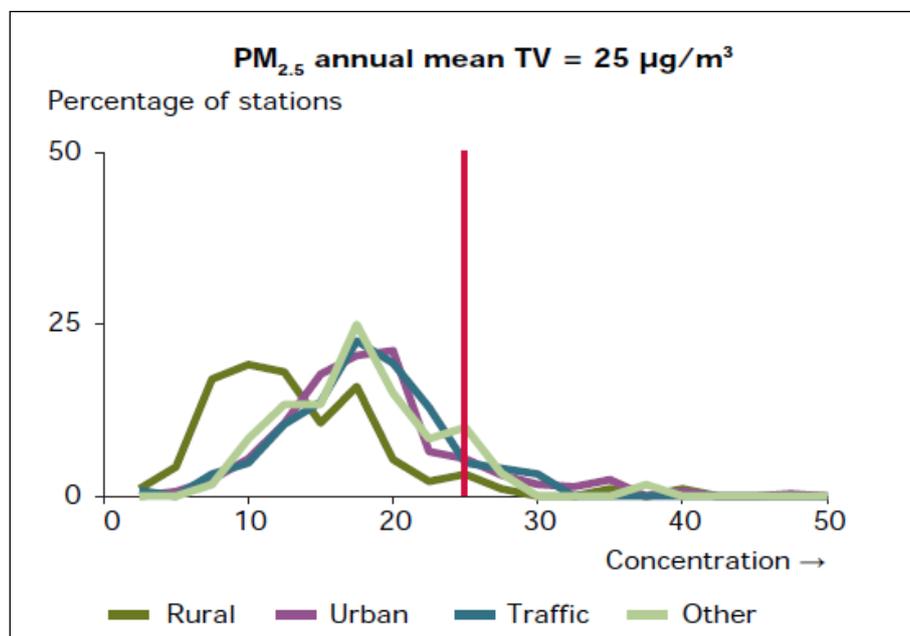


Figura 3. Distribuzione delle concentrazioni medie annue di PM_{2.5} in Europa (2009)

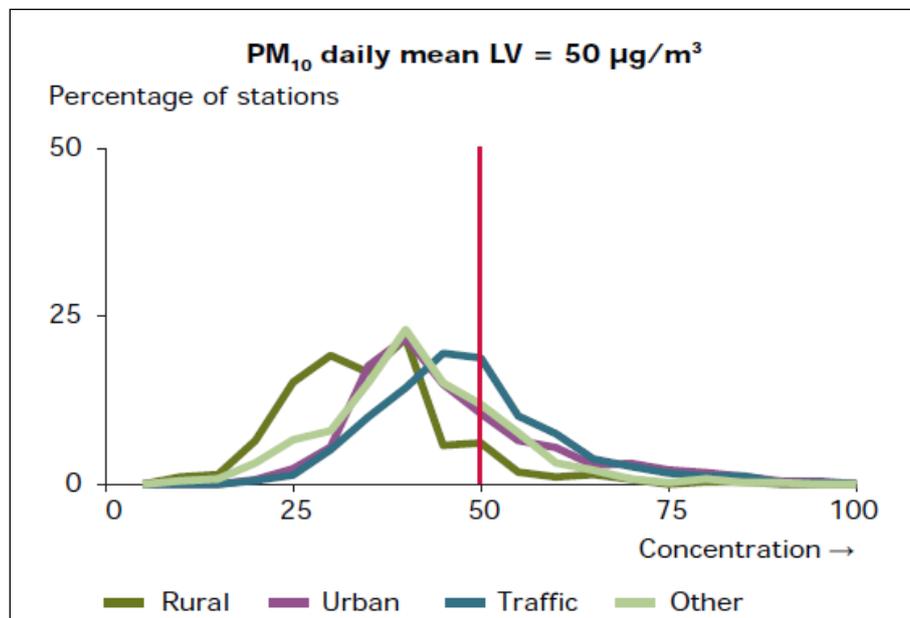


Figura 4. Distribuzione delle concentrazioni medie giornaliere di PM10 in Europa (2009)

Osservando la Figura 3 e la Figura 4 è chiaramente visibile come una significativa parte dei valori di concentrazione misurati dalle centraline sia oltre il valore di soglia imposto (linea verticale rossa); inoltre come aspettato il valore di soglia cambia in riferimento sia alla durata del periodo di misura che al tipo di polvere sottile.

E' importante sottolineare come le direttive europee in materia di qualità dell'aria impongono soglie limite (target) sempre più stringenti nel corso dei prossimi anni, testimoniando l'attenzione e l'importanza prestata nei confronti del tema dell'inquinamento atmosferico. In Tabella 1si riporta un estratto della tabella 2.1 del documento "Air Quality in Europe 2011":

Size fraction	Averaging period	Value	Comments
PM ₁₀ , limit value	One day	50 µg/m ³	Not to be exceeded on more than 35 days per year. To be met by 1 January 2005
PM ₁₀ , limit value	Calendar year	40 µg/m ³	To be met by 1 January 2005
PM _{2.5} , target value	Calendar year	25 µg/m ³	To be met by 1 January 2010
PM _{2.5} , limit value	Calendar year	25 µg/m ³	To be met by 1 January 2015
PM _{2.5} , limit value (*)	Calendar year	20 µg/m ³	To be met by 1 January 2020
PM _{2.5} , exposure concentration obligation (*)		20 µg/m ³	2015
PM _{2.5} exposure reduction target (*)	0–20 % reduction in exposure (depending on the average exposure indicator in the reference year) to be met by 2020		
Note:	(*) Indicative limit value (Stage 2) to be reviewed by the Commission in 2013 in the light of further information on health and environmental effects, technical feasibility and experience of the target value in Member States.		
	(*) Based on a three-year average.		
Source:	EU, 2008c.		

Tabella 1. Soglie limite e target delle polveri sottili imposti dalle direttive comunitarie

Un'ultima considerazione di significativa importanza è l'affidabilità e la confidenza posta nei valori di soglia appena mostrati; secondo l'Organizzazione Mondiale per la Sanità (OMS) nonostante l'imposizione di questi valori soglia esisterebbero comunque dei rischi per la salute umana (WHO, 2006). I valori soglia suggeriti dal OMS sono riportati nella tabella 2.2 di "Air Quality in Europe 2011" di cui si riporta un estratto:

µg/m ³	24-hour mean	Annual mean
PM _{2.5}	25	10
PM ₁₀	50	20

Tabella 2. Soglie limite delle polveri sottili secondo l'OMS

2.2 Ossidi di Azoto (NO_x)

Il diossido di nitrogeno (NO₂) è generato per ossidazione del monossido di nitrogeno (NO). I processi di combustione ad elevate temperature sono tra le principali sorgenti nella produzione degli ossidi di nitrogeno (NO_x), intendono con questo termine la somma di NO ed NO₂; NO rappresenta comunque la parte principale all'interno degli NO_x. I veicoli con motore a combustione interna rappresentano pertanto una tra le principali sorgenti di emissione di queste sostanze inquinanti. In Figura

5 si riporta l'andamento degli ossidi di nitrogeno (NO_x) in Europa a partire dagli anni 1990:

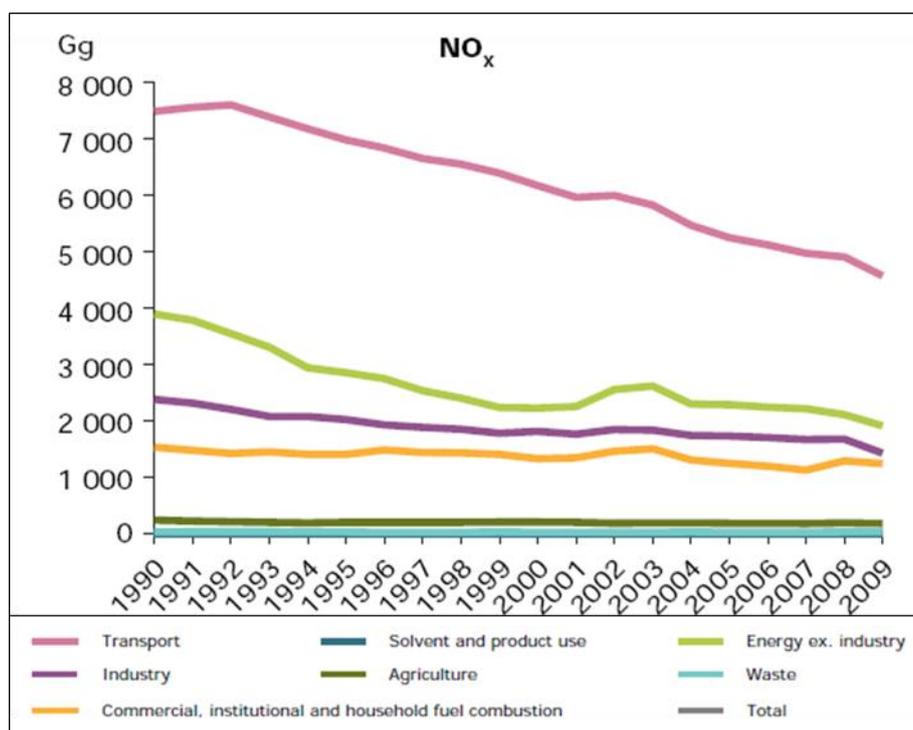


Figura 5. Trend del NO_x in Europa per diversi settori a partire dagli anni '90

Osservando la Figura 5 è evidente la sostanziale incidenza del sistema dei trasporti il quale rappresenta la prima sorgente di emissione. Inoltre dall'analisi delle misure osservate dalle centraline dislocate su tutto il territorio comunitario emerge un superamento delle soglie limite.

In Figura 6 e in Figura 7 si riportano le distribuzioni medie di concentrazione misurate nell'anno 2009 e riferite alla singola ora e all'intera anno

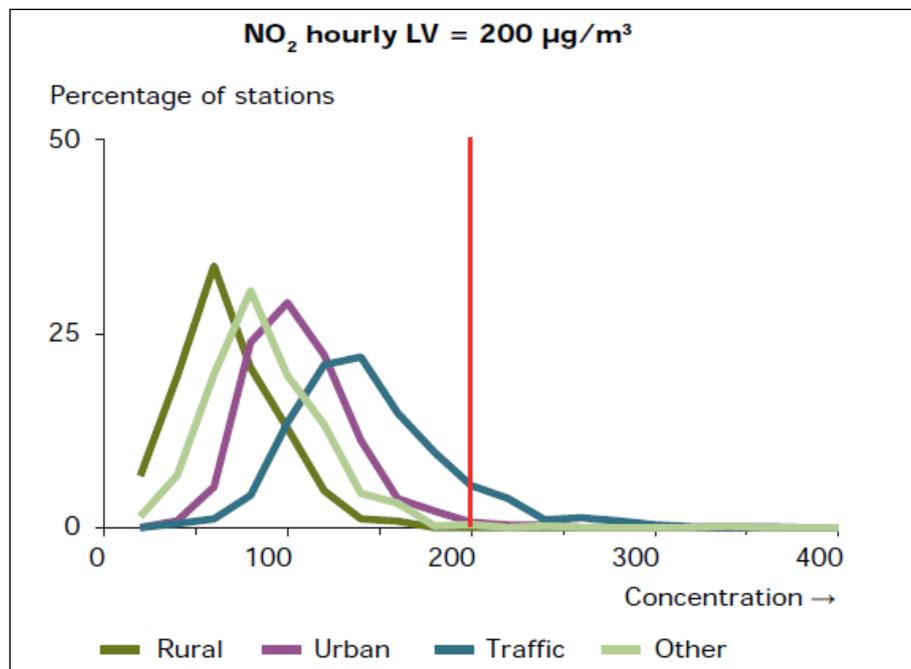


Figura 6. Distribuzione delle concentrazioni medie orarie di NO₂ in Europa (2009)

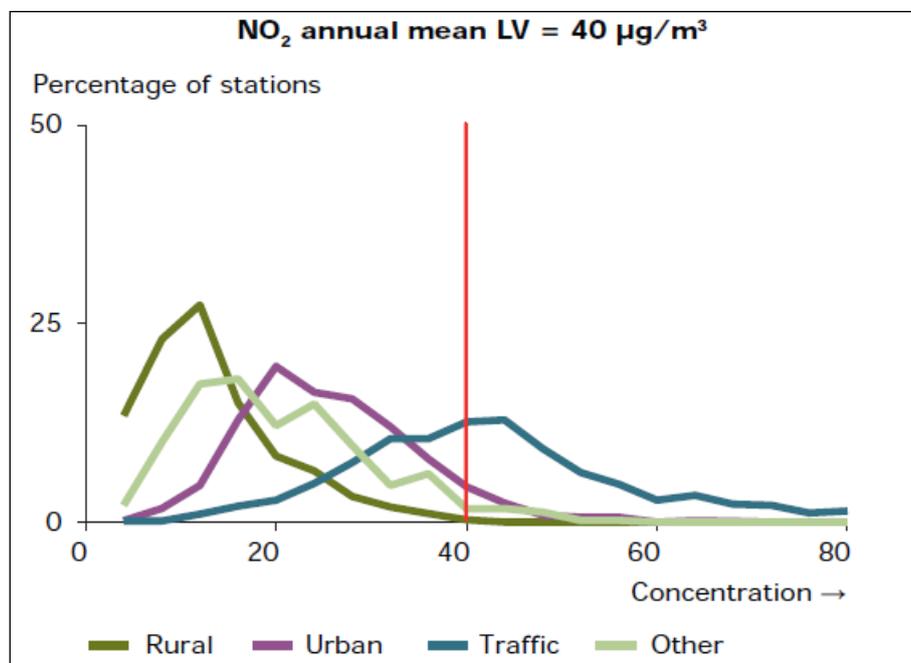


Figura 7. Distribuzione delle concentrazioni medie annue di NO₂ in Europa (2009)

Anche per gli ossidi di nitrogeno sono state individuate delle soglie limite oltre che dei target da raggiungere nei prossimi anni. In Tabella 3 si riporta un estratto di questi valori (tabella 4.1 di “Air Quality in Europe”):

Objective	Averaging period	Limit or threshold value	Number of allowed exceedances
Human health	One hour	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	18 hours per year
Human health	Calendar year	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Alert (*)	One hour	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Vegetation (*)	Calendar year	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

Note: (*) To be measured over three consecutive hours at locations representative of air quality over at least 100 km² or an entire zone or agglomeration, whichever is smaller.
 (*) As oxides of nitrogen (NO_x), expressed as $\mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$.

Source: EU, 2008c.

Tabella 3. Soglie limite e target degli ossidi di nitrogeno imposti dalle direttive comunitarie

Contrariamente al caso delle polveri sottili i valori soglia imposti dalla direttiva europea coincidono con quelli imposti dall’OMS.

2.3 Monossido di Carbonio (CO)

Il monossido di carbonio è prodotto dalla combustione incompleta dei carburanti. Storicamente il settore dei trasporti era la sorgente principale di emissione di questa sostanza, ma grazie all’introduzione delle marmitte catalitiche è stato possibile a ridurre gli impatti notevolmente. Tuttavia ancora oggi la produzione di CO è legata al settore dei trasporti, soprattutto in ambito urbano. Le condizioni di deflusso della corrente veicolare rivestono un ruolo centrale nella produzione della CO ed i maggiori valori di concentrazione si riscontrano in concomitanza delle ore di punta e/o di elevato traffico caratterizzato da basse velocità e da un notevole numero di fasi di “stop & go”.

In Figura 8 si riporta l’andamento del monossido di carbonio in Europa a partire dagli anni 1990 e sempre riferito a differenti categorie di sorgente:

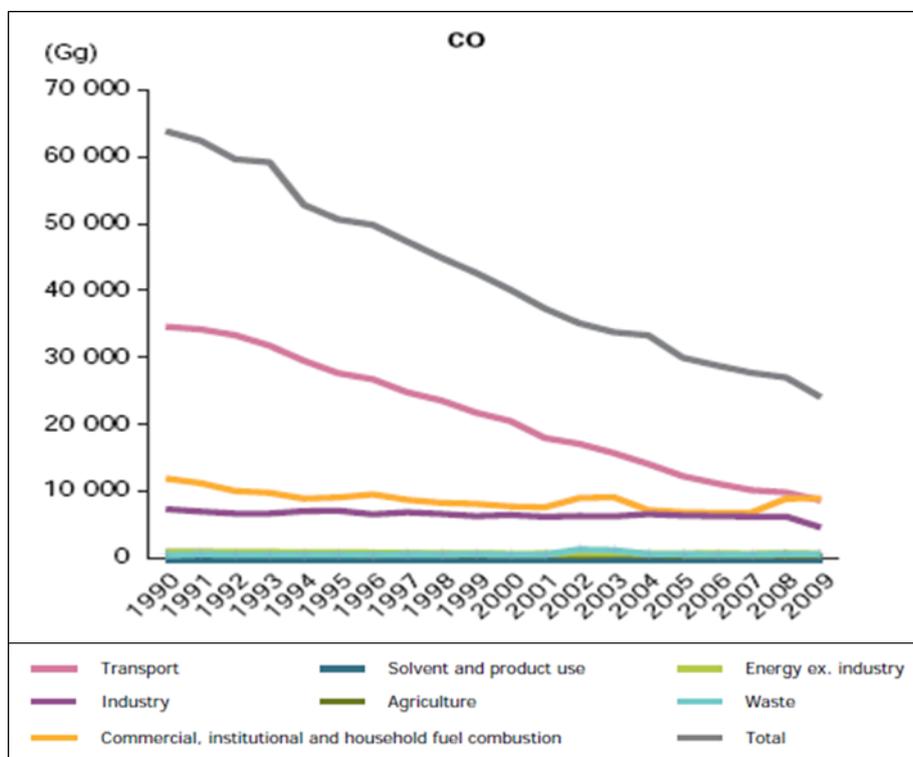


Figura 8. Trend della CO in Europa per diversi settori a partire dagli anni '90

La prima sorgente di emissione è rappresentata dai trasporti (linea rosa) con un totale (linea grigia) pari a circa 65.000 Gg nel 1990 e 30.000 Gg nel 2009. Anche per il monossido di carbonio è stato introdotto un valore limite. In Figura 9 si riporta la distribuzione delle concentrazioni medie riferite ad 8 ore (in Europa per l'anno 2009).

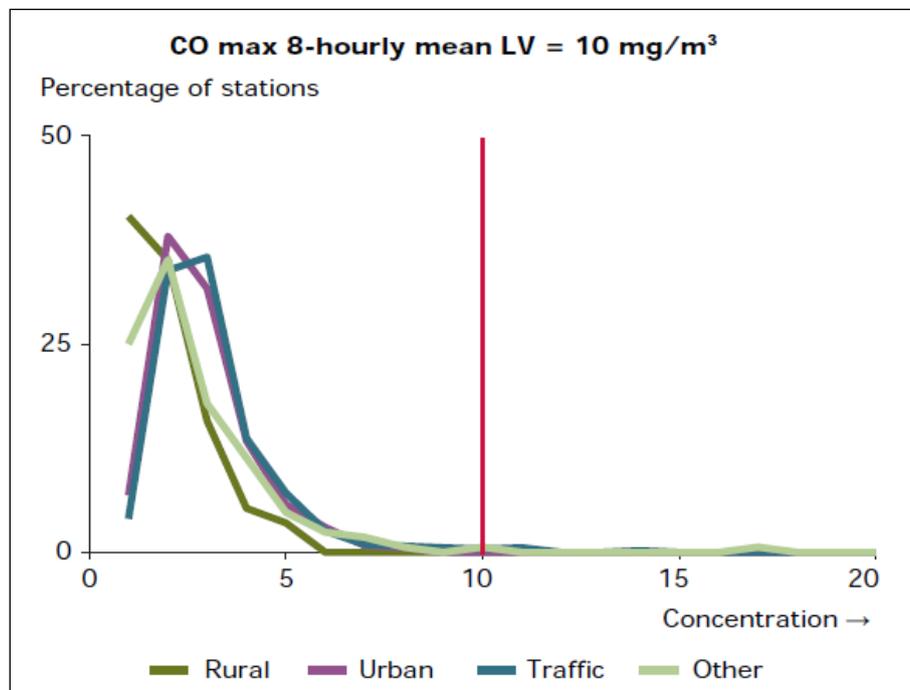


Figura 9. Distribuzione delle concentrazioni medie di CO (su otto ore) in Europa (2009)

Contrariamente al caso delle polveri sottili e degli ossidi di nitrogeno il valore soglia non è stato quasi mai superato. La EEA non impone un limite massimo sulle 24 ore ma solo su 8 ore. L'OMS propone una soglia massima anche sulle 24 ore e pari a 30mg/m³

La CO ha un ciclo di vita di 3 mesi in atmosfera (EEA) per poi trasformarsi in ozono (effetto serra).

2.4 Considerazioni sui trend europei

Nei tre precedenti paragrafi sono state riportate sinteticamente le principali caratteristiche delle sostanze inquinanti oggetto di studio nella presente ricerca (sottolineando ancora che la scelta di analizzare soltanto la CO, l'NO_x ed il PM ricade nella limitata disponibilità di tempo e risorse). Nonostante le specificità di ognuna di queste sostanze e le significative differenze tra loro, sia in termini di composizione chimica

che di effetti nocivi sulla salute umana, esistono tuttavia alcuni aspetti comuni a livello di dati aggregati.

Il primo è quello relativo ai trend degli ultimi anni. Per le tre sostanze inquinanti si è riscontrato un trend in riduzione, a dimostrazione dell'impegno posto dalle autorità politiche ed amministrative al problema dell'inquinamento atmosferico. In riferimento al settore dei trasporti questi virtuosi trend in diminuzione sono stati il frutto dell'introduzione di miglioramenti tecnologici sui veicoli (sistemi di catalizzazione, motori più efficienti, rispetto delle direttive europee per l'omologazione dei veicoli a trazione fossile).

Ma dall'altro lato il secondo aspetto comune riguarda il superamento dei valori di soglia definiti sia dalle direttive che dall'OMS. Sia per le polveri sottili che per gli ossidi di nitrogeno si è riscontrato un significativo superamento dei valori di soglia; per il monossido di carbonio il superamento dei valori di soglia avviene raramente anche se l'OMS suggerisce un controllo di questo inquinante anche su un periodo di riferimento di 24 ore (e non solo di 8 ore).

Infine un terzo aspetto comune è l'importanza e l'impatto che il settore dei trasporti riveste nella formazione di questi inquinanti.

3 I modelli per lo studio delle reti stradali

Una delle finalità dei modelli per lo studio delle reti stradali è quella di valutare la congestione stradale e la distribuzione dei flussi su ogni arco costituente la rete stradale. Oltre ai flussi è possibile stimare altri parametri quali la densità veicolare, la velocità media della corrente veicolare ma anche il ritardo globale fino ad arrivare alla definizione delle caratteristiche cinematiche (spazio-temporali) di ogni singolo veicolo. Ad oggi la disponibilità di risorse informatiche di notevole potenza ed accessibili a tutti i livelli ha permesso un importante sviluppo di questi modelli che molto spesso fanno ricorso a risoluzione di sistemi lineari e non lineari più o meno complessi oltre che a vere e proprie simulazioni nelle quali vengono rappresentati i singoli veicoli.

Le variabili con le quali affrontare il problema sono notevoli e coinvolgono principalmente:

- La scala spaziale
- La scala temporale
- La disponibilità di dati
- Il budget a disposizione

Sia la scala d'indagine che quella temporale sono evidentemente dei punti fissi, ovvero sono difficilmente modificabili poiché strettamente connessi con lo specifico scopo di un progetto; ad esempio nel caso si abbia la necessità di studiare una singola intersezione stradale nel corso di differenti ore della giornata è evidente la scelta di una determinata scala spaziale e temporale. Un discorso diverso coinvolge invece il budget e la disponibilità di dati che molto spesso nelle applicazioni pratiche risultano limitati. Pertanto, fissata la scala spaziale e temporale, frequentemente le scelte modellistiche sono anche orientate in funzione di questi due ultimi parametri.

In ogni caso e indipendentemente da queste specifiche considerazioni i modelli per lo studio delle reti stradali possono essere classificati in base a diversi parametri.

Normalmente la principale distinzione riguarda la scala spaziale, ovvero come vengono rappresentati e descritti i flussi/veicoli sulla rete e pertanto si definiscono i seguenti modelli:

- Modelli macroscopici

- Modello mesoscopici
- Modelli microscopici

I modelli macroscopici fanno riferimento a rappresentazioni aggregate dei veicoli per mezzo del flusso d'arco.

Nei modelli microscopici in genere vengono considerati i singoli veicoli.

I modelli mesoscopici si collocano a metà tra questi due e i veicoli sono rappresentati in parte in modo aggregato o "a pacchetti" (negli archi) in parte in modo disaggregato (nei nodi)

Oltre alla scala spaziale i modelli possono essere distinti in base alla scala temporale di riferimento:

- Modelli statici (stazionari)
- Modelli con dinamica intraperiodale

Nei modelli statici l'assegnazione è di tipo stazionario ovvero è considerata una sola finestra temporale; è quasi come se si facesse una fotografia del sistema per una data e precisa configurazione della rete.

Nei modelli dinamici si considerano invece diverse finestre temporali di riferimento. Il sistema cambia dinamicamente in funzione della variazione della domanda e dei flussi presenti sulla rete. In genere nei modelli di assegnazione dinamica (DTA- Dynamic Traffic Assignment), può variare sia la domanda che l'offerta.

Definita la scala spazio-temporale di indagine esistono ulteriori distinzioni con le quali simulare le scelte degli utenti sulla rete.

Pertanto una prima distinzione è fatta in base all'utilizzo di un approccio di tipo deterministico piuttosto che stocastico (Cascetta 2006); per ognuno di questi si può considerare un approccio iterativo (User Equilibrium) o non iterativo (Tabella 4).

Deterministic without user equilibrium	Deterministic with user equilibrium
Stochastic without user equilibrium	Stochastic with user equilibrium

Tabella 4. Tipologie di assegnazione

In sintesi esistono diverse scale spaziali, temporali e diverse modalità con le quali simulare le scelte degli utenti sulla rete.

3.1 I modelli macroscopici

I modelli macroscopici forniscono variabili aggregate quali flusso, densità e velocità media. Nella teoria del traffico in questi modelli viene ipotizzata una similitudine con la meccanica dei fluidi nella quale si studia un portata, in una data sezione che transita con determinati valori di velocità e densità.

In condizioni di stato stazionario le tre grandezze caratteristiche del deflusso sono legate dall'equazione di stato, riportata di seguito:

$$q = \rho v \quad (3.1)$$

dove q rappresenta il flusso, ρ la densità e v la velocità.

Il distanziamento spaziale Δx tra due veicoli della stessa classe è dato dal prodotto del distanziamento temporale h per la velocità v . Il flusso di veicoli attraverso una data sezione è pari all'inverso del distanziamento medio nel tempo.

Inoltre la densità risulta pari all'inverso del distanziamento medio spaziale. Sostituendo il flusso e la densità rispettivamente al distanziamento temporale e a quello spaziale, si ottiene, per una generica classe di veicoli m :

$$q_m = v_m \rho_m \quad (3.2)$$

Sommando i veicoli delle diverse classi, il flusso totale e la densità totale sono:

$$q = \sum_m q_m ; \rho = \sum_m \rho_m \quad (3.3)$$

Sostituendo la (3.2) nella prima espressione della (3.3) e, dividendo numeratore e denominatore per la densità totale ρ , si ottiene:

$$q = \sum_m v_m \rho_m = \rho \sum_m \frac{v_m \rho_m}{\rho} = \rho v_m^* \quad (3.4)$$

La relazione flusso-densità (curva $q-\rho$) è chiamata diagramma fondamentale del traffico. Tale diagramma assume differenti andamenti a seconda della forma funzionale che lega le variabili velocità e densità.

Una corrente di veicoli in movimento deve rispettare la condizione fisica di conservazione della massa; in un dato intervallo temporale la variazione del numero di veicoli presenti in un arco Δx è uguale alla differenza tra il numero di veicoli entrati ed il numero di veicoli usciti nello stesso intervallo di tempo.

Ad esempio, ipotizzando l'assenza di rampe intermedie e facendo riferimento ad un arco di lunghezza Δx e ad un intervallo temporale Δt , l'equazione di continuità assume la seguente forma:

$$\rho(x, t + \Delta t)\Delta x - \rho(x, t)\Delta x = q(x, t)\Delta t - q(x + \Delta x, t)\Delta t \quad (3.5)$$

Passando al limite per $\Delta x \rightarrow 0$ e $\Delta t \rightarrow 0$, si ottiene la classica espressione dell'equazione di continuità:

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (3.6)$$

La relazione flusso-densità (curva $q-k$) è chiamata *diagramma fondamentale del traffico*. Tale diagramma assume differenti andamenti a seconda della forma funzionale che lega le variabili velocità e densità.

Greenshields (1934) ipotizzò una relazione lineare decrescente tra velocità e densità, ottenendo quindi una relazione tra flusso e densità di tipo parabolico. Greenberg (1959) ipotizzò, per lo stato stazionario, un legame di tipo logaritmico tra velocità e densità e di conseguenza una relazione flusso-densità sarà di tipo logaritmico.

Nel corso degli anni vari studiosi hanno proposto altri modelli di condizionamento, ipotizzando altre forme funzionali del legame $v-\rho$, ad esempio esponenziale negativa (Underwood, 1961), (Edie, 1961).

Nella pratica professionale si fa spesso ricorso a diagrammi semplificati di tipo triangolare (Figura 10); data la capacità dell'arco (C), ipotizzando la velocità del flusso veicolare pari a quella a deflusso libero per tutte le condizioni in cui $q < C$.

Il diagramma fondamentale racchiude sinteticamente le caratteristiche specifiche di una sezione e/o arco stradale (Figura 10).

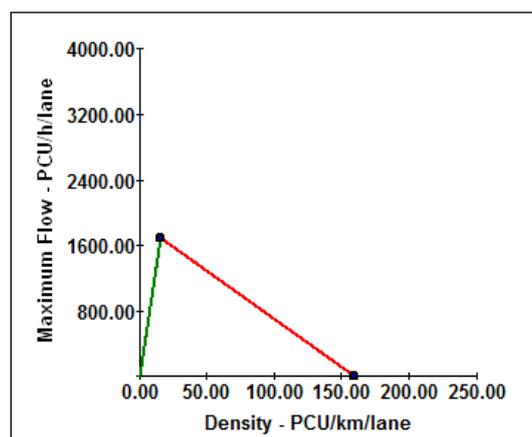


Figura 10. Diagramma fondamentale semplificato (triangolare)

I modelli macroscopici richiedono un basso numero di dati di input i quali spesso possono essere anche stimati facilmente. Per la loro semplicità e per il basso numero di dati necessari questi modelli sono in genere usati in reti di grandi dimensioni nelle quali per l'appunto non si hanno a disposizione molti dati dettagliati.

A fronte della loro facilità di utilizzo i risultati forniti rappresentano piuttosto una stima e sono comunque sempre riferiti a variabili di tipo aggregato.

La rappresentazione dei nodi difficilmente può essere affrontata con questi modelli proprio per la loro scala di dettaglio poco elevata. E' infine opportuno precisare che proprio per la loro semplicità i risultati/stime forniti da questi modelli sono spesso attendibili e stabili.

3.2 I modelli microscopici

I modelli microscopici sono basati sulla rappresentazione dettagliata dell'offerta e della domanda; sono modelli di tipo disaggregato e i risultati forniti sono in genere molto accurati. Nei modelli microscopici si definisce il comportamento dell'utente all'interno della corrente veicolare oltre che nei movimenti alle intersezioni. Differenti modelli sono stati

sviluppati per rappresentare il comportamento dell'utente ("driving behaviour"):

- Modello del veicolo accodato (car following)
- Modello di accettazione dell'intervallo (gap acceptance)
- Modello del cambio di corsia (lane changing)

A partire dalla metà del secolo scorso sono stati sviluppati diversi modelli del veicolo accodato tra i più noti si trovano i modelli stimolo risposta basati sull'ipotesi che la risposta del veicolo *follower* sia direttamente proporzionale allo stimolo (es. velocità relativa tra i due veicoli), i modelli a risposta continua nei quali non si considera il tempo di reazione e si basano sull'ipotesi che il veicolo *follower* possieda una velocità desiderata funzione del distanziamento, i modelli basati sulla distanza di sicurezza fondati sull'idea che il veicolo *follower* si mantenga ad una distanza di sicurezza dal veicolo *leader* e infine i modelli psicofisici atti a riprodurre il processo decisionale umano alla base della guida, considerando alcune regole comportamentali e la percezione del guidatore.

Basato sull'ipotesi di Forbes (1958), il primo modello stimolo risposta fu sviluppato da Chandler et alii (1958) ed è costituito da una funzione lineare in cui la risposta del veicolo *follower* è direttamente proporzionale alla velocità relativa tra il veicolo e il *leader*, segue la formulazione matematica:

$$a_n(t) = \lambda \Delta v(t - \tau_n) \quad (3.7)$$

dove il termine λ è la sensitività, τ è il tempo di reazione dei guidatori, a_n è l'accelerazione del *follower* e Δv è la velocità relativa. Il limite principale di questa formulazione è che lo stimolo non è funzione del distanziamento tra i due veicoli. Gazis, Herman e Potts (1959) elaborarono l'ipotesi che la sensitività fosse inversamente proporzionale al distanziamento. Successivamente Edie (1961) aggiunse al modello di Greenshield, che formulò l'inversa proporzionalità tra la sensitività ed il quadrato del distanziamento, anche la velocità del *follower*.

In seguito i ricercatori della General Motors (1961) Gazis, Herman e Rothery generalizzarono il modello di veicolo accodato (GHR), la cui formulazione matematica è un'equazione differenziale non lineare:

$$a_n(t) = \lambda \frac{[v_n(t)]^m}{[\Delta x(t - \tau_n)]^l} \Delta v(t - \tau_n) \quad (3.8)$$

dove il termine Δx è il distanziamento spaziale e v_n è la velocità del veicolo *follower*. Tuttavia tale modello, come quelli precedenti, non è realistico in condizioni di bassa densità, poiché se la velocità relativa è nulla, esso non produce alcuna risposta anche per distanziamenti tra i veicoli molto bassi.

Bando et alii (1995) propose il primo modello basato sulla velocità ottima, in cui la risposta del *follower* è proporzionale alla differenza tra la velocità ottima e la velocità attuale.

Il primo modello sviluppato da Kometani, Sasaki (1959) basato sulla distanza di sicurezza si fonda sull'ipotesi che il veicolo *follower* moduli la sua velocità per mantenere la distanza di sicurezza.

$$\Delta x(t - \tau) = \alpha v_{n-1}^2(t - \tau) + \beta_1 v_n^2(t) + \beta v_n(t) + b_0 \quad (3.9)$$

Uno dei primi modelli psicofisici fu sviluppato da Michaels (1963) il quale ipotizzò che il *follower* percepisse la velocità relativa attraverso variazioni del campo visivo (angolo sotteso al *leader*), e definì due soglie di percezione e due fasi di decelerazione.

In genere i modelli microscopici sono utilizzati nello studio di reti di modeste dimensioni e/o per lo studio di corridoi e singole intersezioni; per la notevole quantità di dati richiesti in ingresso difficilmente si applicano a reti di grandi dimensioni. Un'altra importante applicazione dei modelli microscopici è per l'analisi e la simulazione di interventi e strategie off-line; infatti in ragione degli alti tempi computazionali questi modelli difficilmente riescono ad essere utilizzati per la simulazione e l'adozione di strategie on-line.

3.3 I modelli mesoscopici con dinamica intra-periodale

I modelli mesoscopici descrivono il deflusso stradale ad un livello di dettaglio del singolo veicolo o di un gruppo di veicoli chiamato "pacchetto". Sebbene la rappresentazione del traffico sia discreta le leggi

di movimento dei veicoli dipendono dalle relazioni tra le variabili aggregate del deflusso o da funzioni probabilistiche.

Da un punto di vista modellistico un modello di offerta dinamico mesoscopico esprime flussi e prestazioni del sistema in maniera analoga al caso statico; i due modelli sono molto simili tra loro ma con una importante differenza: nel modello dinamico mesoscopico la propagazione è dipendente dalla prestazione d'arco. In sostanza il numero di utenti presente su un arco in un dato istante dipende dai tempi di viaggio necessari agli utenti per raggiungere quell'arco, che a loro volta dipendono dal numero di utenti incontrati sugli altri archi della rete negli istanti precedenti. Pertanto non è possibile una risoluzione sequenziale del modello di propagazione del flusso sulla rete e del modello di prestazione d'arco proprio per via di una dipendenza circolare tra gli stessi. In letteratura questo problema è noto come "caricamento dinamico della rete" (DNL- Dynamic Network Loading").

Le relazioni tra i flussi di percorso ed i costi di percorso non sono più equazioni lineari algebriche ma equazioni differenziali (per via del tempo).

In un modello mesoscopico con dinamica intra-periodale l'offerta può essere formalizzata come segue (Cascetta 2006).

$$\mathbf{f}[j] = \Phi(\mathbf{h}[l], \mathbf{t}(\tau'); l < j, \tau' \in [\tau_l, \tau_j]) \quad (3.10)$$

Φ è una funzione non lineare che lega il vettore dei flussi d'arco in entrata e uscita $\mathbf{f}[j]$, al vettore dei flussi di percorso $\mathbf{h}[l]$ che partono tra gli intervalli l e j e al vettore dei tempi di percorso $\mathbf{t}[\tau']$ tra i tempi τ_l e τ_j ,

Il modello di offerta globale si completa con la relazione simbolica che lega i tempi di percorrenza di percorso a quelli d'arco (Cascetta 2006).

$$\mathbf{TT}^f[\tau_j] = \Gamma(\mathbf{t}(\mathbf{n}(\tau'))); \tau' > \tau_j \quad (3.11)$$

ed i costi generalizzati di percorso ai tempi di percorrenza e agli altri costi d'arco (Cascetta 2006):

$$g(\tau_j) = \beta_t \mathbf{TT}^f[\tau_j] + \mathbf{EC}(\tau_j) \quad (3.12)$$

I modelli di domanda di tipo mesoscopico con dinamica intra-periodale esprimono la relazione tra flussi di percorso e costi di percorso; uno

sempre incluso in ogni modello di assegnazione è riferito alla scelta dell'orario di partenza e del percorso. La probabilità di scelta di questi due elementi è spesso rappresentata per mezzo di modelli di utilità aleatoria, quale ad esempio il modello Logit Multinomiale. Pertanto la probabilità di scelta dell'orario τ e del percorso x , data la coppia od e l'orario desiderato τ_d può essere scritta nella seguente forma.

$$p_{od,x}\left(\frac{\tau}{\tau_d}\right) = \frac{e^{(V_x(\frac{\tau}{\tau_d}))}}{\sum_{j \in X_{od}} \int_0^T e^{(V_j(\frac{\theta}{\tau_d}))} d\theta} \quad (3.13)$$

Dove $V_x(\tau/\tau_d)$ rappresenta l'utilità sistematica del percorso x e dell'orario di partenza τ dato l'orario di arrivo desiderato τ_d .

Nota la probabilità di scelta di orario e percorso $p_{od,x}(\tau/\tau_d)$ è possibile scrivere l'equazione di conservazione della domanda in funzione del flusso istantaneo di domanda $d_{od}(\tau_d)$ tra la coppia $o-d$ con orario di arrivo desiderato τ_d :

$$h_x(\tau) = \int_0^T p_{od,x}\left(\frac{\tau}{\tau_d}\right) \cdot d_{od}(\tau_d) d\tau_d \quad (3.14)$$

Nei modelli con profilo di domanda fissa si ipotizza che la distribuzione dei flussi nei diversi orari di partenza sia nota a priori, ovvero indipendente dai tempi di percorrenza. In questo caso l'equazione di conservazione della domanda può essere riscritta (Cascetta 2006):

$$h_x(\tau) = d_{od}(\tau) \cdot p_{od,x}(V_{od}(\tau)) \quad (3.15)$$

Dove $d_{od}(\tau)$ è la domanda fra la coppia $o-d$ che parte nell'istante τ ; $p_{od,x}(\tau)$ è la probabilità di scelta del percorso x da parte degli utenti che partono all'istante τ ; infine $V_{od}(\tau)$ è il vettore delle utilità sistematiche dei diversi percorsi x che collegano la coppia od .

Il modello di assegnazione dinamica per reti non congestionate può essere formalizzato attraverso la scrittura di tre equazioni rappresentative il modello di offerta ed altre due di quello di domanda. In questo caso il tempo di percorrenza di un arco non dipende dai carichi sulla rete.

$$\mathbf{t}^f(\tau) = \mathbf{t}^0(\tau) \quad (3.16)$$

$$\mathbf{TT}^f(\tau) = \Gamma(\mathbf{t}^0(\tau)) \quad (3.17)$$

$$\mathbf{f}(\tau) = \Phi(\mathbf{h}(\tau), \mathbf{t}^0(\tau)) \quad (3.18)$$

$$\mathbf{h}(\tau) = \int_0^T P(\mathbf{V}_{od}\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) \cdot \mathbf{d}(\tau_0) \cdot d\tau_0) \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{od}\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) = & \beta_t \mathbf{TT}(\tau) + \mathbf{EC}(\tau) + \beta_e \text{EDP}(\tau, \tau_0) + \\ & + \beta_l \mathbf{LDP}(\tau, \tau_0) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Dove EDP (τ, τ_0) e LDP (τ, τ_0) sono rispettivamente penalità di anticipo e di ritardo per partenze a un istante τ antecedente/successivo a τ_0 .

Le prime tre equazioni rappresentano il modello di prestazione di arco, il modello di prestazione di percorso ed il modello di propagazione dei flussi sulla rete. Le restanti due equazioni rappresentano il modello di domanda

Nei casi di reti congestionate (modelli di assegnazione di equilibrio) con dinamica intra-periodale i flussi di percorso dipendono dai costi di percorso (come nel caso stazionario) ma anche i tempi di viaggio d'arco dipendono dai flussi.

Nel caso di flusso continuo i modelli di equilibrio possono essere espressi come problemi di punto fisso nei tempi di percorrenza, costi e flussi (Cascetta 2006).

$$\mathbf{t}^f(\tau) = \mathbf{t}^f(\mathbf{f}(\tau)) \quad (3.21)$$

$$\mathbf{TT}^f(\tau) = \Gamma(\mathbf{t}^f(\tau); \tau' > \tau) \quad (3.22)$$

$$\mathbf{f}(\tau) = \Phi(\mathbf{h}(\tau'), \mathbf{t}^f(\tau); \tau' > \tau) \quad (3.23)$$

$$\mathbf{h}(\tau) = \int_0^T P(\mathbf{V}_{od}\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) \cdot \mathbf{d}(\tau_0) \cdot d\tau_0) \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{od}\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) = & \beta_t \mathbf{TT}^f(\tau) + \mathbf{EC}(\tau) + \beta_e \text{EDP}(\tau, \tau_0) + \\ & + \beta_l \mathbf{LDP}(\tau, \tau_0) \end{aligned} \quad (3.25)$$

A seconda del modello di scelta del percorso i modelli dinamici di equilibrio possono essere deterministici o stocastici.

Da un punto di vista più generale i modelli mesoscopici possono essere definiti come una via di mezzo tra un approccio con variabili aggregate (macro) ed uno con variabili disaggregate (micro), dove i tempi ed i costi computazionali sono accettabili anche per reti di grandi dimensioni; il risultato può essere considerato ancora affidabile ma con un livello di precisione sicuramente superiore a quello dei modelli macroscopici ed inferiore di quello dei modelli microscopici. Oltre ai tipici dati di input di un modello macroscopico i modelli mesoscopici richiedono la conoscenza di ulteriori variabili tra le quali:

- Periodo di analisi e scelta delle finestre temporali
- Caratteristiche delle intersezioni semaforizzate (offset, parametri di ciclo, ecc.)
- Domanda variabile nel tempo

I valori di uscita di questi modelli sono ancora flusso, densità e velocità per ogni arco ma riferiti in genere a differenti intervalli temporali; in sostanza con questi modelli è possibile considerare le variazioni dei flussi anche a livello temporale oltre che a livello spaziale così come nei modelli macroscopici. I modelli mesoscopici possono fornire anche output di tipo microscopico quali per esempio la lunghezza della coda ad una intersezione semaforizzata; è però importante interpretare correttamente il significato dell'output fornito. Ad esempio nel modello mesoscopico utilizzato nel software Dynameq [INRO] un veicolo è considerato in coda nel caso in cui la sua velocità è inferiore alla velocità a flusso libero, ovvero si trova nella parte instabile del diagramma fondamentale.

E' inoltre interessante notare come in generale i risultati sono forniti per gli stessi intervalli temporali scelti per la domanda. In alcuni casi è però possibile ottenere risultati anche per finestre temporali più piccole attraverso l'uso di un sotto-modello di generazione del traffico "traffic generator". Un altro importante sotto-sistema di questi modelli è il "path choice sub-model" che consente di definire diverse alternative di percorso e assegnare i flussi di percorso su ogni percorso ("user equilibrium").

I modelli mesoscopici sono la nuova generazione dei modelli di assegnazione del traffico e sono stati sviluppati a partire dagli anni '90. Il loro successo risiede nella possibilità di superare i limiti dei modelli macroscopici con la possibilità di stimare condizioni di carico sulla rete più realistiche e simulare di conseguenza differenti strategie di gestione del traffico sia on-line che off-line.

4 I modelli per la stima delle emissioni inquinanti

Prima di descrivere i modelli per la stima delle emissioni inquinanti è opportuno precisare la loro posizione all'interno della più ampia catena modellistica per la determinazione delle concentrazioni in aria degli inquinanti a partire da diverse sorgenti di emissione.

Nella presente ricerca si fa riferimento al settore dei trasporti e pertanto questo inquadramento verrà sviluppato all'interno di questo specifico settore, ma ricordando la sua validità anche per altre sorgenti di emissione.

I modelli di stima per le emissioni inquinanti hanno la finalità di quantificare il totale di emissione prodotta da un dato sistema. Pertanto si collocano a metà strada tra i modelli di assegnazione del traffico ed i modelli di dispersione. Attraverso i modelli di assegnazione vengono stimate le caratteristiche della corrente veicolare (modelli macroscopici) e/o dei singoli veicoli (modelli microscopici) mentre i modelli di emissione stimano la quantità di un dato inquinante prodotta dal sistema (corrente veicolare e/o singolo veicolo) in un determinato periodo temporale di riferimento. Infine i modelli di dispersione stimano e studiano come questo determinato quantitativo di emissione (espresso in chilogrammi piuttosto che grammi) si disperde nell'aria. Questi modelli si basano sulla conoscenza e l'integrazione di sotto-modelli meteorologici e sulla conoscenza delle caratteristiche geo-morfologiche del sito in oggetto. In genere si costruisce un reticolo a maglia quadrata e/o rettangolare stimando la quantità di emissione presente al suo interno. Il calcolo è riferito a diverse finestre temporale post-emissione nelle quali si tiene conto di temperatura, vento, condizioni climatiche in generale le quali impattano notevolmente sulla distribuzione in aria dell'inquinante (ad esempio è conoscenza comune che l'assenza di pioggia ha un impatto negativo sulla qualità dell'aria permettendo una significativa e consistente dispersione degli inquinanti).

In Figura 11 si riporta uno schema logico con l'individuazione dei tre principali modelli (Assegnazione, Emissione, Dispersione).



Figura 11. Catena modellistica

Nel corso del presente lavoro di ricerca si è focalizzata l'attenzione sui modelli di assegnazione del traffico, sui modelli stima delle emissioni e sulla loro interazione; i modelli di dispersione non sono stati valutati e studiati.

I modelli per la stima delle emissioni inquinanti sono pertanto strettamente legati ai modelli di assegnazione del traffico ed hanno la finalità di stimare le emissioni inquinanti, quali CO, NO_x, PM ecc, in una determinata rete stradale e caricata da un determinato numero di veicoli. Il problema della stima delle emissioni inquinanti è molto ampio, sia per quanto riguarda la scelta della scala spaziale di riferimento che per la scelta di quella temporale. Una prima distinzione a livello spaziale può essere fatta considerando analisi su scala nazionale, regionale, provinciale e comunale; ma anche all'interno della stessa unità comunale si presentano ulteriori scelte spaziali passando dalla rappresentazione dell'intera rete urbana fino a quella di una singola arteria o intersezione. E' subito chiaro come la scelta della scala di dettaglio scelta svolga un ruolo fondamentale in tutto il successivo processo di analisi.

Anche per la scala temporale di riferimento si possono individuare diverse scelte passando da analisi sull'intero anno solare e scendendo di livello fino alle ore ed i minuti. Sempre da un punto di vista temporale è inoltre possibile scegliere se analizzare una singola finestra temporale (analisi statica) o più finestre temporali (analisi dinamica).

Le differenti scelte a livello spaziale e temporale donano al problema della stima delle emissioni inquinanti diversi gradi di libertà. Ma dall'altro lato si può affermare che i gradi di vicolo del problema sono invece fissati sia dallo scopo e dalla finalità dell'analisi stessa che dalla disponibilità dei dati di input.

In genere la stima delle emissioni inquinanti non è un esercizio fine a se stesso, ma rappresenta un ruolo fondamentale di supporto alle decisioni in fase di progettazione ed ottimizzazione della rete e delle risorse. La stima delle emissioni inquinanti può essere necessaria per lo studio di due o più alternative di percorso (ad esempio tra due varianti di tracciato di una autostrada) ma anche per la scelta della fasatura ottimale di una o più

intersezioni semaforizzate. In generale la stima delle emissioni inquinanti dovrebbe accompagnare qualsiasi studio di gestione ed ottimizzazione del traffico, soprattutto nella società odierna in cui si presta sempre maggiore attenzione al problema dell'inquinamento atmosferico e alla salvaguardia e tutela della salute umana.

In riferimento ai dati di input si possono definire due categorie distinte:

- Dati per la caratterizzazione delle condizioni di deflusso
- Dati per la rappresentazione del parco veicolare circolante

I dati del primo gruppo sono rappresentati dall'output fornito dai modelli di assegnazione del traffico; pertanto in funzione del modello di assegnazione utilizzato si avranno a disposizione dati più o meno aggregati.

I dati del secondo gruppo servono a definire i fattori specifici di emissione i quali sono strettamente connessi con la categoria tecnologica del veicolo (standard Euro0, Euro1, ecc).

Il calcolo delle emissioni può essere effettuato sia a livello aggregato attraverso la conoscenza di valori medi e aggregati d'arco che a livello discreto. In funzione della rappresentazione dei dati di input è possibile distinguere tre modelli distinti:

- Modelli di tipo macroscopico
- Modelli di tipo mesoscopico
- Modelli di tipo microscopico

I modelli macroscopici per la stima delle emissioni sono basati sui modelli del traffico di tipo macroscopico e pertanto forniscono valori aggregati e riferiti ai singoli archi ma non ai singoli veicoli. La rete stradale è rappresentata mediante un grafo orientato con archi e nodi, in cui non sono rappresentati i singoli veicoli ma bensì i flussi d'arco (analogia idrodinamica).

Il modello più conosciuto in questo ambito è "Corinair" (COordination INformation AIR) e sviluppato dall'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA); questo modello rappresenta il riferimento per la stima delle emissioni in Europa. Il modello "Corinair" è quindi un modello di tipo macroscopico e si articola in differenti funzioni di calcolo in base alla quantità e qualità dei dati disponibili in ingresso.

Una dettagliata illustrazione del modello e della procedura per la stima delle emissioni con questo strumento è riportata in “1.A.3.b Road transport GB2009 update June2010”; in questa sede ci si limita ad illustrarne una sintesi ponendo l’accento su alcuni aspetti ritenuti interessanti per il lavoro svolto in questa ricerca.

Il modello “Corinair” si articola in 3 funzioni alternative, ovvero l’utilizzo di una esclude l’utilizzo delle altre.

In Figura 12 è riportato un diagramma semplificato illustrativo della procedura “Corinair”.

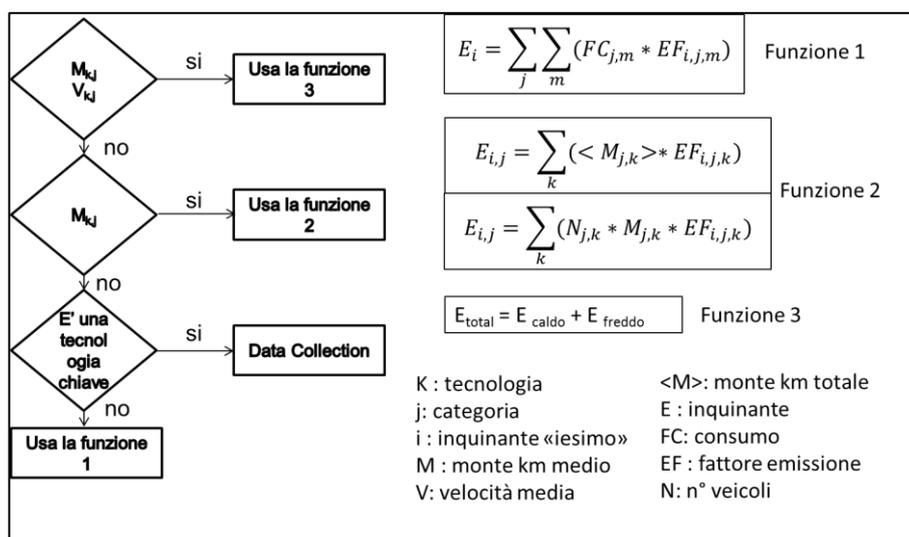


Figura 12. Procedura “Corinair”

La funzione 1 è utilizzata per il calcolo delle emissioni inquinanti quando si hanno pochi dati a disposizione. La stima viene eseguita in funzione del consumo di carburante $FC_{j,m}$ e del fattore specifico di emissione $EF_{i,j,m}$ eseguita a livello di ogni inquinante i , categoria veicolare j e tecnologia k .

$$E_i = \sum_j \sum_m (FC_{j,m} \cdot EF_{i,j,m}) \quad (4.1)$$

La funzione 2 è un’evoluzione della funzione 1 e con la quale è possibile migliorare la stima legandola al monte chilometri $M_{j,k}$

$$E_{i,j} = \sum_k (M_{j,k} \cdot EF_{i,j,k}) \quad (4.2)$$

Oppure al monte chilometri distinto per categoria veicolare (attraverso il numero di veicoli $N_{j,k}$)

$$E_{i,j} = \sum_k (N_{j,k} \cdot M_{j,k} \cdot EF_{i,j,k}) \quad (4.3)$$

La funzione 3 è quella che meglio stima le emissioni ma richiede necessariamente un maggior numero di dati in ingresso rispetto alla funzione 1 e 2. Con la funzione 3 il calcolo è eseguito sommando il contributo legato ai chilometri percorsi in ambito urbano, rurale ed autostradale.

$$E_{total} = E_{rural} + E_{urban} + E_{highway} \quad (4.4)$$

Inoltre sono distinte due tipologie di emissioni: emissioni a freddo ed emissioni a caldo.

$$E_{total} = E_{cold} + E_{hot} \quad (4.5)$$

Le emissioni a freddo sono stimate attraverso la conoscenza del fattore di emissione a caldo $e_{HOT;i,k,r}$ oltre che del monte chilometri e del numero di veicoli:

$$E_{HOT;i,k,r} = N_k \cdot M_{r,k} \cdot e_{HOT;i,k,r} \quad (4.6)$$

Le emissioni a freddo sono invece calcolate come surplus delle emissioni a calda per mezzo del parametro di emissione a freddo e_{COLD} :

$$E_{COLD;i,j} = \beta_k \cdot M_r \cdot e_{HOT;i,k,r} \cdot \left(\frac{e_{COLD}}{e_{HOT;i,k-1}} \right) \quad (4.7)$$

E' utile precisare che sia il parametro di emissione a caldo che quello a freddo sono funzione della velocità media del veicolo e/o del flusso veicolare.

I valori di emissione specifica sono calcolati in laboratorio attraverso procedure standardizzate. In particolare i fattori specifici di emissione sono calcolati (stimati) utilizzando un'apparecchiatura di laboratorio che testa e misura le quantità di emissione prodotta dal veicolo sotto differenti condizioni di regime del motore. Ogni categoria di veicolo è sottoposta a questi test nei quali sono utilizzati dei cicli di guida standard quale ad esempio il ciclo NEDC (New European Drive Cycle).

Il tipo di alimentazione (benzina, diesel, GPL) riveste un ruolo centrale e pertanto veicoli di cilindrata e potenza simile sotto le stesse condizioni d'uso (test con cicli standard) emettono quantitativi diversi dei medesimi inquinanti. Ma anche il tipo di omologazione in base alla normativa comunitaria svolge anch'esso un ruolo cruciale. Infine anche la velocità incide notevolmente sulla quantità di emissioni prodotte.

Nell'ambito di questa ricerca l'interesse principale è in quest'ultimo parametro (la velocità) in quanto è l'unica variabile del problema che può essere modificata/controllata nell'ambito della teoria del traffico; infatti il tipo di alimentazione così come il tipo di omologazione non hanno correlazione con interventi di progettazione di nuova viabilità e/o di "traffic management", viceversa per la velocità. Con questo non si vuole affatto ridurre l'importanza delle prime due variabili in gioco (tipo di alimentazione e tipo di omologazione) ma si vuol solo evidenziare dove la disciplina ingegneristica gioca il suo ruolo centrale.

Questi modelli per la stima delle emissioni sono molto semplici da un punto di vista concettuale ed offrono il grande vantaggio di poter essere applicati con facilità in rete di grandi dimensioni poiché sono richiesti pochi dati in ingresso e facilmente disponibili e/o calcolabili. Dall'altro lato numerosi studi (Shukla-Alam; Rakha-Ding; Roupail-Frey-Colyar-Unal) dimostrano che in condizioni congestionate il tasso di emissione è decisamente più elevato che in condizioni di flusso libero.

I modelli microscopici per la stima delle emissioni sono basati su modelli di assegnazione del traffico di tipo microscopico e forniscono risultati molto dettagliati e disaggregati.

Il modello di riferimento è "Moves" (Motor Vehicle Emission Simulator) e rappresenta il modello di riferimento utilizzato negli Stati Uniti; così come "Corinair" è il modello macroscopico di riferimento in Europa, "Moves" è il duale negli Stati Uniti anche seppur di tipo microscopico.

Un modello microscopico fornisce stime di inquinamento relative al singolo veicolo su diverse finestre temporali. Mentre per un modello di

tipo macroscopico può aver senso svolgere un'analisi sia di tipo statico che dinamico (su diverse finestre temporali) per un modello di tipo microscopico l'analisi in genere è di tipo dinamico, nella quale si simula il movimento sulla rete dei singoli veicoli per una determinata sequenza temporale.

Si riporta di seguito un estratto della funzione per il calcolo delle emissioni inquinanti con un modello di tipo microscopico e si rimanda a testi specifici per ulteriori approfondimenti che in questa sede si è ritenuto opportuno non evidenziare. Il calcolo è effettuato per ogni classe veicolare vc , inquinante i e considerando il monte chilometri totale M e la velocità di ogni classe veicolare v :

$$E_{i,vc} = M \cdot \gamma_{vc} \cdot \sum_5^{70} \alpha_{v,vc} \cdot e_{i,v,vc} \quad (4.8)$$

dove γ_{vc} rappresenta Frazione del monte km in funzione della classe veicolare (da ITS o modelli Macro/Micro per reti di grandi/piccole dimensione)

$$\gamma_{vc} = \frac{M_{vc}}{M} \quad (4.9)$$

α_{vc} rappresenta la frazione del monte km in funzione della velocità

$$\alpha_{v,vc} = \frac{M_{v,vc}}{M_{vc}} \quad (4.10)$$

$e_{i,v,vc}$ rappresenta l'emissione specifica calcolata con i dati quali velocità istantanea v_{ist} , accelerazione acc , decelerazione dec . e ritardo $delay$, ricavati da un modello di assegnazione di tipo Microscopico

$$e_{i,v,vc} = \frac{\text{emissione di default}_{v,vc}}{M_{v,vc} \text{ default}} \quad (4.11)$$

Il modello risulta di difficile applicazione in reti reali, dove le variabili di input richieste non sono facilmente disponibili:

- 1) Offerta (conoscenza dettagliata della rete)
- 2) Domanda

La stima di v_{ist} , acc , dec , $delay$ non risulta disponibile su reti delle dimensioni reali.

Dall'altro lato numerosi studi (Stevanovic-Zhang-Batterman 2009) mostrano come i modelli microscopici di stima delle emissioni sono un valido strumento per l'analisi di situazioni puntuali come nel caso delle arterie semaforizzate (Midnet-Boillot-Pierrelee; Coelho-Farias-Rouphail; Rakha-Van Aerde-Ahn-Trani) dove la funzione di emissione è stimabile.

I modelli mesoscopici per la stima delle emission sono meno noti e meno diffuse di quelli macroscopici e di quelli microscopici.

Rakha e Yue (2009) hanno sviluppato un modello mesoscopico basato sulla conoscenza del monte chilometri $M_{j,k}$ e di un fattore di emissione specifica di tipo mesoscopico $e_{i,j,k}$.

$$E_{i,j} = \sum_k (M_{j,k} \cdot e_{i,j,k}) \quad (4.12)$$

Il fattore è stimato a partire da un ciclo di guida standard funzione della velocità, del numero di stop e del ritardo dei veicoli.

4.1 Considerazioni e confronto sui modelli di letteratura

Un'analisi di confronto tra questi tre modelli di letteratura è necessaria e propedeutica all'illustrazione del modello proposto.

Nel capito 3 si sono illustrati sinteticamente i principali modelli (evidentemente una parte) per la stima delle condizioni di deflusso in una rete stradale. In particolare sono stati individuati modelli di tipo macroscopico, poco dettagliati, molto aggregati e basati sull'analogia idrodinamica; in opposizione esistono i modelli microscopici molto dettagliati, disaggregati e basati sulla simulazione del singolo veicolo; infine i modelli mesoscopici, basati in parte sui modelli macroscopici (deflusso negli archi) e in parte su quelli microscopici (deflusso nei nodi). In ogni caso prescindendo dal tipo di modello considerato si può affermare che ad oggi sono stati tutti sviluppati validati e largamente utilizzati e diffusi, rappresentando quindi affidabili strumenti di analisi e supporto alle decisioni.

Viceversa nei modelli per la stima delle emissioni inquinanti, la conoscenza e l'affidabilità degli stessi è ancora in corso di miglioramento; i modelli di tipo microscopico e macroscopico sono i più sviluppati mentre quelli di tipo mesoscopico (da letteratura) sono ben poco noti e sviluppati.

Il modello "Corinair" sembra essere il più affidabile soprattutto per la sua semplicità e per il numero ridotto di variabili di input, elementi che riducono notevolmente il grado di incertezza degli input e quindi del risultato. "Corinair" sembra quindi essere un valido strumento di analisi di reti di grandi dimensioni dove in genere non è richiesto un elevato grado di accuratezza del risultato; ad esempio basti pensare all'analisi di un'autostrada di centinaia di chilometri e al modesto impatto (in termini di emissioni) che avrebbe una modellazione poco accurata di una singola uscita autostradale. In questi casi un modello di tipo macroscopico e aggregato rappresenta sicuramente uno strumento di analisi coerente e facilmente applicabile. Anche nello studio preliminare di una rete urbana un modello tipo "Corinair" rappresenta una buona soluzione per studiare il problema. Viceversa l'utilizzo di un modello macroscopico per l'analisi di una singola arteria stradale e ancor più per una singola intersezione non risulta sicuramente idoneo ed adeguato. In questi casi i modelli microscopici forniscono risultati molto più coerenti e dettagliati permettendo quindi non solo di stimare le emissioni per una data configurazione della rete ma anche di cogliere le variazioni indotte da interventi di miglioramento e/o modifica della rete stessa.

Un'ulteriore considerazione molto importante e cruciale per lo sviluppo del modello ad hoc proposto al capitolo seguente è il legame molto stretto che esiste tra velocità, accelerazione ed emissione. Nei paragrafi precedenti sono stati riportati alcuni esempi di curve e valori di emissione specifica e dai quali è facilmente osservabile come i valori più alti di emissione si ottengono per velocità basse o per velocità molto alte. Questa semplice osservazione pone l'attenzione sull'importanza delle basse velocità e ancor più dell'accelerazione; in letteratura è infatti noto come l'accelerazione giochi un ruolo centrale nella produzione di emissioni inquinanti. In ambito urbano, specialmente in condizioni di elevata congestione, il numero di "stop & go" ed accelerazioni compiute dai veicoli non è trascurabile; un modello di tipo microscopico riesce a cogliere questa dinamica di marcia computando di conseguenza un surplus di emissioni, viceversa per un modello macroscopico. E' quindi evidente l'assenza di una opportuna modellazione per tutte le situazioni in

cui si vuol analizzare una rete urbana (di medie-grandi dimensioni) in condizioni di congestione in quanto l'utilizzo di un modello macroscopico risulta inappropriato e incapace di cogliere le reali condizioni di congestione mentre l'utilizzo di modello microscopico risulterebbe invece inapplicabile sia per la notevole quantità di dati necessari che per la difficoltà di calibrazione dei diversi parametri in ingresso.

Queste semplice ma fondamentali considerazioni sono la motivazione per la quale è stato sviluppato un modello ad-hoc capace di stimare le emissioni inquinanti in reti urbane di medie-grandi dimensioni cogliendo le opportune differenze indotte da condizioni di deflusso in congestione. L'idea è quella di sviluppare un modello ed uno strumento di analisi facilmente applicabile in reti reali di grandi dimensioni, che richieda quindi un basso numero di variabili in ingresso ma che al contempo possa cogliere le differenze indotte da diverse condizioni di deflusso sia negli archi che nei nodi.

Considerata la stretta dipendenza tra modello di assegnazione del traffico e modello per la stima delle emissioni è stato deciso di proporre un modello ad hoc sia a livello "traffico" che "emissione" e basato su modelli noti in letteratura.

Pertanto per la definizione delle condizioni di deflusso sulla rete stradale è stato utilizzato un modello di assegnazione dinamica (DTA) di tipo mesoscopico con dinamica intra-periodale al quale sono stati aggiunti diversi sotto-modelli per la stima delle code alle intersezioni. Per la componente "emissioni" si è proposta una nuova funzione per il calcolo delle emissioni basata sullo sviluppo di diversi sotto-modelli per migliorare la stima dei fattori di emissione specifica sia per i veicoli con il tradizionale motore termico che per quelli ibridi ed elettrici.

5 Proposta di un modello integrato per la stima delle emissioni inquinanti

Dopo aver illustrato nel precedente paragrafo le motivazioni che hanno portato allo sviluppo del presente modello in questo capitolo si riportano la sua struttura e formulazione.

In Figura 13 è riportato il layout generale del modello proposto.

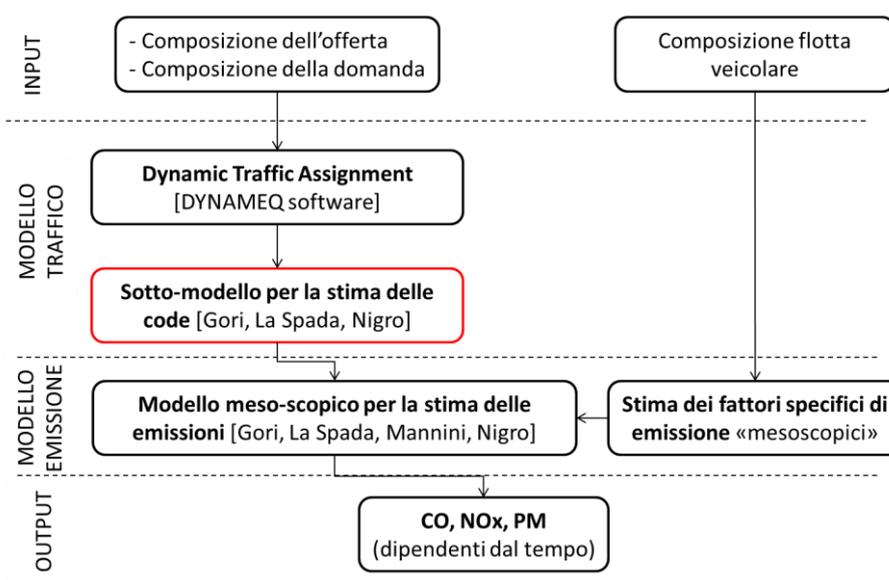


Figura 13. Layout del modello proposto

5.1 Proposta di un modello a due stadi (M2)

Partendo da un approccio di tipo "Corinair" si è sviluppato il primo modello. La scelta di utilizzare "Corinair" come base di partenza risiede nell'affidabilità che questo modello ha mostrato oltre che nella sua semplicità; si è ritenuto utile porre le basi del lavoro su un modello divulgato a livello europeo, di largo consenso e di facile utilizzo e controllo.

L'idea è quindi quella di passare da un approccio di tipo macroscopico ("Corinair") ad uno mesoscopico con dinamica intra-periodale come peraltro già definito nel capitolo precedente.

Prima di illustrare nel dettaglio la formalizzazione del modello proposto è utile individuare le differenze tra i due approcci. Le differenze sono molte e portano alla necessità di definire ulteriori variabili e/o implementare quelle proprie di un modello macroscopico. La prima è connessa con la "dinamica" temporale considerata in un approccio mesoscopico di tipo dinamico. Questa semplice differenza comporta la necessità di definire:

- l'orizzonte temporale e il numero di finestre temporali (funzione dello scopo del lavoro da svolgere)
- la variazione dell'offerta (impianti semaforici)
- la domanda variabile nel tempo

Una seconda e importante differenza risiede nella rappresentazione dei nodi. Infatti mentre gli archi sono sempre rappresentati attraverso il diagramma fondamentale (a volte mediante diagrammi "triangolari" semplificati), nel caso macroscopico i nodi sono considerati come delle impedenze all'interno dei percorsi individuati tra le coppie o-d mentre nel caso mesoscopico questi sono rappresentati con i dati propri dell'intersezione (dati semaforici, offset, n. corsie, ecc.). Pertanto in un modello mesoscopico è necessario definire una scala di dettaglio superiore attraverso una conoscenza della rete più dettagliata.

E' evidente come nel passaggio da un livello macroscopico ad uno microscopico possa nascere una propagazione degli errori significativa.

Pertanto l'idea di fondo è quella di proporre una formulazione del modello mesoscopico quanto più lineare possibile e quanto più vicina alla forma iniziale proposta in "Corinair".

La metodologia proposta si basa su due moduli distinti (Figura 14):

1. Modulo per l'assegnazione del traffico (DTA)
2. Post-processore per la stima delle emissioni inquinanti.

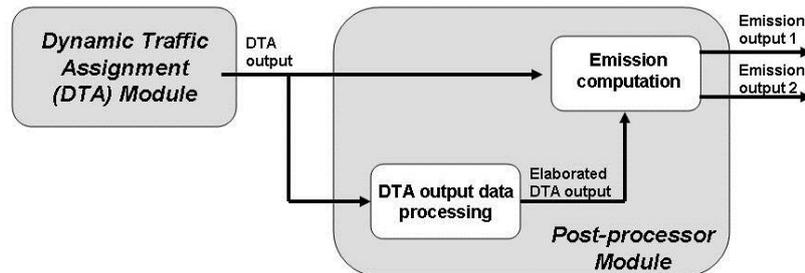


Figura 14. Layout modello a due stadi

Il primo modulo ha la funzione di stabilire le variazioni giornaliere in termini di deflusso sulla rete e condizioni di congestione; si articola nelle seguenti fasi:

- Calibrazione dell'area di studio;
- Stima della matrice origine-destinazione (o-d) per differenti finestre temporali (dynamic demand);
- Assegnazione dinamica del traffico (DTA)
- Raccolta dei dati di output dell'assegnazione dinamica da fornire successivamente al post-processore.

Attraverso l'utilizzo di un modello dinamico di tipo mesoscopico è possibile eseguire assegnazioni dinamiche del traffico (DTA) per reti di grandi dimensioni ed analizzando al contempo più finestre temporali.

In generale l'output fornito da modelli dinamici di tipo mesoscopico include il flusso in uscita, il flusso in ingresso, la velocità, la densità, e la lunghezza della coda per ogni arco della rete e per tutte le finestre temporali in cui è diviso l'orizzonte di analisi. Considerata l'importanza e lo stretto legame tra i profili di velocità e quelli di emissione è opportuno sottolineare quanto segue: la velocità fornita da modelli dinamici di tipo mesoscopico in genere è calcolata come rapporto tra la lunghezza d'arco ed il tempo medio di percorrenza dello stesso. Il tempo medio di percorrenza dell'arco è sostanzialmente dato dalla somma del tempo percorso in coda (eventualmente per attraversare il nodo) ed il tempo di percorrenza della parte di arco non congestionata. Normalmente si fa ricorso all'uso di software; nel presente lavoro di ricerca si è fatto riferimento al software Dynameq fornito dalla INRO. In ogni caso, prescindendo dal software scelto, la velocità media viene data come valore aggregato e si riferisce a quanto appena illustrato. Da un punto di

vista della stima delle emissioni è stato osservato che livelli di congestione elevata portano ad un aumento dei livelli di emissione.

Pertanto in questo modello a due stadi è stato scelto di dividere gli archi in due parti:

- Parte percorsa in condizioni di flusso libero
- Parte percorsa in congestione

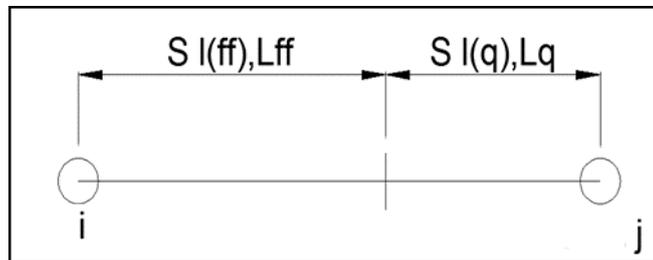


Figura 15. Rappresentazione di un arco (a due stadi)

Alcuni dei risultati forniti dall'assegnazione dinamica per ogni finestra temporale t e utilizzati come dati di ingresso nel post-processore sono riportati di seguito:

1. Velocità media (S_l^t);
2. Velocità a flusso libero ($S_{l(A)}^t$);
3. Velocità in coda ($S_{l(B)}^t$);
4. Lunghezza d'arco (L_{tot});
5. Lunghezza della coda (L_B);
6. Lunghezza d'arco percorsa a velocità libera (L_A).

La velocità media e la lunghezza della coda rappresentano l'output del modulo di assegnazione dinamica, mentre la lunghezza d'arco e la velocità a flusso libero sono valori noti a priori. La lunghezza d'arco percorsa a velocità libera e la velocità media di coda sono ricavabili dalle seguenti espressioni:

$$L_A^t = L_{tot} - L_B^t \quad (5.1)$$

$$S_{l(B)}^t = \frac{L_B^t}{\left[\frac{L_{tot}^t - L_A^t}{S_l^t \cdot S_{l(A)}^t} \right]} \quad (5.2)$$

Una volta definiti i parametri caratteristici delle condizioni di deflusso dei veicoli sulla rete è possibile stimare i valori di emissione.

Per la stima dei valori di emissione si è fatto quindi uso di un post-processore con il quale calcolare le emissioni. La stima è relativa ad ogni arco e a tutte le finestre temporali di analisi.

La stima delle emissioni è data dalla somma algebrica dell'emissione prodotta dai veicoli in coda e di quella prodotta dai veicoli che si muovono a flusso libero sulla rimanente porzione d'arco.

In ogni caso la stima delle emissioni è basata su un approccio tipo "Corinair":

$$E_{i,k,r}^t = M_{k,r}^t \cdot N_k^t \cdot e_{i,k,r} \quad (5.3)$$

dove

$E_{i,k,r}^t$ = emissione dell'inquinante i [g], prodotta nel periodo temporale di riferimento dai veicoli di tecnologia k sul tipo di strada r ;

N_k^t = numero di veicoli [veh] della tecnologia k in movimento nel periodo temporale di riferimento;

$M_{k,r}^t$ = distanza percorsa dal veicolo [km/veh] di tecnologia k sulla strada tipo r ;

$e_{i,k,r}$ = fattore specifico di emissione [g/km] per l'inquinante i , per il veicolo con tecnologia k e su strada di tipo r .

L'equazione (5.3) dovrebbe essere applicata per tutte le tecnologie k circolanti sulla rete e pertanto dovrebbe essere applicata tante volte quante sono le tecnologie circolanti nel parco veicolare di riferimento e per ogni finestra temporale di analisi. Al fine di semplificare la complessità di questa procedura si è deciso di calcolare un'unica funzione di emissione specifica a partire dal parco veicolare circolante sulla rete. In definitiva noto il parco veicolare è possibile stimare un'unica funzione di emissione specifica per ogni inquinante i .

$$e_i = \frac{\sum_k e_{i,k} n_k}{\sum_k n_k} \quad (5.4)$$

dove e_i è il fattore specifico di emissione media mentre n_k è il numero di veicoli di una determinata categoria veicolare appartenente al parco veicolare di riferimento.

Operando questo passaggio è possibile sostituire il numero di veicoli e la distanza percorsa dai veicoli di tecnologia k con i flussi d'arco. In sostanza l'idea è quella di operare un passaggio inverso e dividere il monte chilometri su ogni arco della rete e rappresentarlo come prodotto del flusso d'arco per la lunghezza d'arco.

$$M^t = \sum_l \sum_k q_{l,k}^t \cdot L_{tot} \quad (5.5)$$

$$E_l^t = \sum_k q_k^t \cdot L_{tot} \cdot e_i \quad (5.6)$$

Dove e_i rappresenta il fattore di emissione specifica medio dell'inquinante *iesimo* e riferito alla composizione del parco veicolare.

Utilizzando la formula (5.6) si ipotizza quindi una ripartizione omogenea del parco veicolare sull'intera rete.

Infine è opportuno ricordare che il calcolo è eseguito per ogni finestra temporale e per ogni arco costituente la rete.

In sintesi con questo primo modello (a due stadi) è stato formalizzato il passaggio da un approccio macroscopico ad uno mesoscopico; inoltre è stata anche introdotta la possibilità di stimare le emissioni dei veicoli in coda senza la necessità di applicare un modello di tipo microscopico. E' evidente che si tratta di una stima media, riferita ad una lunghezza di coda media nell'arco temporale di riferimento ed affetta da errore. Tuttavia nonostante le molte semplificazioni introdotte e le conseguenti stime grossolane individuate, si ritiene di aver compiuto un importante passo in avanti nella giusta direzione; infatti è opportuno ricordare che l'interesse primario in tema di inquinamento atmosferico non è quello di calcolare in modo esatto ed estremamente preciso il valore di emissione prodotta da un sistema quanto piuttosto di disporre di strumenti che possano stimare le emissioni con un buon grado di affidabilità e che possano essere facilmente applicati ed utilizzati, permettendo anche la simulazione di eventuali scenari futuri e/o di progetto. In tal senso si ritiene di aver compiuto un buon passo in avanti avendo posto le basi allo sviluppo di uno strumento di supporto alle decisioni (attraverso simulazione) che

possa essere applicato in reti stradali di grandi dimensioni e che possa in qualche misura tenere in conto gli effetti della coda, della variabilità spaziale e temporale della domanda e non ultimo che possa essere aggregato e disaggregato su qualsiasi intervallo temporale.

Dall'altro lato però sono ancora molte le carenze che un modello di questo tipo presenta. La prima su tutte è l'assenza del contributo legato all'accelerazione dei veicoli che come ben noto ha un'incidenza significativa soprattutto in ambito urbano.

La seconda è l'imprecisione nella stima della lunghezza di coda.

5.2 Proposta di un modello a tre stadi (M3)

Partendo dalle carenze del modello a due stadi proposto e alla luce delle considerazioni illustrate al precedente paragrafo è stato proposto un modello a tre stadi.

Questo modello rappresenta un'evoluzione ed una implementazione del modello a due stadi nel quale sono state introdotte alcune novità e miglioramenti. Prima fra tutte l'introduzione di un parte di arco (L_C) nella quale computare le emissioni relative all'accelerazione dei veicoli in corrispondenza del superamento di una intersezione; pertanto ogni arco afferente una intersezione è diviso in tre parti (Figura 16):

- LA: parte di arco in condizioni di flusso libero;
- LB: parte di arco percorsa in coda;
- LC: parte di arco percorsa in accelerazione.

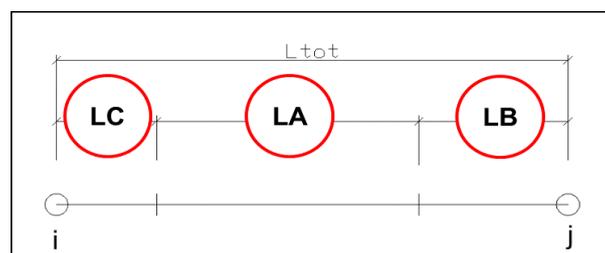


Figura 16. Rappresentazione di un arco stradale

La seconda novità introdotta è lo sviluppo di uno specifico sotto-modello per la stima delle code alle intersezioni semaforizzate con la finalità di migliorare la stima della lunghezza di coda.

Anche per le intersezioni non semaforizzate è stato sviluppato un apposito sotto-modello sempre basato su dati di tipo mesoscopico.

In riferimento alla nuova divisione degli archi afferenti le intersezioni nella quale includere un tratto L_C si è sviluppato un sotto-modello per la stima dei fattori di emissioni specifici in accelerazione (sempre a livello mesoscopico).

Infine, vista l'importanza crescente dei veicoli elettrici ed ibridi nel mercato automobilistico attuale è stato sviluppato un sotto-modello per la stima delle emissioni inquinanti di queste categorie di veicoli.

La stima dell'emissione di un dato inquinante i per un arco l in una data finestra temporale t può essere valutata con l'equazione (5.7):

$$E_{l,i}^t = (q_l^t \cdot L_A^t + Q_{nv,l}^t \cdot L_B^t + Q_{nv,l}^t \cdot L_C^t) \cdot e_{i,a} + (Q_{ns,l}^t \cdot L_B^t) \cdot e_{i,b} + (Q_{ns,l}^t \cdot L_C^t) \cdot e_{i,c} \quad (5.7)$$

con:

q_l^t = flusso medio orario equivalente [veh/h] sull'arco k nel periodo t ;

$Q_{nv,l}^t$ = flusso medio orario equivalente [veh/h] sull'arco k che supera l'intersezione senza alcuna decelerazione (i.e. i veicoli non penalizzati dall'impianto semaforico): è calcolato come prodotto dei veicoli che ad ogni ciclo non sono coinvolti in fasi di stop and go (q_{nv}) per il numero di cicli contenuti nella finestra temporale (dt);

L_A^t = parte di arco percorsa in condizioni di flusso libero;

L_B^t = lunghezza media di coda; è pari a zero per le intersezioni in condizioni sotto-sature;

L_C^t = parte di arco percorsa in accelerazione;

$e_{a,i}$ = fattore di emissione specifica dell'inquinante i calibrato per il tratto d'arco L_A

$Q_{ns,l}^t$ = flusso medio orario equivalente [veic/h] soggetto a fasi di "stop & go" per l'arco k : è calcolato come prodotto dei veicoli che ad ogni ciclo

sono coinvolti in fasi di stop and go (q_{nv}) per il numero di cicli contenuti nella finestra temporale T ;

$e_{b,i}^t$ = fattore di emissione specifica calibrato dell'inquinante i per il tratto d'arco L_B^t ;

$e_{c,i}$ = fattore di emissione specifica dell'inquinante i calibrato per il tratto d'arco L_C^t .

Il primo termine computa l'emissione prodotta dai veicoli che percorrono l'arco in condizioni indisturbate. In condizioni sovra-sature evidentemente questo non è possibile ma negli altri casi esisterà una parte di veicoli che potranno attraversare l'intersezione senza bisogno di rallentare (trovando segnale "verde"). In definitiva nel primo termine è incluso tutto il flusso che percorre L_A al quale è sommato una quota parte (Q_{nv}) che percorre anche i tratti L_B ed L_C in condizioni indisturbate.

Il secondo termine computa le emissioni dei veicoli in coda: solo il flusso Q_{ns} è coinvolto in questo computo

Infine il terzo termine computa le emissioni per i veicoli in accelerazione: anche in questo caso si fa riferimento solo a Q_{ns} .

Per chiarire quanto appena esposto si riporta in Figura 17 il diagramma di marcia tipo considerato per i flussi Q_{ns} (le semplificazioni a livello di diagramma delle traiettorie di marcia dei veicoli a livello spazio-tempo saranno illustrate nei paragrafi seguenti).

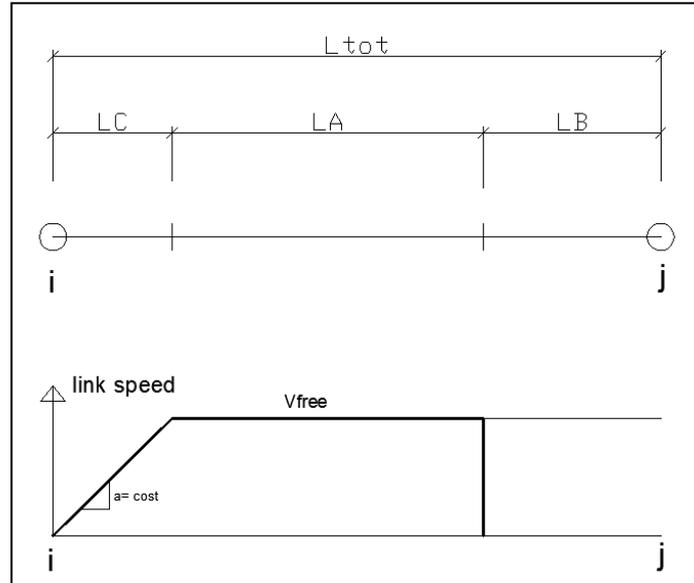


Figura 17. Diagramma tipico per il flusso Q_{ns}

In sintesi dopo aver eseguito un'assegnazione dinamica del traffico è necessario dapprima calcolare L_B^t , poi L_C^t ed infine per differenza calcolare L_A^t .

Il calcolo di L_B^t verrà esposto nei paragrafi seguenti dove si riporta il sotto-modello per la stima delle code alle intersezioni semaforizzate e quello per le intersezioni non semaforizzate.

Il termine L_C^t rappresenta la parte di arco dove i veicoli raggiungono la velocità a flusso libero partendo da zero. Nel caso in cui l'arco è sufficientemente lungo per consentire il raggiungimento della velocità a flusso libero la lunghezza L_C^t può essere calcolata come segue:

$$L_C^t = \frac{S_{ff}^2(v)}{2 \cdot a} \quad (5.8)$$

Altrimenti

$$L_C^t = L_{tot} - L_B^t \quad (5.9)$$

E' importante sottolineare che come in molte altre applicazioni tipiche delle reti di trasporto anche in questo caso gli archi di dimensioni ridotte

hanno la necessità di essere trattati con attenzione. In particolare sia nel caso di archi corti che di lunghezze di coda elevate si ha la possibilità che i veicoli in accelerazione dall'intersezione a monte non riescono a raggiungere la velocità a flusso libero (Figura 18)

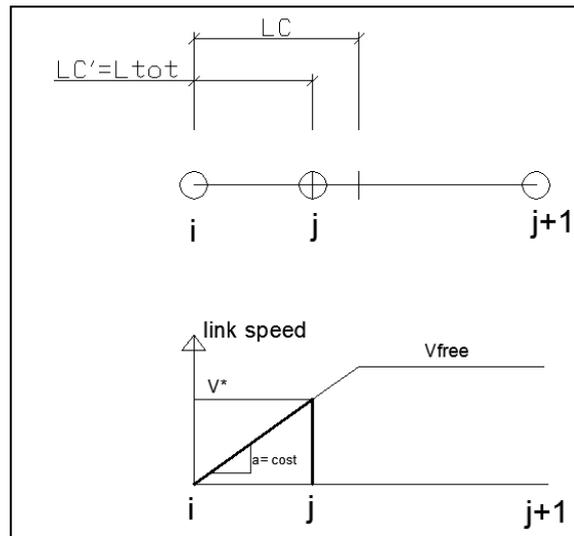


Figura 18. Diagramma di marcia negli archi corti

In questi casi si è quindi spezzata la lunghezza L_C^t in due parti da attribuire rispettivamente all'arco $i-j$ e $j-j+1$ secondo la notazione di Figura 18.

Una volta calcolati i termini L_B^t e L_C^t è possibile calcolare la parte di arco eventualmente percorsa a in condizioni di flusso libero:

$$L_A^t = L_{tot} - L_B^t - L_C^t \quad (5.10)$$

In sostanza tutte le variabile necessarie nell'equazione (5.7), ad eccezione dei fattori di emissione specifica, sono derivate a cascata dai risultati forniti dall'assegnazione dinamica del traffico.

5.2.1 Il sotto-modello per la stima delle code alle intersezioni semaforizzate

Il modello proposto per la stima delle code alle intersezioni semaforizzate è dinamico e di tipo mesoscopico, ovvero considera differenti finestre temporali effettuando un'analisi a livello mesoscopico.

Il modello è di tipo analitico e si fonda sulla teoria di Akcelic (1999) nella quale sono state introdotte opportune modifiche e semplificazioni adattandola al livello mesoscopico; attraverso queste opportune modifiche è quindi possibile analizzare e studiare reti congestionate di grandi dimensioni. I dati di input del modello sono derivati dal modello di assegnazione dinamica del traffico (DTA) in condizioni di equilibrio.

Al fine di poter applicare la teoria di Akcelic in reti di grandi dimensioni e con un approccio di tipo mesoscopico sono state introdotte le seguenti ipotesi semplificative:

- L'accelerazione dei veicoli in uscita da una coda/intersezione è assunta costante;
- La decelerazione è considerata istantanea a favore di un approccio conservativo (poiché l'emissione in fase di crociera e/o accelerazione è sicuramente superiore a quella in fase di decelerazione);
- La lunghezza di coda rappresenta un valore medio all'interno della finestra temporale di riferimento;
- I veicoli commerciali leggeri (LDV) e pesanti (HDV) sono considerati allo stesso tempo attraverso un fattore di equivalenza pari a 2.5 per i veicoli pesanti.

Il calcolo di Q_{nv}^t , Q_{ns}^t e di L_B^t dipende dalle condizioni di deflusso e può essere eseguito per ogni finestra temporale.

In condizioni sotto-sature la domanda è inferiore alla capacità e la coda viene smaltita ad ogni ciclo semaforico (Figura 19). Una parte di veicoli potrà passare l'intersezione senza doverne rallentare né fermarsi, mentre una parte sarà costretta a fermarsi durante la fase di "rosso di lampada" per poi ripartire e superare l'intersezione al primo "verde di lampada".

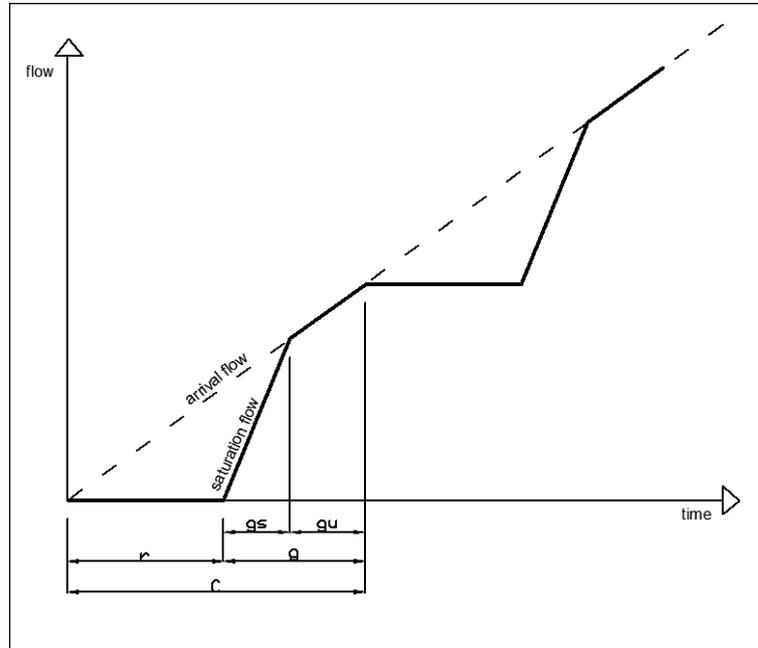


Figura 19. Rappresentazione dei flussi in una intersezione sottosatura

In queste condizioni (sotto-sature) è possibile calcolare i seguenti parametri:

$$Q_{nv,l}^t = \frac{q_{nv}^t \cdot T}{c} = \frac{q_l^t \cdot g}{3600} \quad (5.11)$$

$$Q_{ns,l}^t = \frac{q_{ns,l}^t \cdot T}{c} \quad (5.12)$$

$$q_{ns,l}^t = q_{n,l}^t \cdot \left(G_s^t - t_r - \left(\frac{1 - e^{-m_q(G_s^t - t_r)}}{m_q} \right) \right) \quad (5.13)$$

$$L_B^t = 0 \quad (5.14)$$

con

G_s^t = parte di tempo di verde a flusso di saturazione;

m_q = coefficiente del modello esponenziale di scarico della coda (exponential discharge flow model).

In condizioni sovra-sature la domanda è superiore alla capacità e la coda non viene smaltita ad ogni ciclo semaforico (Figura 20). Nessun veicolo potrà passare l'intersezione senza doverne rallentare o fermarsi, tutti i veicoli saranno costretti a fermarsi durante la fase di "rosso" per poi ripartire e superare l'intersezione dopo n cicli semaforici.

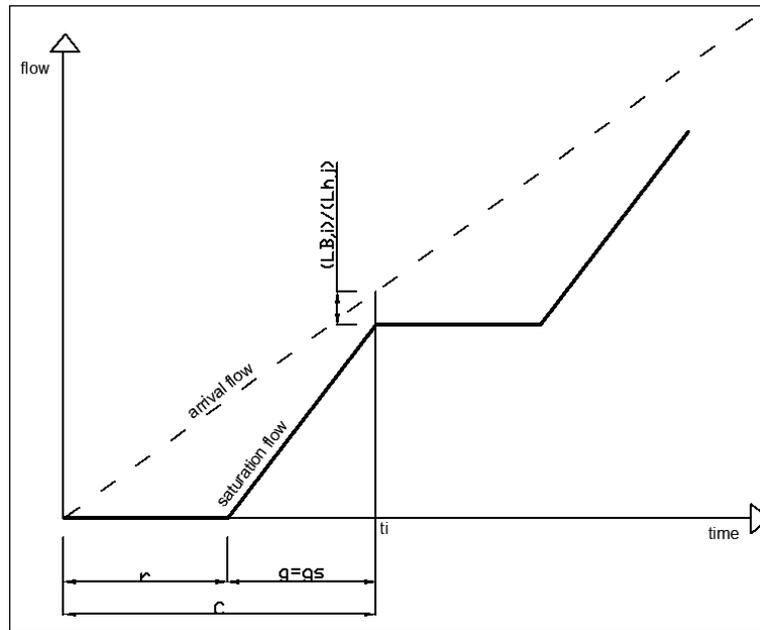


Figura 20. Rappresentazione dei flussi in una intersezione sovra-satura

In queste condizioni (sovra-sature) è possibile calcolare i seguenti parametri:

$$Q_{nv,l}^t = q_{nv,l}^t = 0 \quad (5.15)$$

$$Q_{ns,l}^t = \frac{q_{ns,l}^t \cdot T}{c} \quad (5.16)$$

$$q_{ns,l}^t = q_l^t \quad (5.17)$$

$$L_B^t = \frac{D_l^t}{c} \cdot L_j = [q_l^t \cdot C \cdot \frac{(1-\frac{g}{c})^2}{2 \cdot \frac{q_l^t}{s}}] \cdot L \quad (5.18)$$

con:

D_l^t = ritardo totale per superare l'intersezione percorrendo l'arco l afferente l'intersezione semaforizzata;

L_j = fattore di lunghezza del veicolo (circa $6.5 \div 7$ m)

G^t = tempo di verde per l'arco k , afferente l'intersezione semaforizzata;

s = flusso di saturazione dell'arco k , afferente l'intersezione semaforizzata.

5.2.2 Il sotto-modello per la stima delle code alle intersezioni non semaforizzate

Anche per il calcolo delle emissioni relative alle intersezioni non semaforizzate è stato costruito un approccio di tipo mesoscopico. In particolare partendo dalla teoria e modellistica disponibile a livello microscopico ed adottando opportune semplificazioni è stata proposta una formulazione di tipo mesoscopico.

Nelle intersezioni non semaforizzate la circolazione avviene in funzione del rango delle manovre. In particolare si sono definiti 3 casi distinti:

Caso 1: Intersezioni a 3 braccia (a T)

Caso 2: Immissioni (rampe)

Caso 3: Intersezioni a 4 braccia

Caso 1:

Prima di definire l'approccio mesoscopico utilizzato si riporta di seguito (Figura 21) uno schema sintetico del caso in esame ed una sintesi della trattazione a livello microscopico.

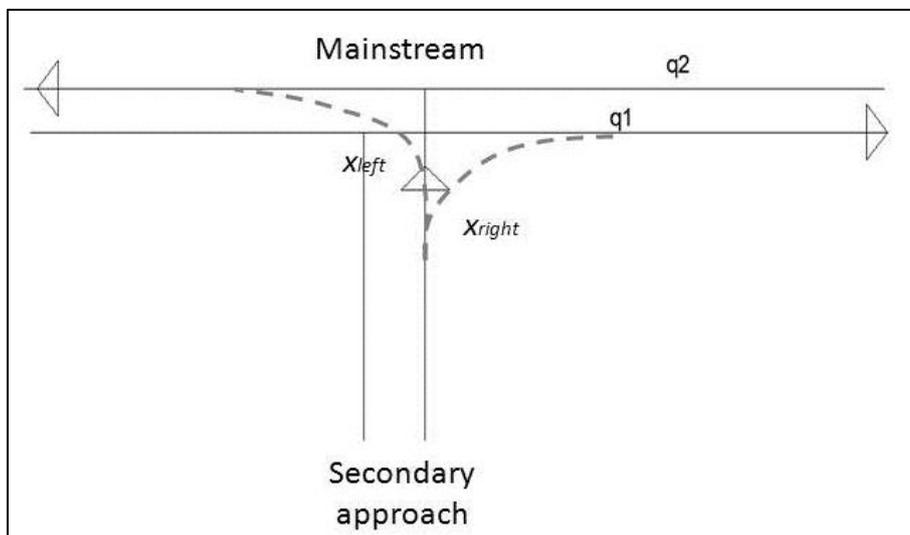


Figura 21. Rappresentazione di una intersezione a tre braccia

Modello microscopico:

In questo caso si considera una strada principale ed una secondaria che si immette con possibilità di svolta a sinistra e destra. Per stimare la coda (e di conseguenza le emissioni) è necessario definire la capacità relativa all'immissione delle manovre della strada secondaria, $c_{p,x}$ oltre che definire un volume di immissione v_x^t per ogni finestra temporale.

La capacità $c_{p,x}$ è condizionata dal flusso sulla strada principale $q_{c,x}$, dal tempo di "follow-up" $t_{f,x}$ e dal "critical gap" $t_{c,x}$.

$$c_{p,x} = q_{c,x} \frac{e^{-q_{c,x} t_{c,x}/3600}}{1 - e^{-q_{c,x} t_{f,x}/3600}} \quad (5.19)$$

Il valore del "critical gap" è dato da:

$$t_{c,x} = t_{c,base} + t_{c,HV} \cdot PHV + t_{c,G} - t_{c,T} - t_{3,LT} \quad (5.20)$$

dove:

$t_{c,base}$ è il gap critico di base fornito da tabella (HCM);

$t_{c,HV}$ è il fattore correttivo per i veicoli pesanti;

PHV è la percentuale di veicoli pesanti;

$t_{c,G}$ è il fattore correttivo per i veicoli pesanti;

$t_{c,T}$ è il fattore correttivo di un two-stage gap-acceptance process
 $t_{3,LT}$ è un fattore correttivo per la geometria dell'intersezione.

La capacità $c_{p,x}$ rappresenta la capacità teorica. Per definire quella reale o effettiva $c_{m,x}$ è necessario correggere la capacità teorica attraverso opportuni coefficienti che tengano in conto le interferenze con i pedoni e con gli altri veicoli.

La coda può quindi essere stimata con la seguente formula (Di Gangi – Mussone, 2010):

$$Q_{95}^t = 900 \cdot T \left[\frac{v_x^t}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x^t}{c_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{3600 \cdot v_x^t}{c_{m,x} \cdot c_{m,x} \cdot 150T}} \right] * \frac{c_{m,x}}{3600} \quad (5.21)$$

La coda Q_{95}^t rappresenta il 95 percentile del numero di veicoli in coda nella finestra temporale t ; la lunghezza della coda è quindi data:

$$L_B^t = Q_{95}^t * L_j \quad (5.22)$$

dove L_j rappresenta la lunghezza media per veicolo.

Dal modello microscopico a quello mesoscopico con DTA:

Per passare al modello mesoscopico con finestre temporali sono state eseguite alcune semplificazioni:

- a) Come prima applicazione si è scelto di considerare la capacità effettiva $c_{m,x}$ pari a quella teorica $c_{p,x}$
- b) Il valore di “critical gap” è stato semplificato alla seguente formula:

$$t_{c,x} = t_{c,base} + t_{c,HV} \cdot PHV \quad (5.23)$$

Il valore di $t_{c,base}$ è stato assunto pari alla media dei valori forniti in letteratura (Di Gangi – Mussone, 2010)

- c) La definizione della corrente principale è definita in base al flusso e non in base alla segnaletica reale presente sull'infrastruttura. La scelta risiede nella necessità di svincolarsi da una conoscenza perfetta e di dettaglio dell'intera rete, che in casi di reti di grandi dimensioni risulterebbe troppo onerosa se non addirittura impossibile. E' stata ipotizzata la corretta progettazione dell'intersezione ovvero che in corrispondenza dell'asse principale ricadono i flussi maggiori.

$$\text{asse principale} = \max \sum_{\forall dt} q \quad (5.24)$$

dove q è il flusso sull'arco i afferente l'intersezione e dt sono gli intervalli temporali della DTA.

Sull'asse principale viene definito un flusso sulla carreggiata 1 (q_1) ed uno sulla carreggiata 2 (q_2)

- d) Il volume nell'asse secondario è stato attribuito in misura pari al 50% a destra e 50% a sinistra. Successivi sviluppi potrebbero considerare una distribuzione gravitazionale dei flussi secondari rispetto all'asse principale.
- e) La lunghezza della coda nell'asse secondario è fornita dalla media della coda relativa alla svolta a sinistra (sx) e di quella a destra (dx):

$$Q_{95}^t = \text{mean} (Q_{95,dx}^t ; Q_{95,sx}^t) \quad (5.25)$$

$$Q_{95,dx}^t = 900 T \left[\frac{v_x^t}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x^t}{c_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{3600 \cdot v_x^t}{c_{m,x} \cdot c_{m,x}}} \right] * \frac{c_{m,x}}{3600} \quad (5.26)$$

dove v_x^t è il 50% del volume sull'asse secondario mentre la capacità $c_{m,x}$ è calcolata considerando solamente il flusso presente sulla prima corsia dell'asse principale.

$$C_{p,x} = \frac{q1}{nl} \frac{e^{-q_{c,x} \cdot t_{c,x}/3600}}{1 - e^{-q_{c,c} \cdot t_{f,x}/3600}} \quad (5.27)$$

dove nl rappresenta il numero di corsie della carreggiata.

$$Q_{95, sx}^t = 900 T \left[\frac{v_x^t}{cm,x} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x^t}{cm,x} - 1\right)^2 + \frac{3600 \cdot v_x^t}{150T \cdot cm,x}} \right] * \frac{cm,x}{3600} \quad (5.28)$$

dove v_x^t è il 50% del volume sull'asse secondario mentre la capacità cm,x è calcolata considerando tutto il flusso della carreggiata 1 e il flusso su una corsia della careggiata 2.

$$C_{p,x} = \left(q1 + \frac{q2}{nl}\right) \frac{e^{-q_{c,x} \cdot t_{cx}/3600}}{1 - e^{-q_{c,c} \cdot t_{fx}/3600}} \quad (5.29)$$

dove nl rappresenta il numero di corsie della carreggiata.

- f) Nel caso di strade principali (o asse principale) con più di 2 corsie per carreggiata il calcolo non viene eseguito e l'intersezione non è considerata a T.

Per calcolare le emissioni si sono poi definiti i seguenti parametri:

$$Q_{ns,l}^t = 0 \quad (5.30)$$

$$Q_{nv,l}^t = q_i^t \quad (5.31)$$

$$L_B^t = Q_{95}^t \cdot L_j \quad (5.32)$$

$$L_A^t = L_{tot}^t - L_B^t - L_C^t \quad (5.33)$$

Mentre il valore di L_C^t è stato calcolato come esposto nei paragrafi precedenti.

L'intera procedura appena esposta può essere ripetuta considerando diverse finestre temporali nelle quali considerare i flussi d'arco forniti dall'assegnazione dinamica del traffico.

Caso 2:

In questo caso un flusso di veicoli si immette in una corrente principale.

Questo caso può essere considerato come una semplificazione del caso 1; in una rampa di immissione esiste il solo flusso d'immissione (da destra) che dall'approccio secondario si immette nella corrente primaria.

La principale differenza che esiste rispetto alle ipotesi fatte per il "caso 1" è che nel caso di immissione si ha una determinata probabilità (p_{free}) di superare l'intersezione senza alcun rallentamento.

La probabilità cambia in funzione delle condizioni di deflusso dell'immissione, ovvero dei rapporti tra il flusso d'immissione e il flusso presente sulla strada principale.

Come per le intersezioni semaforizzate si sono individuate due condizioni:

Sotto-sature

In questo caso il volume di immissione è inferiore alla capacità di immissione:

$$v_x^t < c_{m,x} \quad (5.34)$$

Pertanto una parte di veicoli subiranno rallentamenti (Q_{ns}) altri passeranno indisturbati (Q_{nv}).

$$Q_{nv}^t = v_x^t \cdot p_{free} = v_x^t \cdot \left(1 - \frac{v_x^t}{c_{m,x}}\right) \quad (5.35)$$

$$Q_{ns}^t = v_x^t - Q_{nv}^t \quad (5.36)$$

$$L_B^t = 0 \quad (5.37)$$

Sovra-sature

In questo caso il volume di immissione è superiore alla capacità di immissione:

$$v_x^t \geq c_{m,x} \quad (5.38)$$

Pertanto tutti i veicoli subiranno rallentamenti e la lunghezza media di coda potrà essere stimata ancora come la lunghezza di coda calcolata sul 95 percentile del numero di veicoli in coda nella finestra temporale t .

$$Q_{nv}^t = 0 \quad (5.39)$$

$$Q_{nv}^t = v_x^t \quad (5.40)$$

$$L_B^t = Q_{95}^t \cdot L_j \quad (5.41)$$

Caso 3:

Il caso delle intersezioni a 4 braccia è ancora in fase di studio. Sviluppi futuri potranno concentrarsi su questo caso specifico.

5.2.3 Il sotto- modello per la stima delle emissioni per i veicoli elettrici

Come ben noto i veicoli elettrici non producono alcuna emissione durante il loro funzionamento; tuttavia è opportuno approfondire alcuni aspetti.

Il primo fra tutti riguarda la tecnologia con la quale l'energia elettrica fornita alle batterie a bordo veicolo viene generata. In sostanza si tratta di analizzare l'emissione inquinante legata alla produzione dell'energia elettrica per ricaricare il veicolo e farlo successivamente muovere. E' evidente che in tutti i casi in cui l'energia viene prodotta con tecnologie sostenibili (quali eolica, solare, geotermica, ecc.) non si ha alcuna emissione inquinante in aria viceversa negli altri casi (centrali a carbone, centrali a gas, ecc.). In questi ultimi casi è comunque necessario evidenziare ulteriori due aspetti: il valore d'emissione specifica è

relativamente basso confrontato con quello di un tradizionale motore endotermico; l'emissione è localizzata fuori dai centri urbani (in genere le centrali di produzione elettrica non sono localizzate nei centri abitati) riducendo gli impatti legati alla produzione di emissioni inquinanti (comunque presenti).

Un secondo aspetto riguarda invece l'inquinamento atmosferico legato alle emissioni generate dall'usura dei materiali di consumo presenti su un veicolo; le polveri sottili generate dal consumo delle pastiglie dei freni ne sono un esempio. Visto il modesto contributo alle emissioni di questa particolare sorgente e la disponibilità ridotta di tempo ed emissioni è stato trascurato il contributo così come nel resto della presente ricerca.

Pertanto l'attenzione è stata focalizzata sul calcolo delle emissioni inquinanti legate alla produzione dell'energia elettrica.

Seguendo l'approccio proposto per i motori termici, si è scelto di mantenere la stessa struttura di calcolo aggiungendo opportune variabili specifiche del caso in esame.

L'emissione di un dato inquinante i è stata calcolata per ogni finestra temporale t , a partire dal flusso q_l^t in dato arco l , dal consumo medio di energia ec e dall'emissione specifica e_{spec} legata alla produzione di ogni singolo kwh di potenza oraria.

$$E_{l,i}^t = q_l^t \cdot L_{tot,l} \cdot ec \cdot e_{spec} \quad (5.42)$$

A livello di intera rete il calcolo può essere eseguito considerando la sommatoria di tutti i flussi d'arco e la distanza media di percorso d_{avg}^t per ogni finestra temporale t .

$$E_i^t = d_{avg}^t \cdot ec \cdot e_{spec} \cdot \sum_l q_l^t \quad (5.43)$$

la distanza media di percorso può essere stimata come rapporto tra il monte chilometri M^t e il flusso in uscita dalla rete q_{out}^t .

$$d_{avg}^t = \frac{M^t}{q_{out}^t} \quad (5.44)$$

In tabella 5 si riportano alcuni dati relativi all'autonomia, alla potenza delle batterie e al consumo specifico di alcuni veicoli elettrici.

	Autonomia [km]	Batteria [kWh]	ec [kWh/km]
Smart	135	17	0.129
Opel Ampera	80	16	0.200
Fiat 500e	130	20	0.153

Tabella 5. Caratteristiche di alcuni veicoli elettrici

In tabella si riporta invece il valore di emissione specifica (espresso in grammi) per la produzione di un GJ di potenza elettrica in funzione di diverse tecnologie (EEA - 1.A.1 Energy industries GB2009, 2010). In particolare si sono riportate due tecnologie largamente presenti sul territorio italiano.

combustibile	CO [g/GJ]	NO_x [g/GJ]
Carbone	150	310
Gas naturale	39	89

Tabella 6. Fattori specifici di emissione per le centrali a carbone e a gas naturale

5.2.4 Il sotto-modello per la stima dei fattori di emissione

Nel modello per la stima delle emissioni sia alle intersezioni semaforizzate che quelle non semaforizzate, in riferimento al deflusso dei veicoli sono state definite 3 condizioni tipo:

- 1) Tratto di arco percorso a velocità costante (L_A^t)
- 2) Tratto percorso in coda (L_B^t)
- 3) Tratto percorso in accelerazione (L_C^t)

Ad ognuno di questi tratti (L_A^t , L_B^t e L_C^t) è necessario associare un opportuno valore di emissione specifica. A questo punto si possono adottare (teoricamente) due diversi approcci:

- 1) Prendere i valori specifici di emissione da letteratura (Corinair, studi precedenti, ecc.)
- 2) Calcolare i valore specifici di emissione

Stima del fattore di emissione in accelerazione (fase L_C)

In riferimento al fattore specifico di emissione per la parte L_C il calcolo può essere basato sul metodo proposto da Zhai (Zhai et al. 2008). Si tratta di utilizzare ancora una volta un approccio di tipo microscopico e attraverso opportune semplificazioni ed integrazioni derivare le stesse variabili per un approccio di tipo mesoscopico.

Il metodo propone il calcolo del parametro VSP (Vehicle Specific Power). VSP è espresso in [KW/ton] ed è una funzione della velocità (v), dell'accelerazione (a) e della pendenza della strada (ϕ).

$$VSP = v \cdot (a + 9.81 \cdot \sin(\phi) + 0.092) + 0.00021 \cdot v^3 \quad (5.45)$$

Poi ad ogni VSP è associato un valore di emissione specifica (Tabella 7).

VSP range	VSP mode	Fattori di emission media	
		CO (g/s)	NOx (g/s)
VSP<0	1	0.009	0.04
0 < VSP < 2	2	0.036	0.13
2 < VSP < 4	3	0.045	0.18
4 < VSP < 6	4	0.072	0.22
6 < VSP < 8	5	0.085	0.24
8 < VSP < 10	6	0.091	0.26
10 < VSP < 13	7	0.084	0.28
VSP > 13	8	0.062	0.31

Tabella 7. Valori di emissione specifica in funzione di VSP (EPA)

E' evidente che questo tipo di approccio è di tipo microscopico, ovvero data la velocità e l'accelerazione di ciascun veicolo è possibile calcolare il corrispondente valore di VSP e quindi il valore della CO ed NOx.

Interpolando i dati riportati in tabella 7 è possibile costruire le curve di CO ed NOx in funzione di VSP.

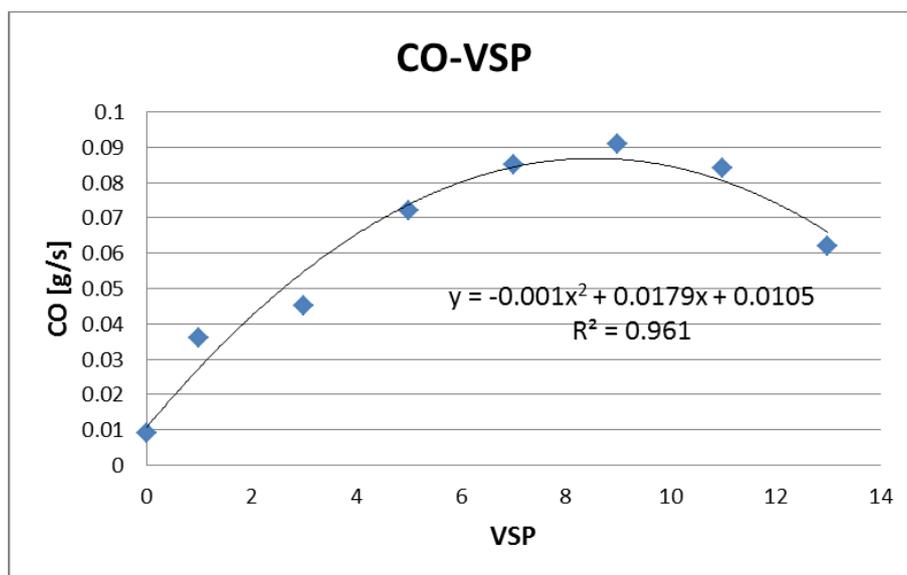


Figura 22. Legge di emissione di NOx in funzione di VSP

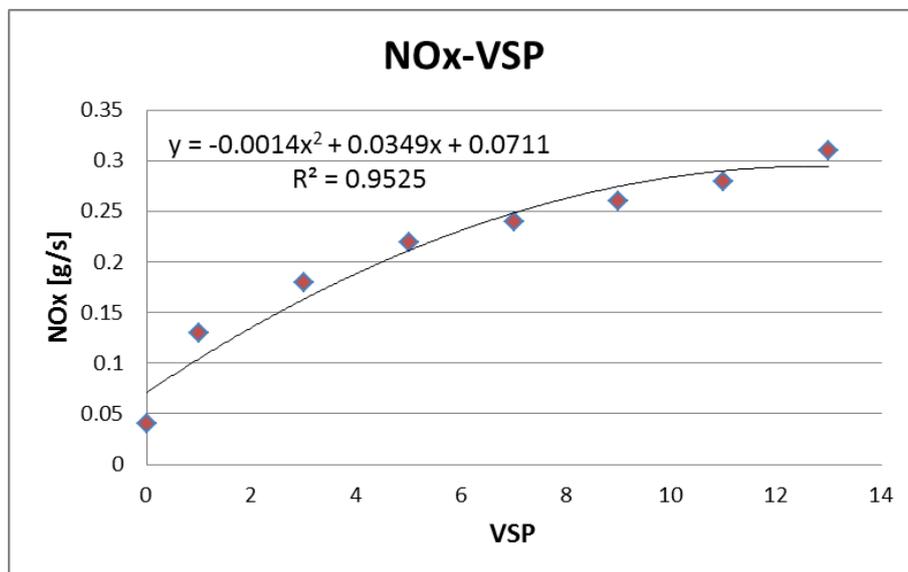


Figura 23. Legge di emissione di NOx in funzione di VSP

Per entrambi i casi è stata scelta una funzione polinomiale di secondo grado che ben approssima i valori di riferimento; i valori del coefficiente di determinazione (R^2) risultano accettabili e pari 0.961 per la CO e 0.952 per l'NOx.

Integrando questi valori nel tempo necessario a percorrere un km ed ottenendo l'emissione specifica a km è possibile passare da un livello microscopico ad uno mesoscopico. Nell'ottica di un approccio mesoscopico bisogna però tenere in considerazione alcuni aspetti:

- a. In un approccio microscopico il valore dell'accelerazione può variare per ogni veicolo. In un approccio mesoscopico possiamo considerare un'accelerazione tipica e/o classi omogenee di veicoli
- b. In un approccio microscopico la distribuzione delle accelerazioni nel tempo può variare da caso a caso (si pensi ad esempio alla differente accelerazione tra il primo veicolo in coda ed uno che si trova al centro della coda coinvolta dall'onda cinematica. Il primo avendo strada libera accelererà sicuramente con valore superiore agli altri.). In un approccio mesoscopico si considera la distribuzione tipo delle accelerazioni.

In base ai punti “a” e “b” sono state definite tre tipologie stradali (in base alla velocità libera raggiungibile):

- V libera \leq 50 km/h
- V libera \leq 60 km/h
- V libera \leq 110 km/h

Successivamente sono state definite due classi veicolari:

- Veicoli leggeri
- Veicoli pesanti

Infine è stato possibile costruire i diagrammi di accelerazione tipo per le tre categorie stradali e per le due classi veicolari (per un totale di 6 tipologie) e si associa ad ognuno di questi un corrispettivo diagramma di VSP e quindi di CO ed NOx.

Nelle Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27 si riportano i diagrammi cinematici (spazio-tempo; velocità-tempo; accelerazione-tempo), il diagramma di VSP ed i diagrammi di CO ed NOx in funzione del tempo.

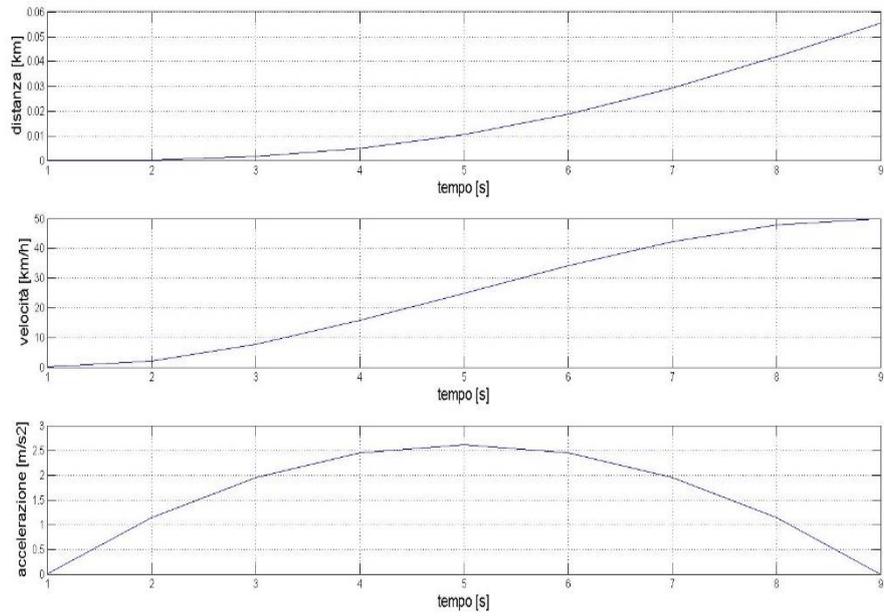


Figura 24. Parametri cinematici. Vlibera ≤ 50 km/h; categoria auto

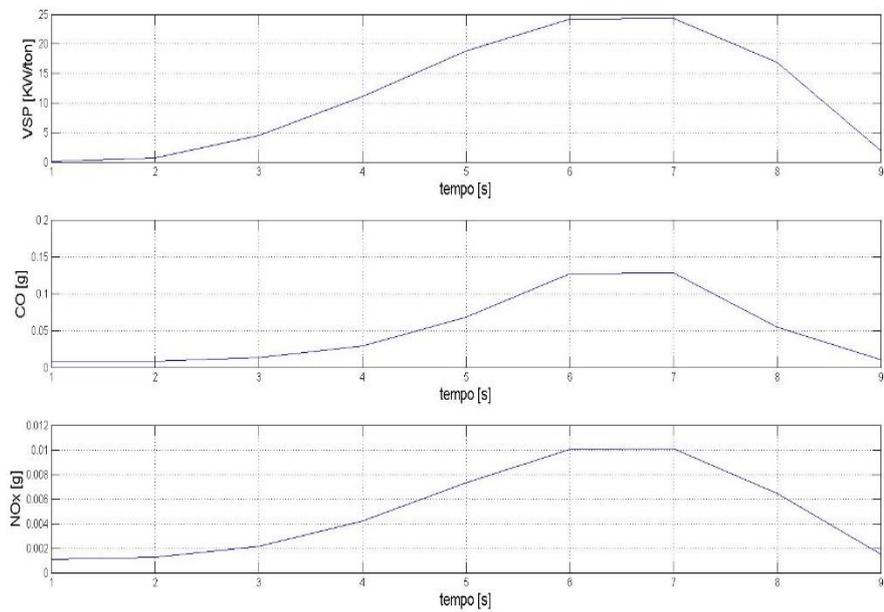


Figura 25. VSP, CO e NOx. Vlibera ≤ 50 km/h; categoria auto

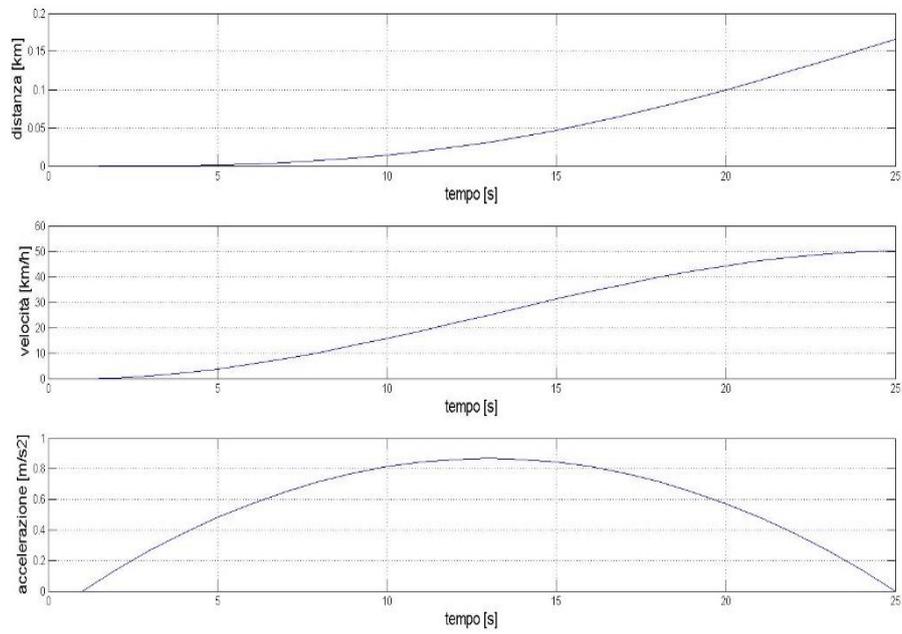


Figura 26. parametri cinematici. Vlibera ≤ 50 km/h; categoria veicoli pesanti

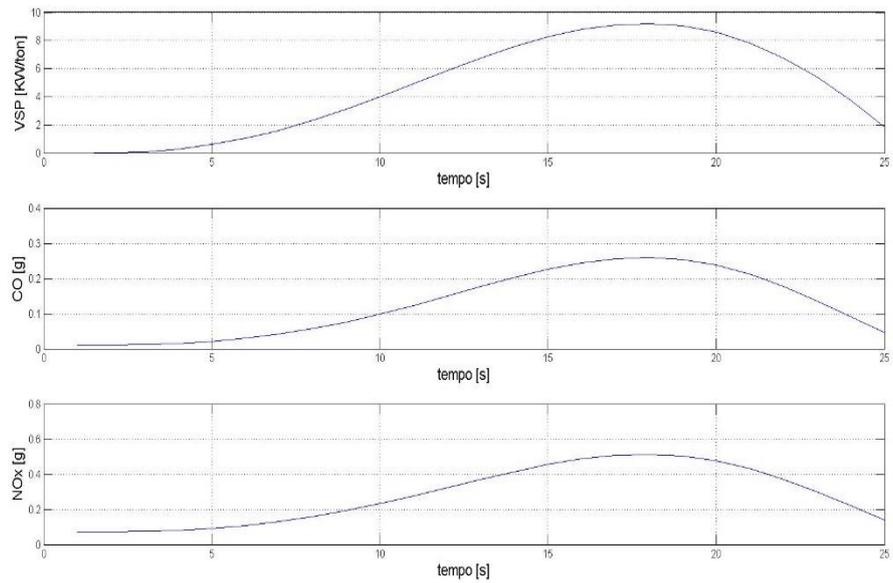


Figura 27. VSP, CO e NOx. Vlibera ≤ 50 km/h; categoria veicoli pesanti

Infine integrando il diagramma delle CO ed NOx e dividendo per l'integrale delle distanze parziali si ottiene il valore di emissione specifica tipico di quella fase (tabella 8).

Tipologia di arco	Veicoli leggeri [g/(km*veicolo)]		Veicoli pesanti [g/(km*veicolo)]	
	CO	NOx	CO	NOx
50km/h	8.03	0.79	19.1	42.1
60km/h	6.38	0.64	16.2	35.5
110km/h	10.3	0.56	14.6	30.2

Tabella 8. valori emissione specifica in accelerazione e_c .

Stima del fattore di emissione in coda (fase LB)

Il fattore di emissione specifica e_b è relativo a L_B^t e pertanto si applica ai veicoli che si muovono all'interno della coda.

In condizioni sotto-sature una quota parte del flusso può superare l'intersezione in condizioni indisturbate (Q_{ns}) mentre una parte è costretta a subire uno stop. In questo ultimo caso i veicoli dopo essersi arrestati possono ripartire e superare l'intersezione al primo verde di lampada. Di conseguenza il fattore e_b in questo caso è pari a zero in quanto la lunghezza media di coda residua è pari a zero e quindi nessun veicolo si muove con fasi di "stop & go" prima di superare l'intersezione.

Nel caso di intersezioni sovra-sature tutti i veicoli sono costretti a fermarsi prima di superare l'intersezione stessa; la lunghezza media di coda è diversa da zero.

Il movimento dei veicoli all'interno della coda (L_B) è caratterizzato da un certo numero di fasi di "stop & go". In queste condizioni l'emissione specifica può aumentare significativamente a causa dell'elevato numero di accelerazioni che tutto il flusso veicolare compie all'interno della coda.

Alla luce di quanto appena esposto al fine di stimare il fattore di emissione specifica e_b si è deciso di correlarlo con il fattore di emissione specifica in accelerazione e_c . In particolare per i veicoli che si spostano all'interno della coda si sono ipotizzate delle traiettorie (diagrammi spazio-tempo) semplificate di tipo trapezoidale e/o triangolare con valori di accelerazione e decelerazioni costanti.

Ad ogni ciclo semaforico la coda avanza per una lunghezza stimata in:

$$dL_B^t = n_{vs}^t \cdot L_j \quad (5.46)$$

dove L_j rappresenta la lunghezza media del veicolo.

Considerando la lunghezza media di coda è possibile stimare il numero di cicli semaforici che un veicolo deve mediamente attendere prima di superare l'intersezione (e quindi una stima del numero medio di "stop & go" all'interno della coda nel periodo di riferimento dt).

$$k^t = \frac{L_B^t}{L \cdot n_{vs}^t} \quad (5.47)$$

$$n_{vs}^t = \frac{s \cdot g^t}{3600} \quad (5.48)$$

dove s rappresenta il flusso di saturazione e g^t il tempo di verde efficace.

Il fattore di emissione e_b può essere stimato come surplus di emissione legato all'accelerazione dei veicoli.

$$e_b^t = \frac{e_c \cdot L_B^t}{0.5 \cdot dL_B^t \cdot k^t} \quad (5.49)$$

Come prima applicazione è stato considerate un diagramma triangolare semplificato nel quale si è assunto lo stesso valore per l'accelerazione e la decelerazione.

In queste condizioni e_b può essere stimato come segue.

$$e_b = \frac{e_c \cdot L_B^t}{2} \quad (5.50)$$

Stima del fattore di emissione per i veicoli a trazione ibrida

La stima del fattore di emissione per i veicoli a trazione ibrida è basata sulle seguenti considerazioni:

- Non c'è emissione durante la fase di accelerazione (fino a 50km/h) e quella di coda;
- è stato considerato un funzionamento del motore ibrido di tipo alternativo a quello termico (ovvero quando è in azione uno l'altro è disalimentato) ed escludendo un funzionamento tandem;
- Per le altre fasi i fattori sono stimati come precedentemente illustrato.

In particolare considerando un profilo di velocità semplificato di tipo lineare (riquadro in alto a sinistra di figura 28) il profilo di emissione specifica di un motore tradizionale termico presenta un massimo in corrispondenza di basse velocità (riquadro in basso a sinistra di figura 28), un motore elettrico ha un valore di emissione pari a zero (riquadro in basso a destra di figura 28) ed infine per un motore ibrido si è considerato un profilo di emissione specifico nullo fino a 50km/h ed un profilo derivato dal motore endotermico per le restanti velocità (riquadro in alto a destra di figura 28).

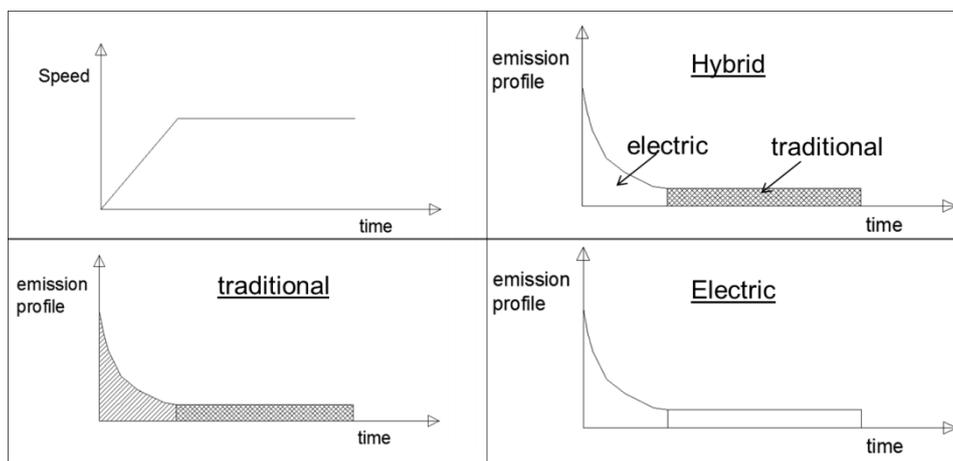


Figura 28. Profili di emissione per differenti tecnologie di trazione

Pertanto si è considerato un fattore di emissione specifica pari a zero per velocità comprese tra zero e 50km/h ed un fattore diverso da zero per le altre velocità.

$$e_{ibrido} = 0 \quad \text{per } v < 50 \text{ km/h} \quad (5.51)$$

$$e_{ibrido} = e_{termico} \quad \text{per } v \geq 50 \text{ km/h} \quad (5.52)$$

In via cautelativa si è assunto che il motore ibrido elimina il surplus di emissione legato alla fase di accelerazione fino a 50km/h. Pertanto l'emissione prodotta da questi veicoli in ambito urbano è stata assunta pari al solo contributo del tratto L_A (parte percorsa in condizioni di deflusso libero).

6 Applicazioni reali

La modellazione proposta è stata applicata nella rete stradale della città di Brindisi e in quella del quartiere Eur di Roma. Le due reti stradali scelte sono molto differenti tra loro sia per estensione che per livello di carico e congestione (code). La finalità di operare una scelta su due reti differenti trova fondamento nella volontà di testare la modellazione proposta in condizioni differenti provando a definire valutazioni quanto più oggettive possibile.

6.1 Modello a due stadi

In una prima fase, il modello a due stadi è stato applicato nella rete stradale urbana della città di Brindisi (Italia). In particolare si è utilizzata questa rete come caso test analizzando i seguenti punti:

- applicabilità della modellazione proposta
- confronto con il modello Corinair
- confronto con i risultati di un'analisi statica
- affidabilità dei risultati

6.1.1 Città di Brindisi

La rete stradale di Brindisi si compone di 43 centroidi, 884 archi e 306 nodi regolari con 14 intersezioni semaforizzate. La rete (Figura 29) copre un'area di circa 20km² e serve una popolazione stimata in 90.000 abitanti.



Figura 29. Rete stradale di Brindisi

Per le 14 intersezioni semaforizzate si sono inseriti i seguenti parametri:

- ciclo semaforico;
- tempo di verde, rosso e giallo;
- offset tra gli impianti semaforici;
- numero di corsie per manovra.

Per quanto riguarda gli altri nodi (intersezioni non semaforizzate) si sono definiti i parametri di “critical gap” e “gap acceptance”, adottando un comportamento dell’utente di tipo stocastico e basato su un diagramma di probabilità decisionale. La rappresentazione dell’offerta è completata con la stima della capacità degli archi.

In particolare si è assunta una rappresentazione del diagramma fondamentale semplificata di tipo triangolare (Figura 10).

I valori caratteristici per la definizione del diagramma sono stati desunti da un precedente studio svolto sulla medesima area (P.O.R. Puglia 2007-20013).

Sempre nel medesimo studio è stata stimata la domanda dell’ora di punta attraverso un modello a quattro stadi. Quindi partendo dal numero di spostamenti nell’ora di punta della mattina (16.000 spostamenti) e dalla

distribuzione oraria della domanda rilevata in contesti urbani simili è stata stimata la domanda sull'intero periodo temporale di simulazione (18 ore).

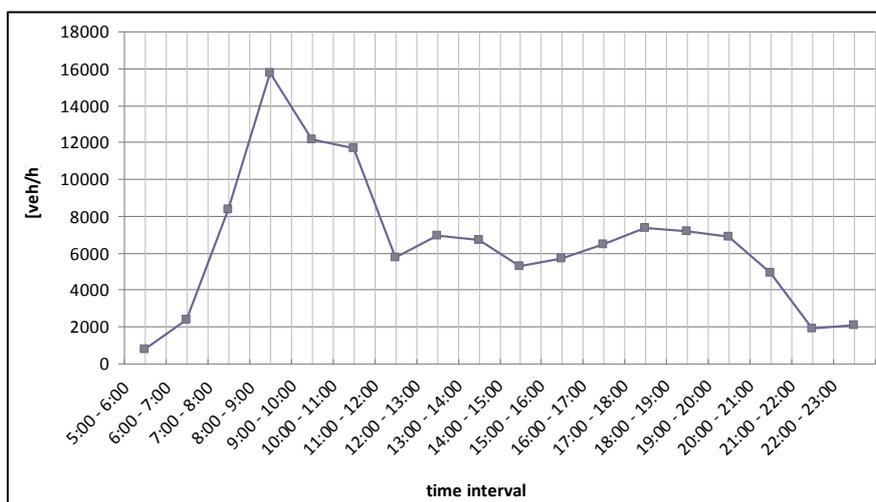


Figura 30. Domanda oraria tra le 05.00 e le 23.00 (Brindisi)

L'assegnazione dinamica è stata eseguita utilizzando il modello mesoscopico con dinamica intra-periodale Dynameq (Florian *et al.*, 2006) e adottando i seguenti parametri:

- 18 ore di simulazione (dalle ore 5 alle ore 23)
- 18 finestre temporali (passo 1 ora)
- 5 alternative di percorso per ogni coppia *od*

I principali dati di output forniti dall'assegnazione dinamica (DTA) ed utili al fine della modellazione proposta sono:

- densità media
- velocità media
- flusso in ingresso
- flusso in uscita
- lunghezza media di coda

Questi valori sono forniti per ogni arco e per tutte le 18 ore di simulazione.

A questo punto è possibile il calcolo della velocità in coda e della lunghezza del tratto percorso in condizioni di deflusso libero.

Al fine di confrontare i risultati finali (in termini di emissioni) forniti dalla modellazione proposta si è deciso di confrontarli con quelli prodotti da Corinair. Pertanto per ogni arco e per ogni finestra temporale si sono definiti due set di output:

- set 1: valori medi d'arco (velocità e flusso) e lunghezza totale dell'arco (modello Corinair);
- set 2: valori divisi per le condizioni di deflusso libero e quelle di deflusso in coda (modello a due stadi).

Per quanto riguarda il post-processore delle emissioni si sono considerate due funzioni per i fattori di emissione:

- funzione discontinua (a salti)
- funzione continua

La funzione a salti è stata stimata a partire da valori puntuali e relativi a determinate velocità. In particolare noto il parco veicolare si è utilizzato il software Copert (Gkatzofglia *et al.*, 2007) per il calcolo dei fattori specifici di emissione relativamente alle velocità di 10, 30, 50, 70, 90, 120 km/h.

La funzione continua è stata definita per interpolazione lineare dei punti ricavati nella funzione discontinua.

Gli inquinanti considerati sono il monossido di carbonio (CO), gli ossidi di azoto (NOx) e le polveri sottili (PM).

In Figura 31, Figura 32, Figura 33 si riportano le funzione di emissione specifica relativamente al parco veicolare di Brindisi.

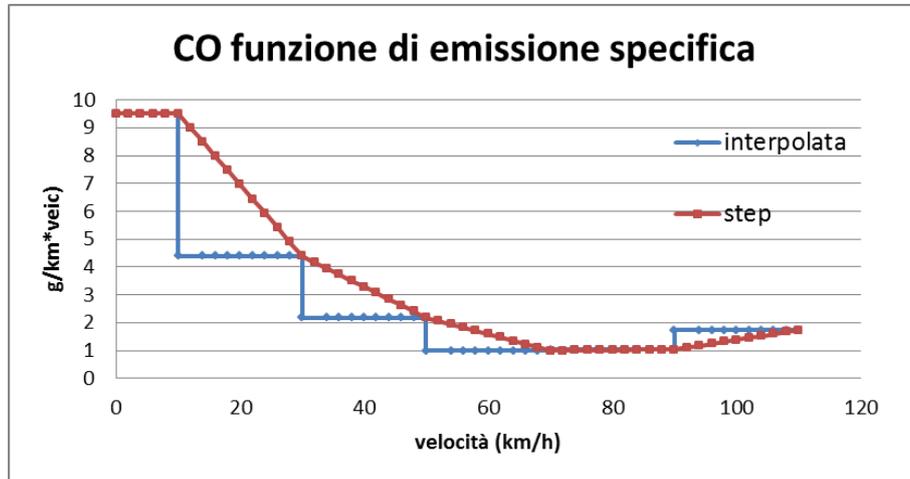


Figura 31. Funzione di emissione specifica di CO (Brindisi)

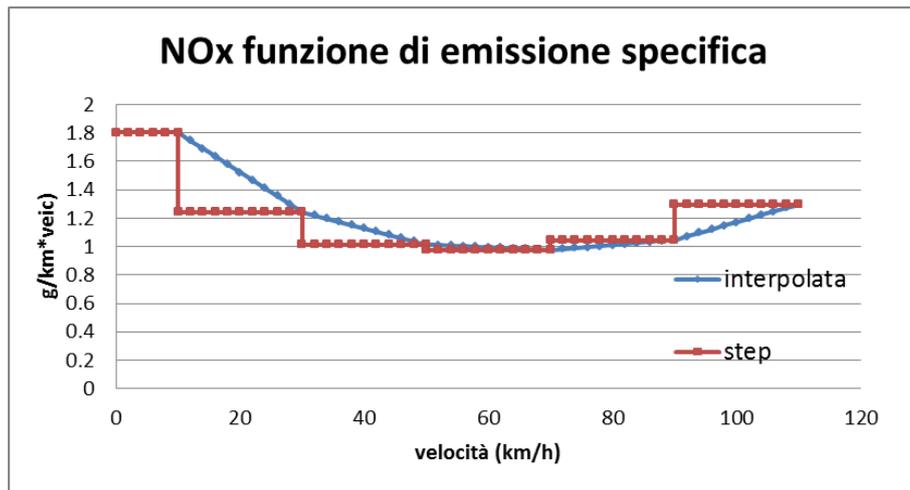


Figura 32. Funzione di emissione specifica di NOx (Brindisi)

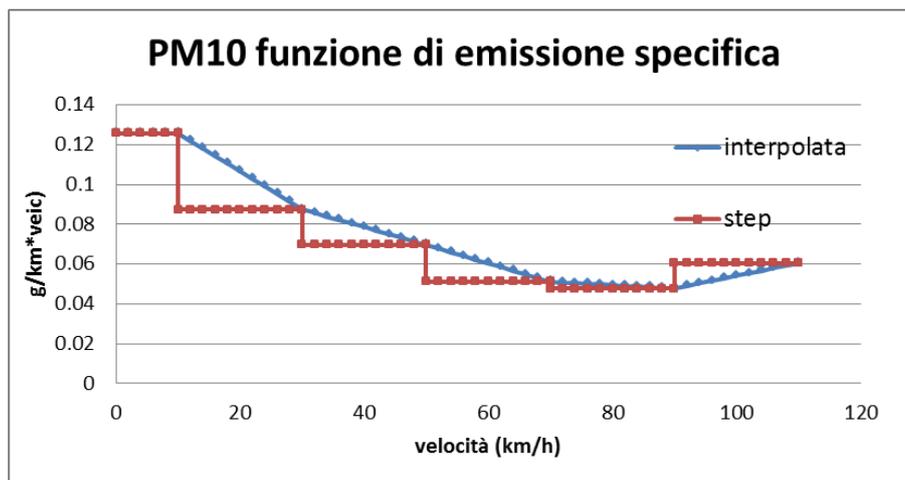


Figura 33. Funzione di emissione specifica di PM (Brindisi)

Infine il periodo di punta della mattina è stato simulato attraverso un simulatore macroscopico di tipo statico con la finalità di eseguire un controllo ed un confronto con i risultati forniti da un'assegnazione statica. In particolare è stato considerato il periodo compreso tra le ore 8 e le ore 11 effettuando un'assegnazione statica (per ogni ora) con il software EMME (INRO, 1989).

In sintesi, in questa prima fase, il modello a due stadi è stato applicato nella rete di Brindisi con la finalità di confrontare i risultati forniti dal modello Corinair (sia con assegnazione dinamica che statica) oltre che testare l'applicabilità e stabilità dell'intera modellazione proposta.

I primi risultati mostrano l'andamento dei profili di emissione di CO, NOx e PM durante le 18 ore di simulazione.

In base ai due set di output sopra definiti e considerando le due tipologie di funzione per i fattori specifici di emissione (discontinua e continua) si sono considerati i seguenti quattro scenari:

- scenario 1: le emissioni sono computate considerando la funzione discontinua per i fattori specifici di emissione ed il set1 per i valori d'arco;
- scenario 2: le emissioni sono computate considerando la funzione continua per i fattori specifici di emissione ed il set1 per i valori d'arco;

- scenario 3: le emissioni sono computate considerando la funzione discontinua per i fattori specifici di emissione ed il set2 per i valori d'arco;
- scenario 4: le emissioni sono computate considerando la funzione continua per i fattori specifici di emissione ed il set2 per i valori d'arco;

Durante le 18 ore di simulazione sono stati stimati valori media pari a 70.8 kg di CO, 36.6 di NOx e 2.2 di PM10. Lo scenario 2 fornisce le stime maggiori con valori massimi (nell'ora di punta) pari a 182.2 kg di CO, 84.8 di NOx e 5.1 di PM10.

Adottando il set1 (valori medi sull'arco) e la funzione discontinua (a salti) al posto della funzione continua (scenario 1 – scenario 2) è possibile ottenere una sottostima fino a -18% di CO, -3% di NOx e -5% di PM10: il risultato trovato dimostra l'importanza delle funzioni di emissione specifica e della conseguente necessità di una opportuna calibrazione delle stesse. Utilizzando il più accurato set2 è possibile dimezzare la sottostima (scenario 3 - scenario 4).

Considerando la sola funzione discontinua è possibile osservare le differenze, seppur ridotte, tra l'utilizzo del set1 e del set2. In particolare utilizzando il set2 al posto del set1 (scenario 3 - scenario 1) è possibile ottenere una sottostima di -15% per la CO, 3% per l'NOx e -4% per il PM10.

Considerando la funzione continua per i fattori specifici di emissione (scenario 3 - scenario 1) le differenze raggiungono -23% per la CO, -5% per l'NOx e -7% per il PM10.

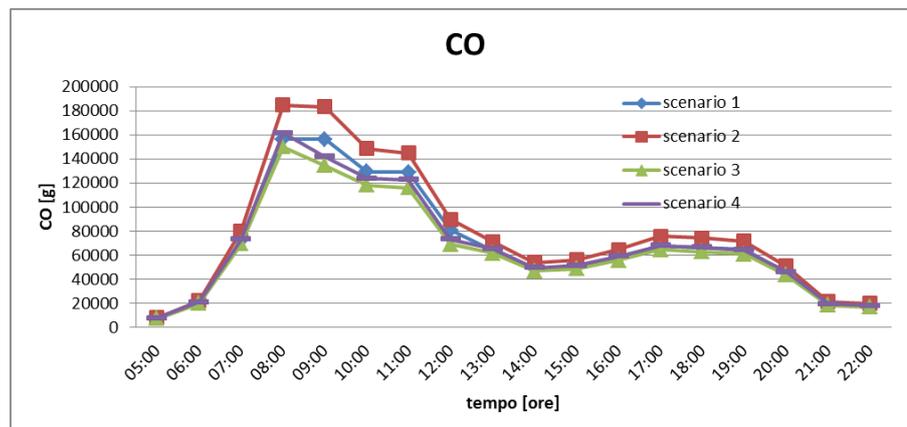


Figura 34. Stima emissione oraria di CO con il modello a due stadi (Brindisi)

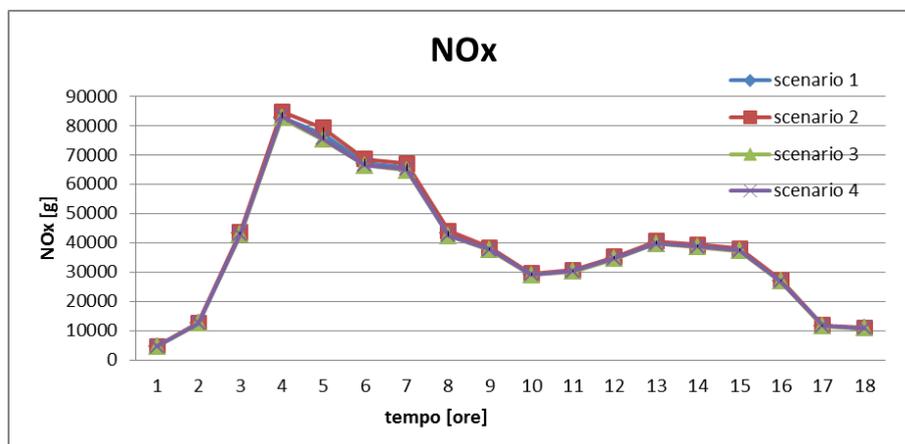


Figura 35. Stima emissione oraria di NOx con il modello a due stadi (Brindisi)

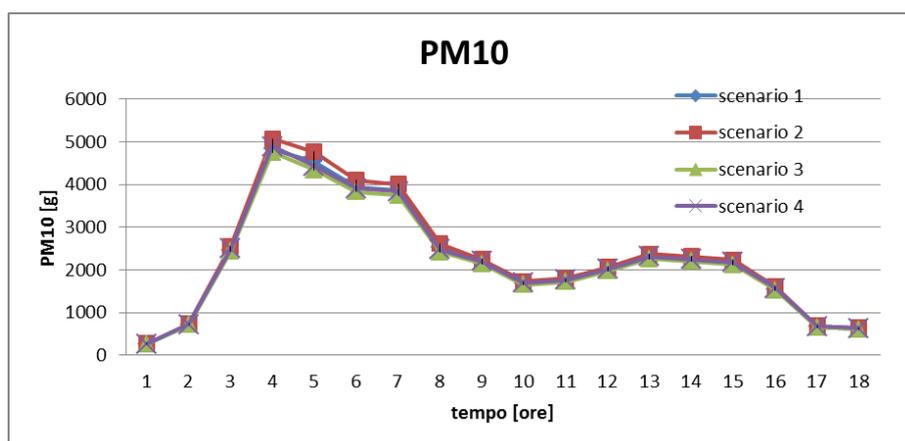


Figura 36. Stima emissione oraria di PM10 con il modello a due stadi (Brindisi)

I risultati appena trovati evidenziano alcuni risultati inaspettati. Primo fra tutti è la sottostima fornita dall'utilizzo del set2 nel quale sono state considerate esplicitamente le condizioni di congestione.

Dall'altro lato sorprende la sovrastima fornita dall'utilizzo della funzione a salti al posto della funzione continua la quale è stata ricavata per interpolazione (superiore) dei punti noti della funzione a salti.

In particolare analizzando con più attenzione il risultato trovato si può affermare che la sovrastima o la sottostima dipende sia dalle condizioni di

deflusso sulla rete che dal trend della funzione di emissione; la curva di emissione della CO presenta una variabilità sicuramente molto più elevata di quella della NOx e del PM10.

Al fine di comprendere le motivazioni che hanno portato alla sottostima delle emissioni utilizzando il set2 è stata eseguita un'analisi di dettaglio a livello di singolo arco.

Considerando un arco l di lunghezza $L_{tot,l}$ sul quale insiste un flusso q_l è possibile definire la seguente disequazione:

$$e_{m,i} \cdot L_{tot,l} > (e_{a,i} \cdot L_A^t + e_{b,i} \cdot L_B^t) \quad (6.1)$$

Dove $e_{m,i}$ rappresenta il fattore medio di emissione specifica dell'inquinante *iesimo*.

La disequazione 61 può essere riscritta nella forma:

$$B > \alpha \cdot A \quad \text{con } 0 < \alpha \leq 1 \quad (6.2)$$

con

$$B = e_{m,i} - e_{a,i} \quad (6.3)$$

$$A = e_{b,i} - e_{a,i} \quad (6.4)$$

$$\alpha = \frac{L_B^t}{L_{tot,l}} \quad (6.5)$$

In caso di archi urbani con velocità inferiori a 60km/h (circa) i relativi valori di emissione specifica si trovano nella parte sinistra delle medesime funzioni.

La variabile A rappresenta la differenza tra il valore di emissione specifica tra le condizioni di coda e quelle di deflusso libero; la variabile B rappresenta la differenza tra il valore medio di emissione specifica (relativo alla velocità media) e quello in condizioni di deflusso libero (relativo alla velocità libera); infine α rappresenta la percentuale di lunghezza di coda rispetto la lunghezza totale dell'arco.

In Figura 37 si riporta la rappresentazione grafica di quanto appena illustrato.

Osservando la disequazione (6.2) nel caso in cui $\alpha = 1$ (arco completamente congestionato), A è uguale a B le emissioni compute con il set2 coincidono con quelle del set1.

Per $\alpha \sim 0$ (arco quasi non congestionato), sebbene il valore di B può ridursi, il valore αA risulta generalmente minore di B e le emissioni stimate con il set1 risultano superiori a quelle estimate con il set2.

Per valori intermedi di α la sovrastima o la sottostima nell'utilizzo del set2 al posto del1 non è nota a priori ed è strettamente legata alla forma e al valore della derivata prima delle funzioni di emissione specifica.

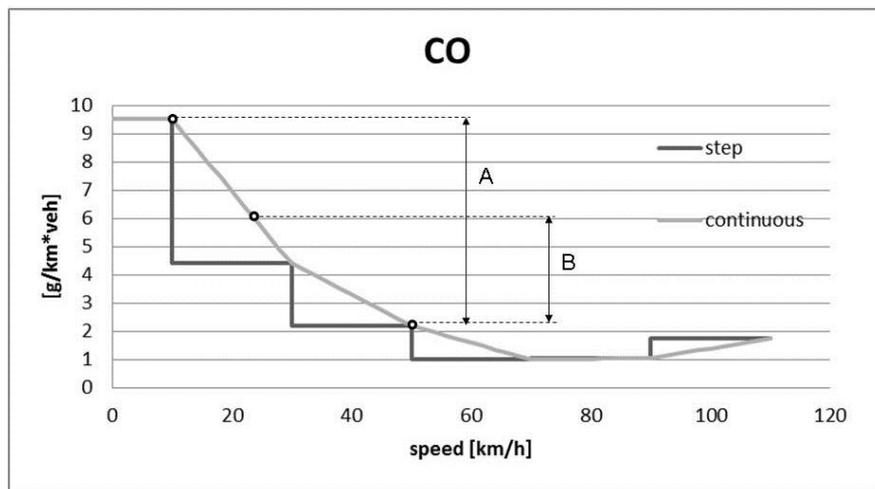


Figura 37. Ruolo della funzione specifica di emissione nella stima delle emissioni

I valori di A , B ed αA relativi alle strade urbane della rete di Brindisi caratterizzate da valori di $\alpha > 0$ (i.e. con formazione di coda) sono riportati in Figura 38; come atteso B è generalmente maggiore di αA .

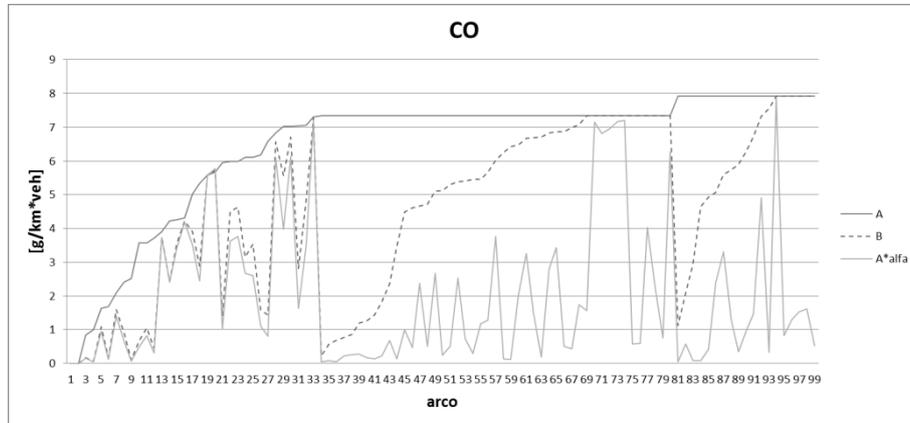


Figura 38. valori di A, B ed αA per le strade urbane della rete di Brindisi (valori relativi alla CO nell'ora di punta 8.00-9.00 con l'utilizzo della funzione continua)

Il secondo passo dello studio è il confronto tra i risultati trovati precedentemente con l'applicazione di un approccio mesoscopico dinamico (modello a due stadi) e i risultati forniti dall'utilizzo di un approccio macroscopico.

Pertanto è stata eseguita un'assegnazione statica di tipo macroscopico; nello specifico, come peraltro già precedentemente anticipato, è stato utilizzato il software EMME [Inro] per assegnare la domanda dell'ora di punta (8.00-11.00). Sono state effettuate tre assegnazioni differenti ed ognuna relativa ad una finestra temporale di un'ora (domanda di un ora; tra le 8.00 e le 9.00; tra le 9.00 e le 10.00 e tra le 10.00 e le 11.00).

Dopo aver calcolato i parametri d'arco di tipo macroscopico, quali velocità media, densità media e flusso sono state considerate entrambe le funzioni di emissione specifica (continua e discontinua).

Infine i risultati trovati in termini di CO, NO_x e PM sono stati confrontati con quelli precedentemente calcolati con il modello a due stadi nello scenario 1 e nello scenario 2 (Figura 39, Figura 40, Figura 41).

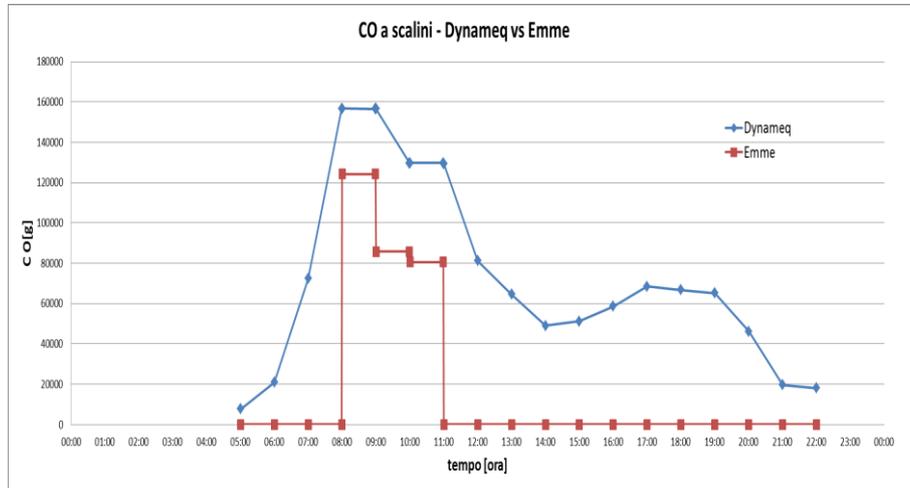


Figura 39. Profili di emissione orari scenario 1 (CO); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico

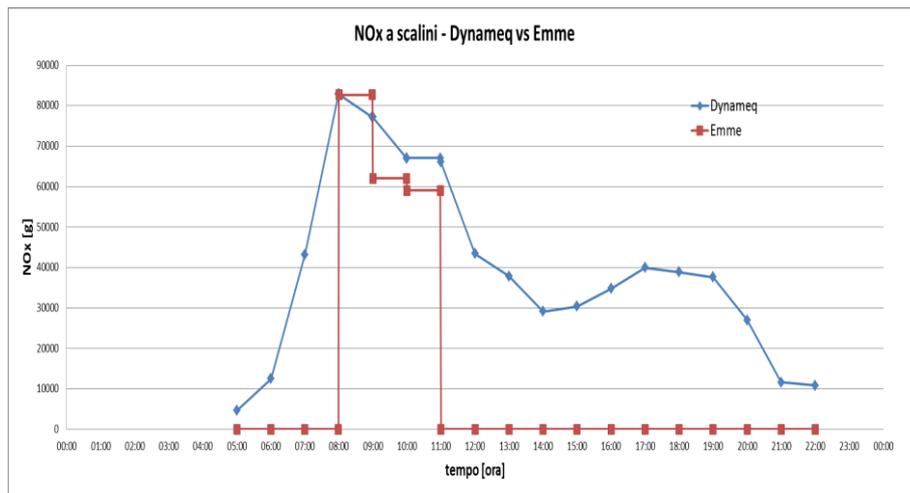


Figura 40. Profili di emissione orari scenario 1 (NOx); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico

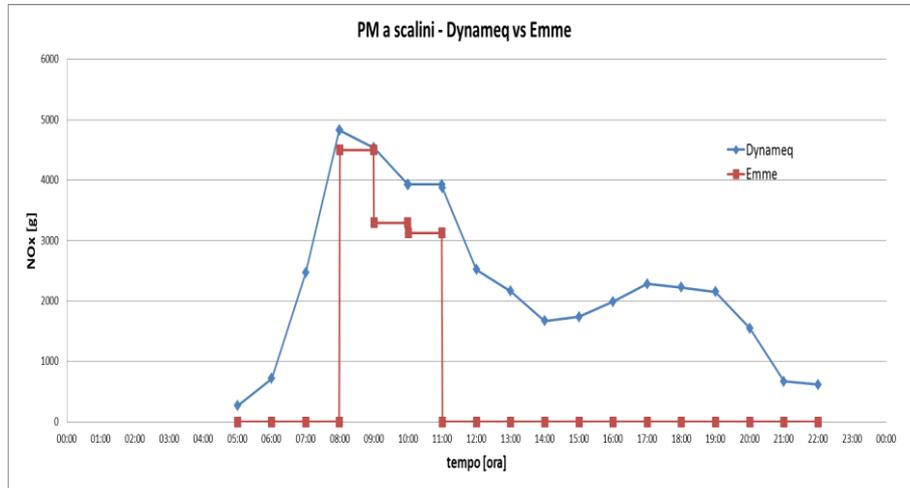


Figura 41. Profili di emissione orari scenario 1 (PM); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico

Nella rete di Brindisi i risultati illustrati mostrano che generalmente l'approccio mesoscopico dinamico (modello a due stadi) sovrastima le emissioni rispetto quello macroscopico.

Così come nel caso precedente (studio dei quattro scenari distinti in base al set1 e set2) anche in questo le maggiori differenze si riscontrano nel caso della CO: nel caso di utilizzo di una funzione di emissione specifica di tipo discontinuo il modello a due stadi può fornire una sovrastima anche del 60% rispetto al valore di un approccio macroscopico. Soltanto nel caso della NOx e durante l'ora di punta tra le 8.00 e le 9.00 il modello macroscopico fornisce una sovrastima (del 6.6%) delle emissioni.

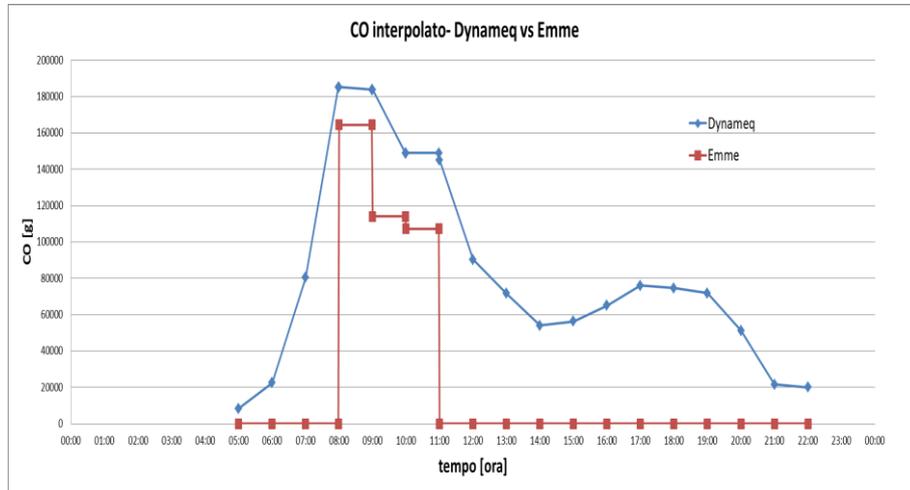


Figura 42. Profili di emissione orari scenario 2 (CO); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico

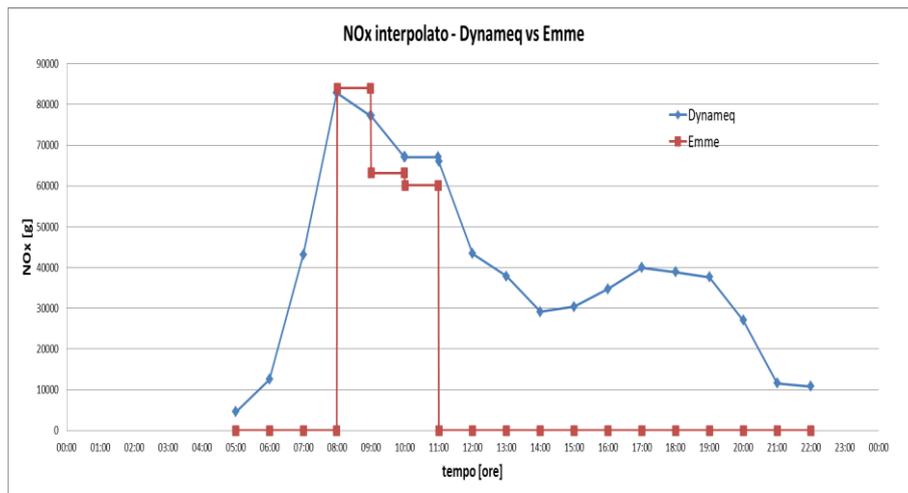


Figura 43. Profili di emissione orari scenario 2 (NOx); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico

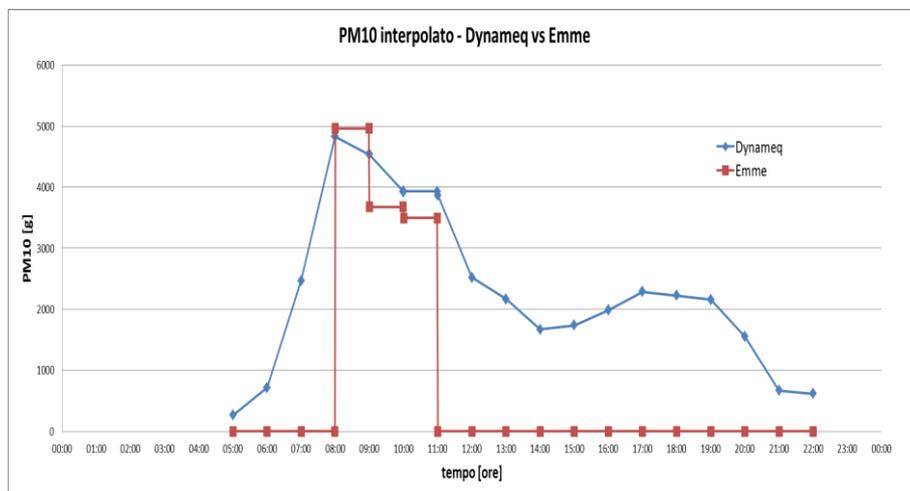


Figura 44. Profili di emissione orari scenario 2 (PM); confronto tra i risultati forniti dal modello a due stadi e da un approccio macroscopico statico

Con l'utilizzo di una funzione continua per i fattori specifici di emissione in termini di CO la sovrastima del modello a due stadi persiste anche se le differenze si riducono notevolmente passando da 61% a 35% mentre si ha un'inversione di tendenza per il PM passando da una sovrastima ad una sottostima utilizzando un modello mesoscopico dinamico (Tabella 9, Tabella 10)

funzione a step (s1)				
	08:00	09:00	10:00	11:00
CO				
emme	124218	124218	85766	80481
dynameq	156714	156518	129766	129311
	26.2%	26.0%	51.3%	60.7%
Nox				
emme	82638	82638	62007	59020
dynameq	82816	77175	67068	65990
	0.2%	-6.6%	8.2%	11.8%
PM10				
emme	4499	4499	3296	3129
dynameq	4827	4536	3928	3869
	7.3%	0.8%	19.1%	23.6%

Tabella 9. Confronto tra l'approccio macroscopico (Emme) e quello mesoscopico Dynameq nell'ora di punta (8.00-11.00); funzione di emissione discontinua

funzione continua (s2)				
	08:00	09:00	10:00	11:00
CO				
emme	164316	164316	113955	107177
dynameq	185170	183713	148900	145071
	12.7%	11.8%	30.7%	35.4%
Nox				
emme	83989	83989	63192	60167
dynameq	84794	79214	68578	67146
	1.0%	-5.7%	8.5%	11.6%
PM10				
emme	4963	4963	3676	3497
dynameq	5067	4757	4094	4011
	2.1%	-4.1%	11.4%	14.7%

Tabella 10. Confronto tra l'approccio macroscopico (Emme) e quello mesoscopico Dynameq nell'ora di punta (8.00-11.00); funzione di emissione continua

Come già precedentemente riscontrato i risultati sono strettamente legati alle condizioni di deflusso sulla rete (congestione), ovvero al modello di assegnazione scelto oltre che al trend delle funzioni specifiche di emissione. Pertanto anche in questa secondo studio tra un approccio macroscopico ed uno mesoscopico la sovrastima o la sottostima è ancora legata alle medesime assunzioni.

In caso di archi molto congestionati le velocità stimate dal modello mesoscopico dinamico e da quello statico risultano molto simili mentre i valori di flusso sono generalmente sovrastimati dal modello statico: in questi casi le emissioni stimate da un modello macroscopico statico sono generalmente superiori di quelle fornite da un modello mesoscopico.

Viceversa, nei casi di archi poco congestionati la stima dei flussi risulta molto simile per entrambi modelli mentre la stima delle velocità fornita da dynameq (mesoscopico) è generalmente superiore di quella fornita da Emme (macroscopico) in quanto l'adozione di un diagramma fondamentale triangolare semplificato assume la velocità pari a quella a deflusso libero fino alla capacità (vertice superiore del triangolo dove $q=C$); in questi casi un il modello mesoscopico fornisce una stima superiore al modello macroscopico se gli archi in oggetto hanno velocità di deflusso libero elevate (superiori a 50-60 km/h che rappresenta il punto di minimo della funzione di emissione specifica); viceversa per gli archi

rappresentativi di strade locali (con basse velocità di deflusso libero). Infatti nel primo caso una stima più elevata delle velocità porta ad un valore di emissione specifica superiore (lato destro della funzione specifica con derivata prima positiva, ovvero funzione crescente); nel secondo caso porta ad un valore di emissione specifica inferiore (lato sinistro della funzione; con derivata negativa ovvero decrescente).

Per meglio comprendere quanto appena illustrato si riporta un caso test relativo alla rete di Brindisi. In particolare sono stati estrapolati i soli archi con velocità superiori a 60km/h (archi rappresentativi la superstrada SS379 con velocità a deflusso libero pari a 110 km/h) e si sono confrontati i risultati forniti dal modello macroscopico statico con quelli del modello a due stadi. Gli archi 2 ed 8 sono caratterizzati da valori simili di velocità stimati dai due modelli ma da stime di valori di flusso differenti; il modello macroscopico fornisce valori più elevati e pertanto anche le corrispondenti stime di emissione risultano superiori di quelle proposte dal modello mesoscopico.

Viceversa negli archi 39 e 42 dove le stime dei flussi sono simili ma le velocità stimate dal modello mesoscopico sono superiori e pertanto anche le emissioni risultano maggiori di quelle stimate dal modello macroscopico.

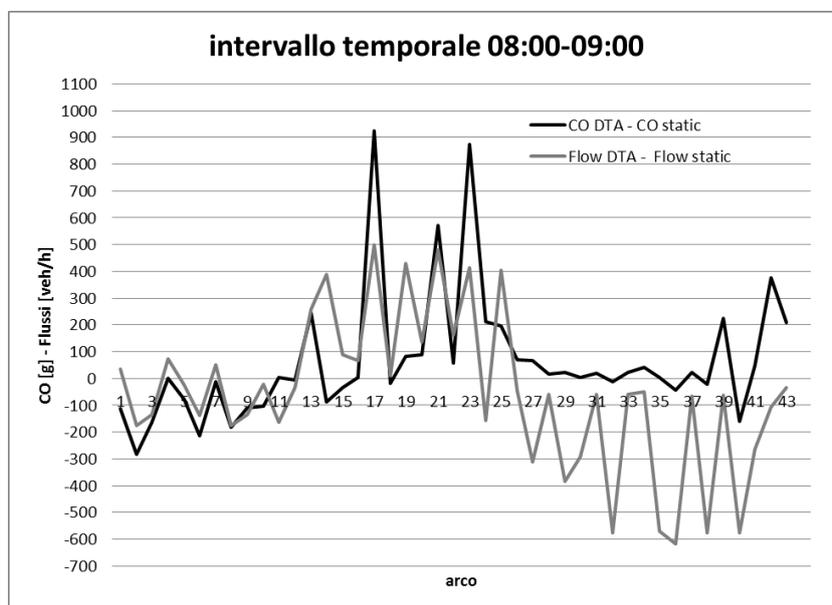


Figura 45. Variazione dei flussi e delle emissioni di CO tra un approccio dinamico ed uno statico per un set di archi della rete di Brindisi (superstrada 379)

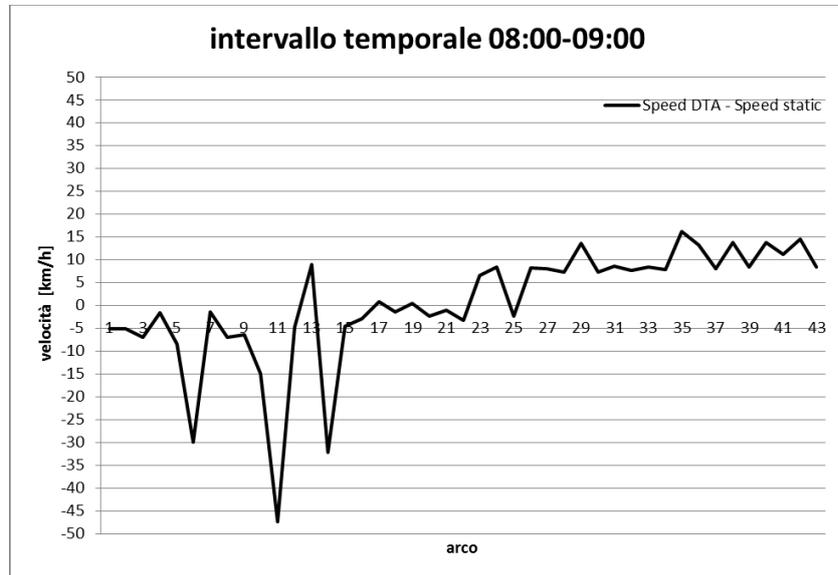


Figura 46. Variazione delle velocità tra un approccio dinamico ed uno statico in termini per un set di archi della rete di Brindisi (superstrada 379)

6.1.2 Città di Roma (quartiere Eur)

Una seconda applicazione del modello è stata testata sulla rete stradale del quartiere dell'Eur a Roma. La rete (Figura 47) si compone di 21 centroidi, 218 archi e 64 nodi di cui 17 costituiscono intersezioni semaforizzate.

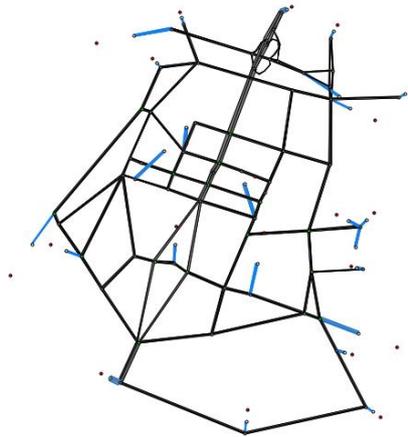


Figura 47. La rete stradale dell'Eur

L'analisi della rete è riferita alle ore di punta della mattina; la domanda è stata considerata tra le 07.00 e le 10.00 attraverso 4 intervalli temporali (orari). La domanda nell'ora di punta è stimata in circa 30.000 veicoli (Tabella 11).

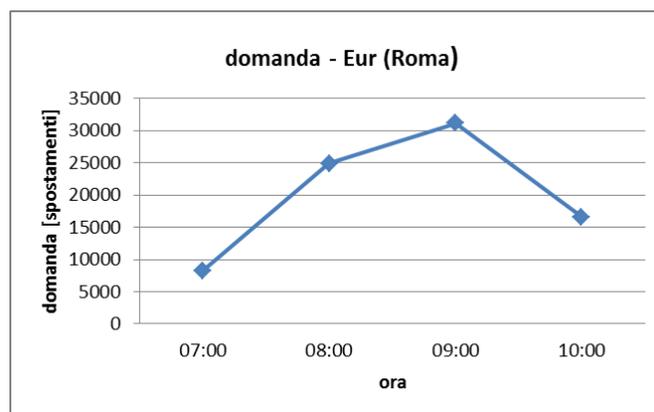


Tabella 11. Domanda nella rete dell'Eur (Roma)

La distribuzione spaziale della domanda è riportata in Figura 48 dove è anche possibile osservare una forte componente di attraversamento sull'asse nord-sud (Via Cristoforo Colombo).

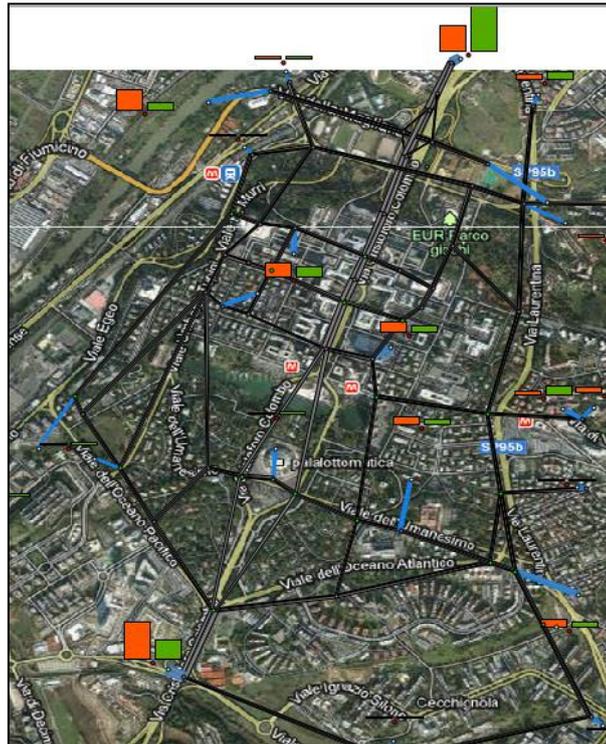


Figura 48. Distribuzione della domanda nella rete dell'Eur.

L'assegnazione è stata effettuata ancora una volta con il software Dynameq (Florian *et al.*, 2006) e adottando i seguenti parametri:

- 8 ore di simulazione (1 ora per il caricamento della rete, 3 ore di domanda della mattina e le restanti ore per lo scarico della rete).
- 16 finestre temporali per le 4 ore di domanda (3+1); passo delle finestre temporali pari a 15minuti.
- 5 alternative di percorso per ogni coppia o-d

I flussi stimati sono forniti in veicoli equivalenti, ovvero flussi orari (anche se riferiti ad una finestra temporale di 15 minuti). Mantenendo

questa impostazione anche le emissioni sono fornite in valori equivalenti nell'ora.

Come per l'applicazione nella rete di Brindisi anche in questo caso sono state stimate le emissioni di monossido di carbonio (CO), degli ossidi di azoto (NOx) e delle polveri sottili (PM10).

Il parco veicolare circolante è stato desunto dalle pubblicazioni ACI disponibili sul web (<http://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/open-data.html>).

In accordo ai precedenti capitoli, le funzioni di emissione specifica e_a (Figura 49, Figura 50, Figura 51) per i tre inquinanti (relativamente alla parte percorsa in condizioni di deflusso libero) sono state calcolate a partire dal parco veicolare circolante e dai valori puntuali forniti da Copert (Corinair).

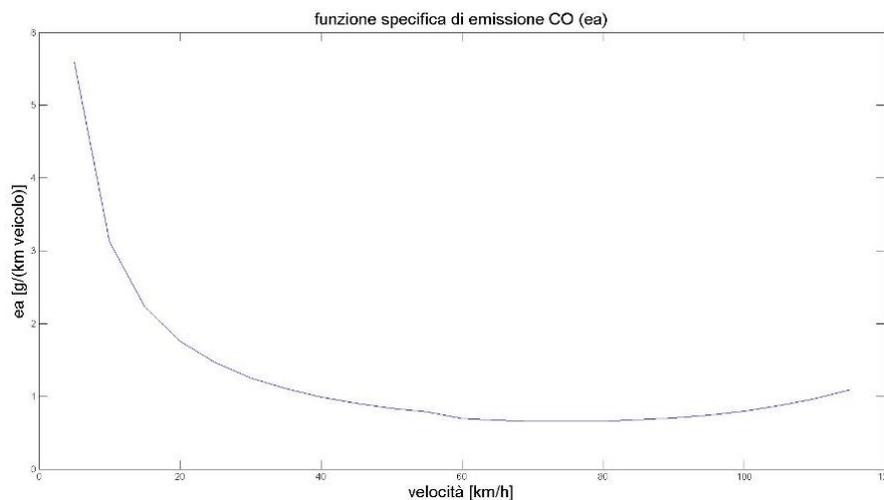


Figura 49. Funzione specifica di emissione di CO (Eur, Roma)

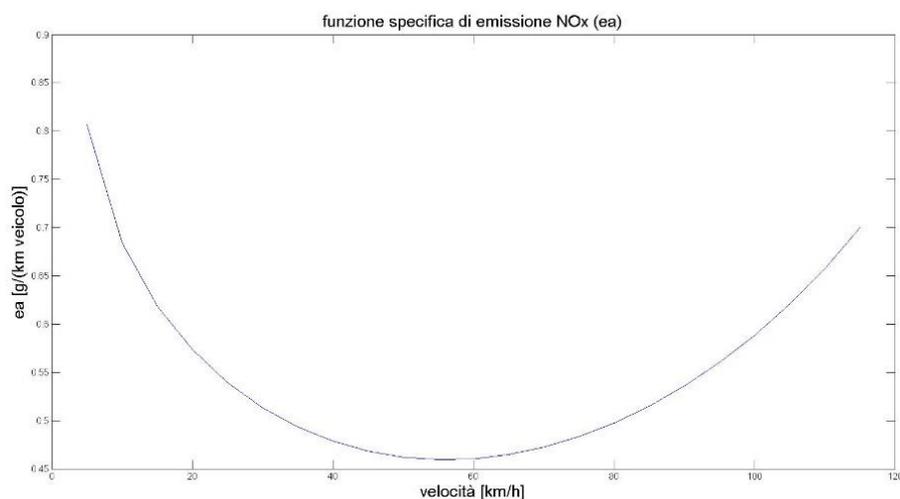


Figura 50. Funzione specifica di emissione di NOx (Eur, Roma)

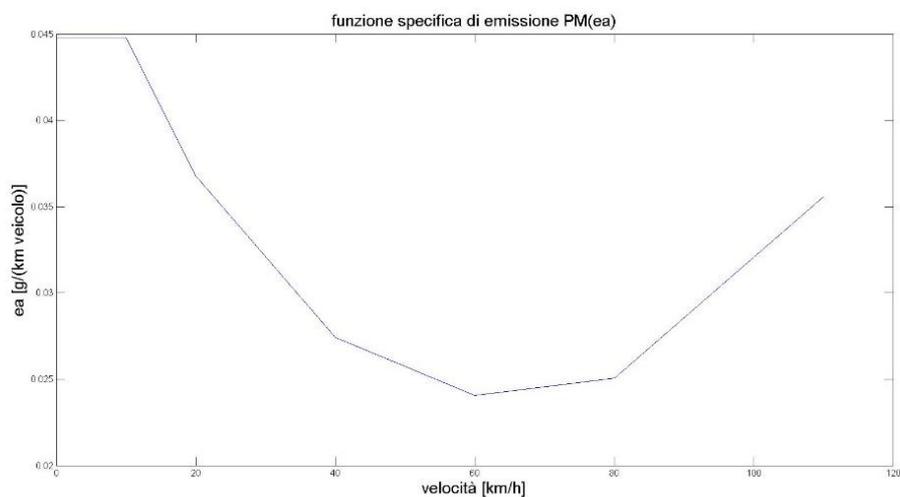


Figura 51. Funzione specifica di emissione di PM (Eur, Roma)

Dopo aver stimato le funzioni di emissione specifica sono state calcolate le emissioni sull'intera rete sia con l'approccio Corinair che con quello proposto nel modello a due stadi (M2). Dal confronto dei risultati emerge una sottostima di circa -12% di CO (Figura 52) e -4% di NOx

(Figura 53) quando si utilizza il modello a due stadi; i risultati in termini di PM non presentano variazioni significative (Figura 52).

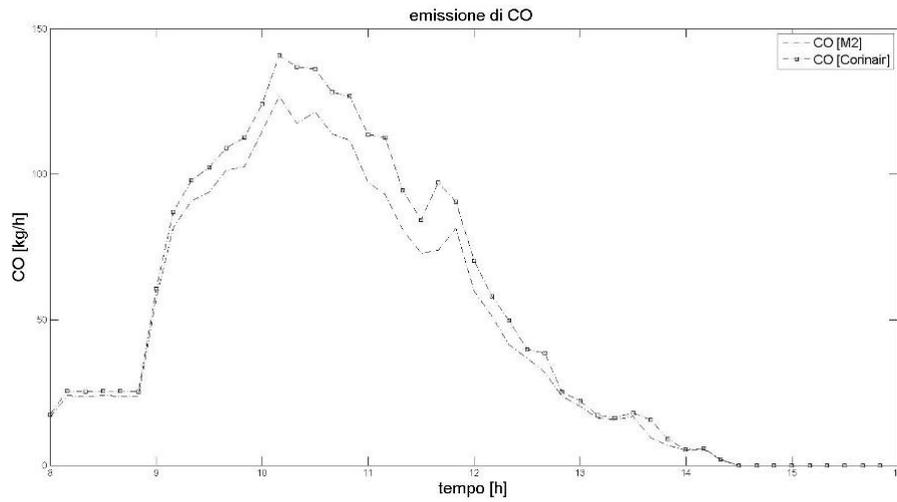


Figura 52. Stima dell'emissione di CO nella rete dell'Eur di Roma

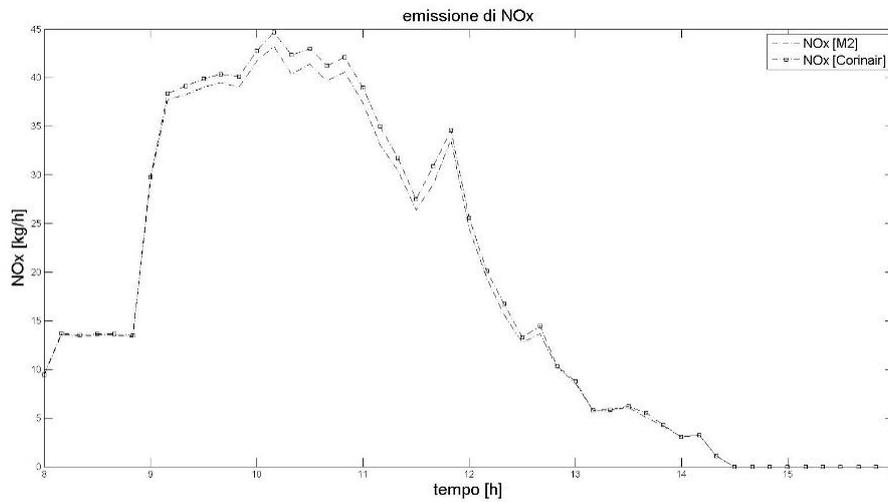


Figura 53. Stima dell'emissione di NOx nella rete dell'Eur di Roma

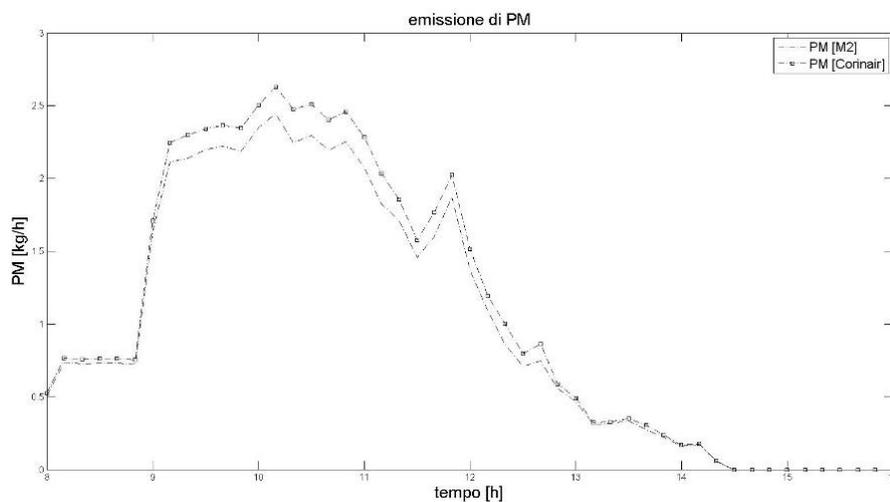


Figura 54. Stima dell'emissione di PM nella rete dell'Eur di Roma

Come atteso e in accordo ai risultati trovati nella rete di Brindisi le differenze fornite dal modello a due stadi sono contenute rispetto alle emissioni stimate con un approccio tipo Corinair. Il modello tende a sottostimare le emissioni soprattutto nel caso della CO e dell'NO_x.

6.2 Modello a tre stadi

6.2.1 Città di Brindisi

Al fine di confrontare i risultati precedentemente trovati con quelli forniti dal modello a tre stadi proposto, si è considerata la medesima rete stradale Figura 29.

L'offerta, la domanda e l'assegnazione presentano le stesse caratteristiche già illustrate, mentre per le intersezioni semaforizzate si è introdotto il sotto-modello riportato in 5.2.2. Il parco veicolare è stato aggiornato con i dati disponibili al 2012.

In questa prima fase non è stato applicato il sotto-modello per la stima delle code alle intersezioni non semaforizzate. Pertanto il modello a tre stadi è stato applicato per tutti gli archi in ingresso alle intersezioni semaforizzate, mentre per i restanti archi si è utilizzato un approccio tipo Corinair basato su valori di velocità d'arco medi (sempre per ogni finestra temporale di riferimento, i.e. 18 ore di simulazione).

In Figura 61 sono riportate le stime di CO per le 18 ore di simulazione utilizzando il modello Corinair (valori medi su diverse finestre temporali), il modello a due stadi e quello a tre stadi proposto.

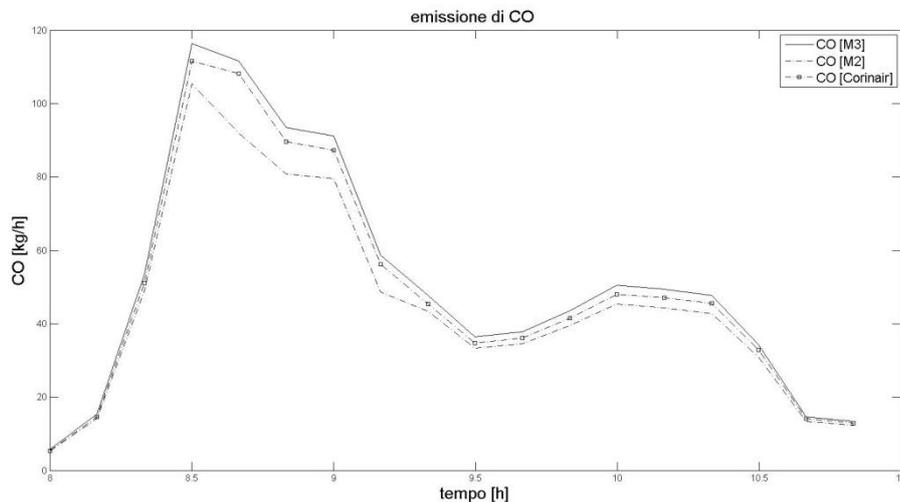


Figura 55. Stima emissione oraria di CO con il modello a tre stadi (Brindisi)

In Figura 56 sono riportate le stime di NO_x per le 18 ore di simulazione utilizzando il modello Corinair (valori medi su diverse finestre temporali), il modello a due stadi e quello a tre stadi proposto

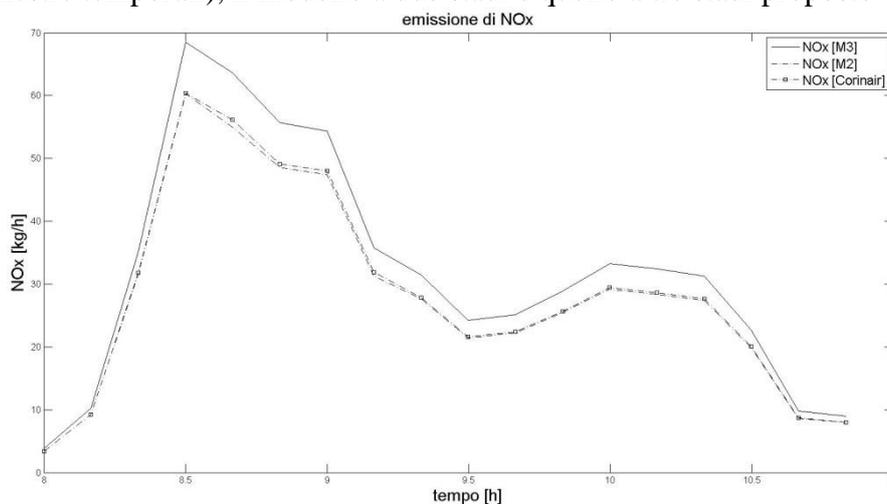


Figura 56. Stima emissione oraria di NO_x con il modello a tre stadi (Brindisi)

In Figura 57 sono riportate le stime di PM₁₀ per le 18 ore di simulazione utilizzando il modello Corinair (valori medi su diverse finestre temporali), il modello a due stadi e quello a tre stadi proposto

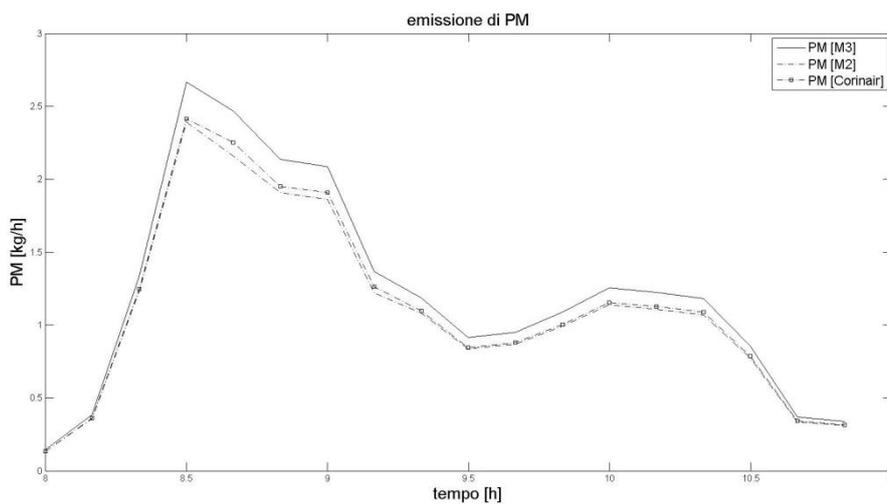


Figura 57. Stima emissione oraria di PM₁₀ con il modello a tre stadi (Brindisi)

I risultati trovati nella rete di Brindisi mostrano ancora come le emissioni stimate con il modello M2 siano inferiori di quelle calcolate con un approccio tipo Corinair.

Con l'introduzione del modello a tre stadi è possibile ridurre questa differenza in termini di CO (-0.9% sull'intero periodo di simulazione) e sovrastimare le emissioni in termini di NO_x (+4% sull'intero periodo di simulazione) e PM (+3% sull'intero periodo di simulazione).

Pertanto il modello a tre stadi sottostima le emissioni di CO e sovrastima quelle di NO_x e PM rispetto all'approccio tipo Corinair. Questa differenza è attribuita ai rapporti esistenti tra i fattori di emissione specifica e_a , e_b , e_c , precedentemente definiti e le funzioni medie di emissione specifica (Figura 31, Figura 32, Figura 33).

Nel caso del monossido di carbonio la relazione VSP-CO può essere approssimata con una relazione polinomiale di secondo grado, simile nella forma a quella della funzione media di emissione specifica la quale presenta una buona variabilità rispetto la velocità, con valori crescenti in prossimità delle basse velocità (capacità di considerare un surplus di emissione per le fasi di coda/accelerazione). In questi casi il modello a tre stadi può fornire una sovrastima e/o una sottostima dei valori di emissione (Figura 58) in funzione del rapporto tra lunghezza di coda e lunghezza dell'arco. Per archi lunghi in condizioni di bassa congestione il modello a tre stadi sottostima le emissioni inquinanti, viceversa per archi corti e congestionati.

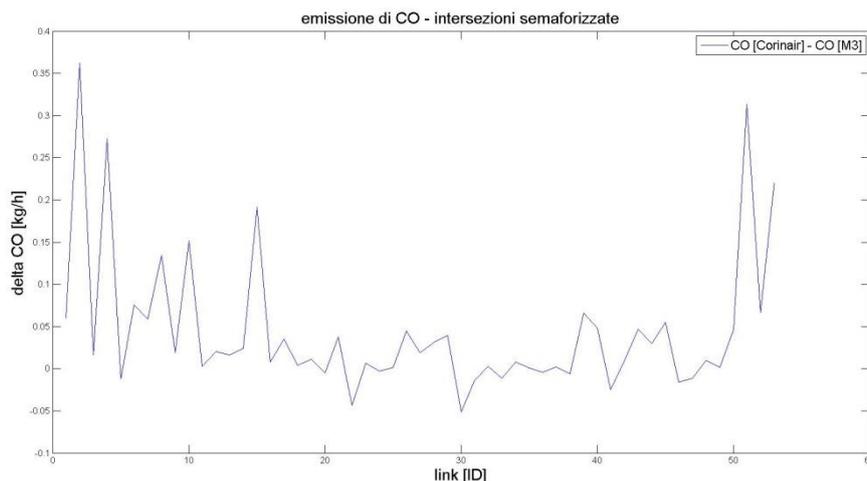


Figura 58. Variazioni di CO nelle intersezioni semaforizzate

Nel caso della NOx il valore di e_c risulta di un ordine di grandezza superiore a quello fornito dalla funzione media di emissione specifica; inoltre il legame VSP-NOx è sempre crescente, viceversa nella funzione media di emissione (usata nell'approccio Corinair) che peraltro presenta anche un andamento poco variabile con la velocità. In queste condizioni il modello a tre stadi proposto sovrastima le emissioni inquinanti di NOx, riuscendo ad attribuire correttamente un surplus di emissione per le intersezioni (Figura 59).

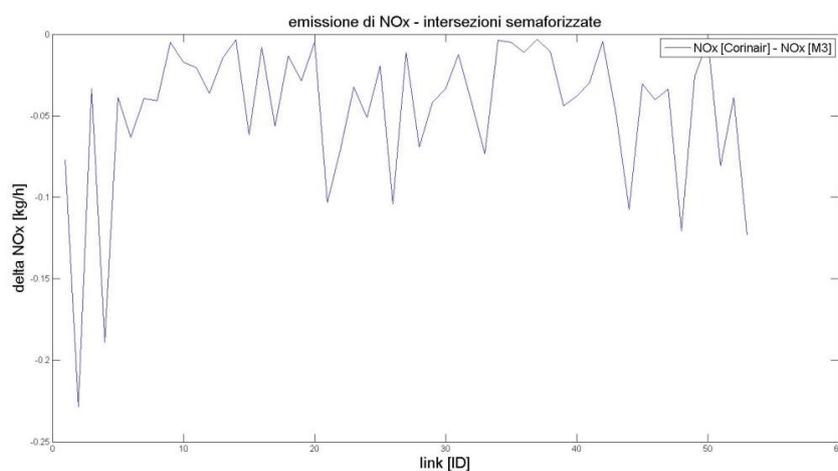


Figura 59. Variazioni di NOx nelle intersezioni semaforizzate

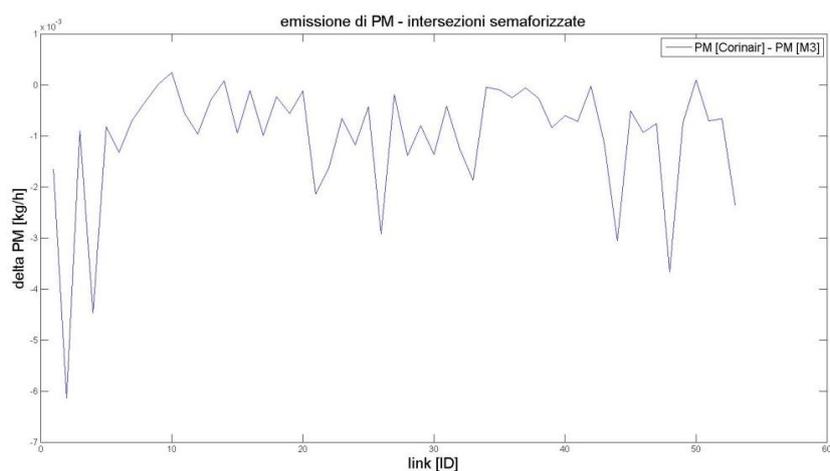


Figura 60. Variazioni di NOx nelle intersezioni semaforizzate

Come atteso l'adozione del modello a tre stadi porta ad un aumento nella stima delle emissioni rispetto al precedente modello a due stadi in quanto viene considerato un surplus di emissione legato sia alla fase di coda (come nel modello a due stadi) sia alla fase di accelerazione. In ragione del modesto numero di intersezione semaforizzate presenti nella rete brindisina e la quasi assenza di congestione il contributo della coda risulta comunque modesto.

Un ulteriore fattore da tenere in considerazione è la presenza di una forte domanda di attraversamento presente sulla superstrada SS379; in questi casi il contributo delle emissioni delle poche intersezioni semaforizzate presenti sulla rete urbana è mitigato dal notevole quantitativo di emissione prodotto sia dalla domanda di attraversamento che da quella in ingresso/uscita dalla superstrada (Figura 61)

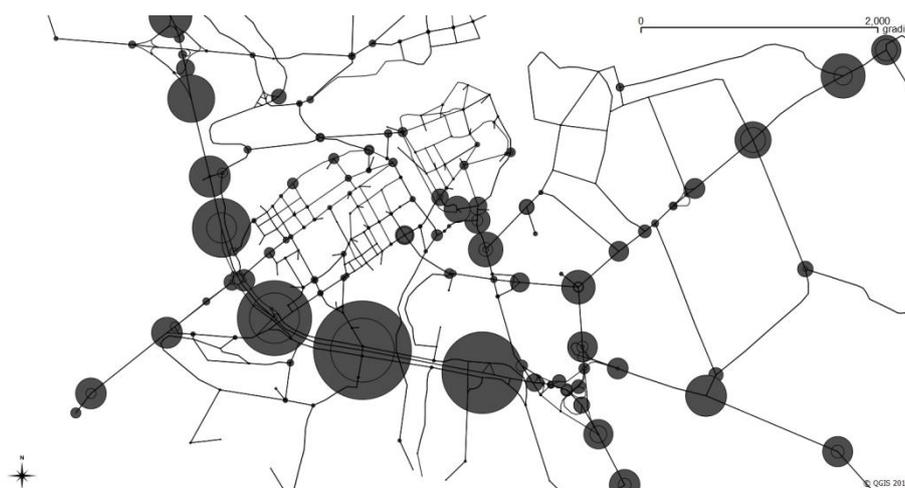


Figura 61. Stima dell'emissione di CO nelle intersezioni

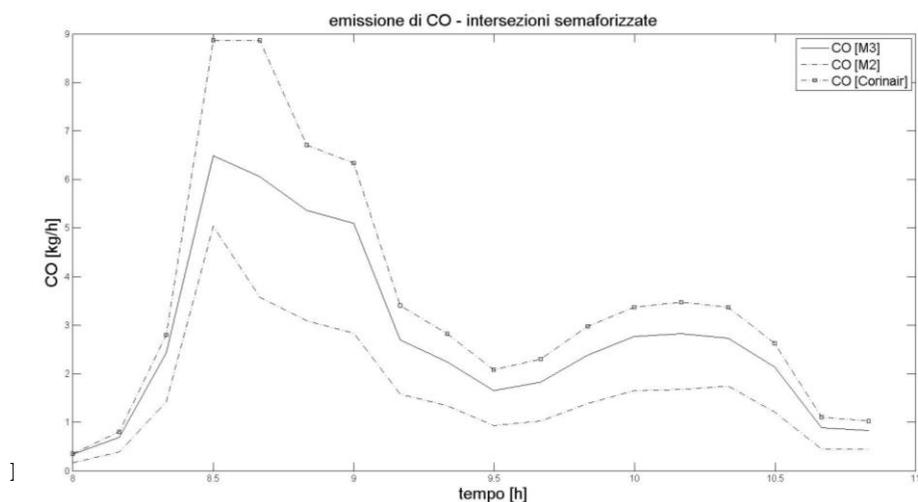
Al fine di sottolineare il contributo del modello proposto sono state considerate le seguenti porzioni di rete:

- rete urbana (senza superstrada SS379)
- corridoio stradale di V.le Aldo Moro
- solo gli archi afferenti le intersezioni semaforizzate

Nel primo caso è stata riscontrata ancora una volta una sottostima della CO (-1.2%) ed una sovrastima più marcata di NOx (+7%) e PM (+4%); la presenza di un elevato numero di intersezioni non semaforizzate e per le quali è stato applicato un approccio Corinair determina la sottostima in termini di CO, mentre l'assenza della domanda di attraversamento risalta la sovrastima in termini di NOx e PM.

Analizzando solo il corridoio di V.le A. Moro a livello qualitativo emerge ancora lo stesso risultato; l'emissione di CO è sottostima (-6%) mentre è fortemente sovrastimata l'emissione di NOx (+68%) e di PM (+48%). Il risultato fornito in termini di CO è ancora legato alla bassa incidenza della congestione nelle 5 intersezioni semaforizzate rispetto alle rimanenti 7 intersezioni non semaforizzate presenti nel corridoio e per le quali è stato adottato l'approccio Corinair.

Infine analizzando le sole intersezioni semaforizzate presenti sulla rete emerge un risultato ancora una volta simile ai precedenti ma con differenze percentuali ancora più marcate: -14% per la CO (Figura 62), +117% per l'NOx (Figura 63) e +62% per il PM (Figura 64).



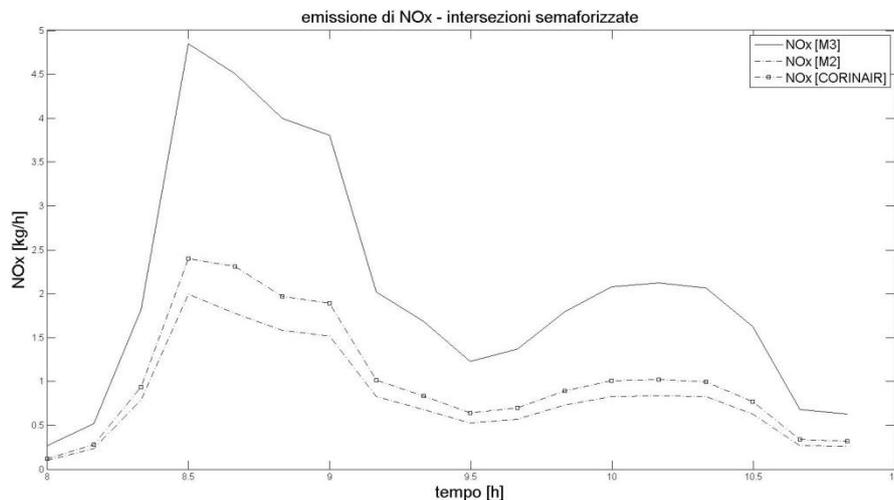


Figura 63. Stima dell'emissione di NOx per le intersezioni semaforizzate (Brindisi)

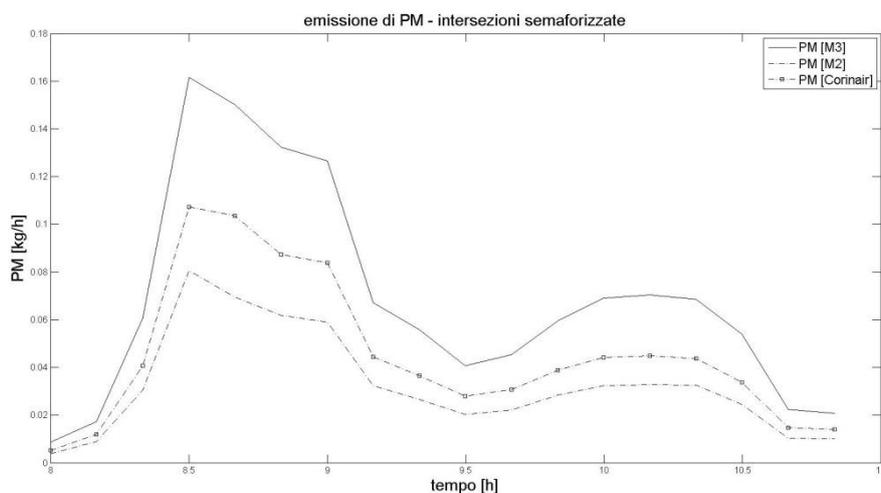


Figura 64. Stima dell'emissione di PM per le intersezioni semaforizzate (Brindisi)

Per quanto concerne l'NOx e il PM il risultato atteso coincide con quanto trovato; viceversa per la CO. La ragione di un differente comportamento della CO rispetto l'NOx ed il PM risiede nelle motivazioni precedentemente esposte ma anche dalla presenza di un livello di congestione molo basso sulla rete di Brindisi e che porta quindi ad una sovrastima delle emissioni di CO con l'utilizzo di un approccio

macroscopico (Corinari) basato su velocità medie. In particolare ipotizzando un arco di media lunghezza e afferente ad una intersezione semaforizzata la velocità media stimata a livello macroscopico sarà sicuramente inferiore di quella a deflusso libero; il fattore medio di emissione specifica, basato sulla velocità media, sarà quindi differente dal medesimo valore riferito alla velocità a deflusso libero. In caso di archi urbani con velocità a deflusso libero pari a 50km/h la velocità media stimata sarà inferiore di questo valore e pertanto il valore di emissione specifica sarà maggiore di quello a deflusso libero. Di conseguenza un approccio macroscopico attribuisce un valore di emissione specifica più alto all'intero arco considerando che tutti i veicoli si spostano alla velocità media per tutta la lunghezza d'arco. In realtà è più verosimile attendersi una velocità a deflusso libero su quasi tutto l'arco ad eccezione della zona di attraversamento dell'intersezione dove alcuni veicoli rallentano e si arrestano. In condizioni di bassa congestione la fase a deflusso libero rappresenta la fase principale di percorrenza dell'arco e le emissioni sono legate alla velocità a deflusso libero (ad esempio 50km/h). Di conseguenza l'emissione attesa sarà inferiore di quella di un approccio macroscopico.

6.2.2 Città di Roma (quartiere Eur)

In analogia con quanto fatto per il modello a due stadi anche per quello a tre stadi (M3) si è scelto di testarlo sulla rete stradale dell'Eur. Le caratteristiche dell'offerta, domanda e assegnazione sono stati riportati nei paragrafi precedenti.

I parametri di emissione specifica per le fasi di accelerazione (*ec*) e coda (*eb*) sono stati calcolati come riportato in 5.2.4.

In particolare è opportuno sottolineare che in questa applicazione è stato testato anche il sottomodello per la stima delle emissioni nelle intersezioni non semaforizzate.

Utilizzando il modello a tre stadi (M3) è possibile sovrastimare le emissioni rispetto ai risultati forniti da un approccio macroscopico; nello specifico la rete dell'Eur presenta un livello di congestione più elevato rispetto alla rete di Brindisi e il surplus di emissione per i veicoli in coda e accelerazione dalle intersezioni rappresenta un contributo significativo.

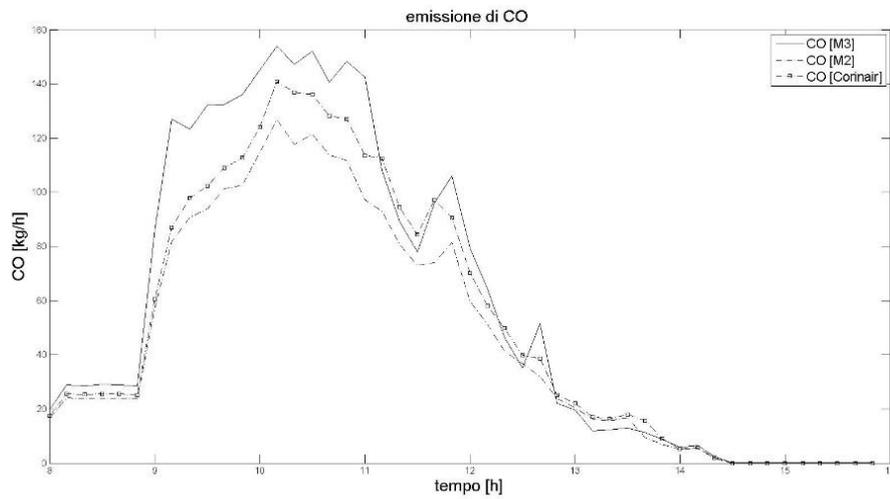


Figura 65. Emissioni di CO nella rete dell'Eur (Roma)

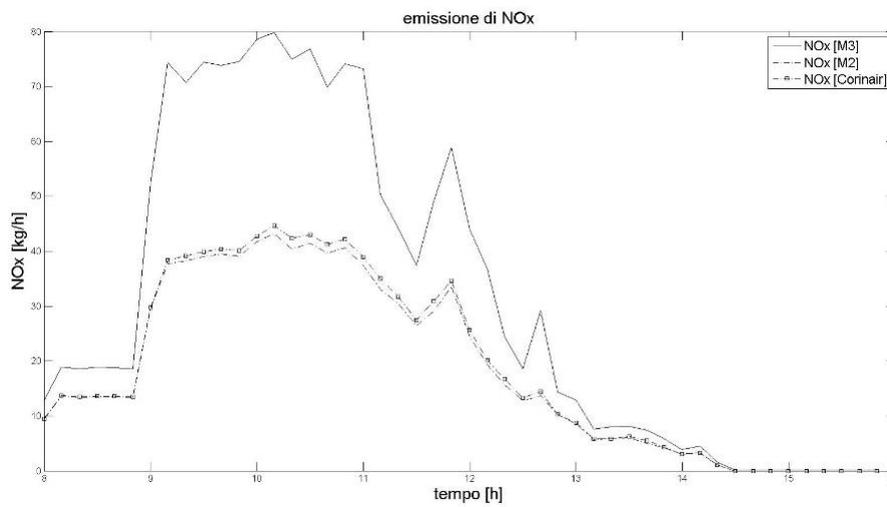


Figura 66. Emissioni di NOx nella rete dell'Eur (Roma)

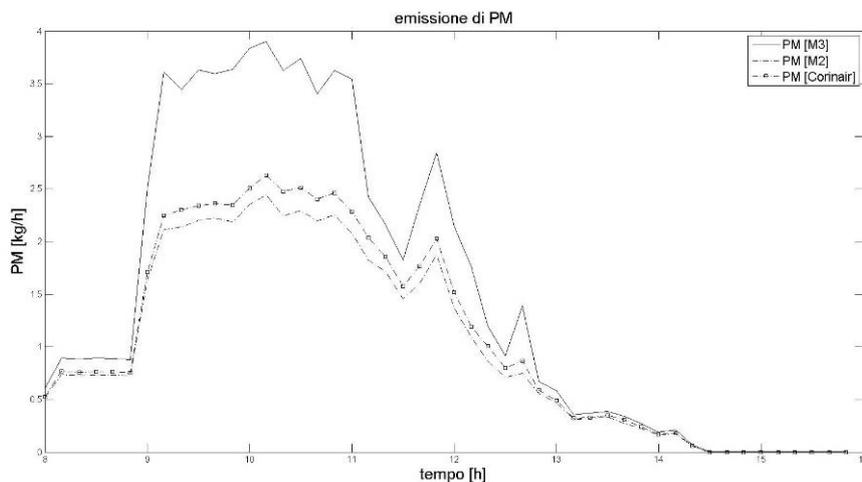


Figura 67. Emissioni di PM nella rete dell'Eur (Roma)

Per sottolineare il contributo fornito dal modello proposto nel caso delle intersezioni semaforizzate in condizioni congestionate è stata eseguita un'analisi di dettaglio sulle stesse.

Utilizzando il modello M3 i risultati mostrano una sovrastima di +36% per la CO, di 122% per l'NOx e di 100% per il PM.

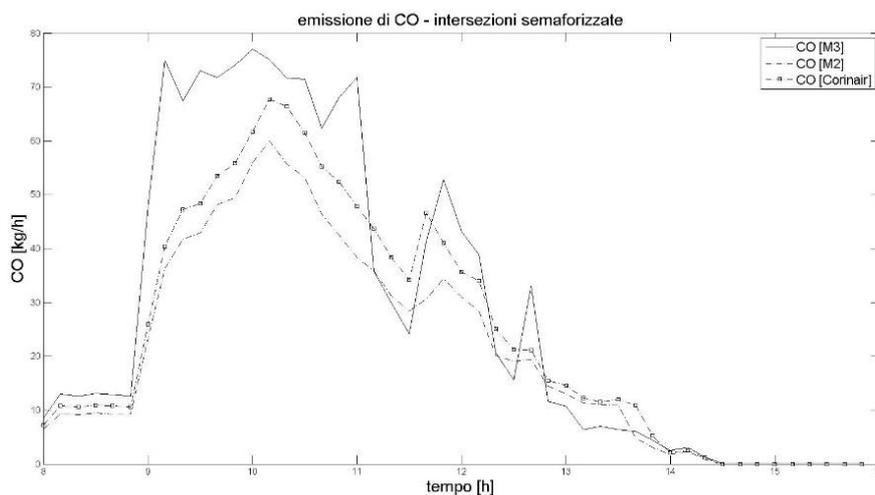


Figura 68. Emissioni di CO nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma)

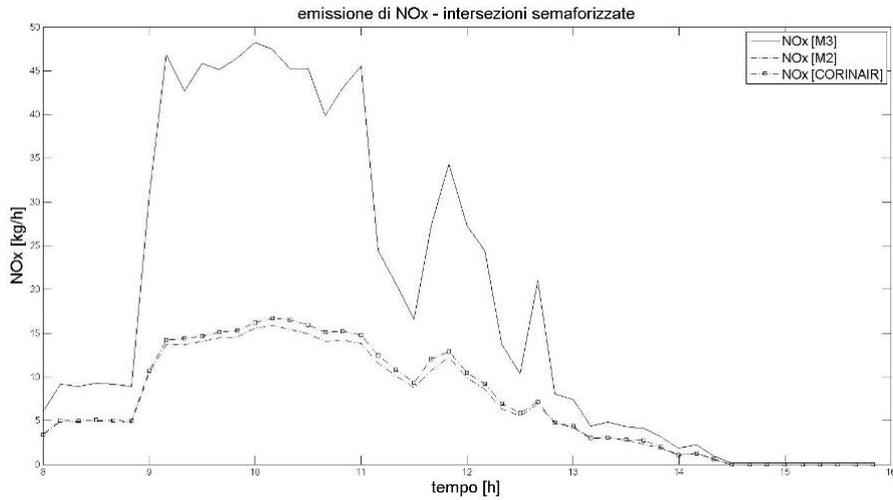


Figura 69. Emissioni di NOx nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma)

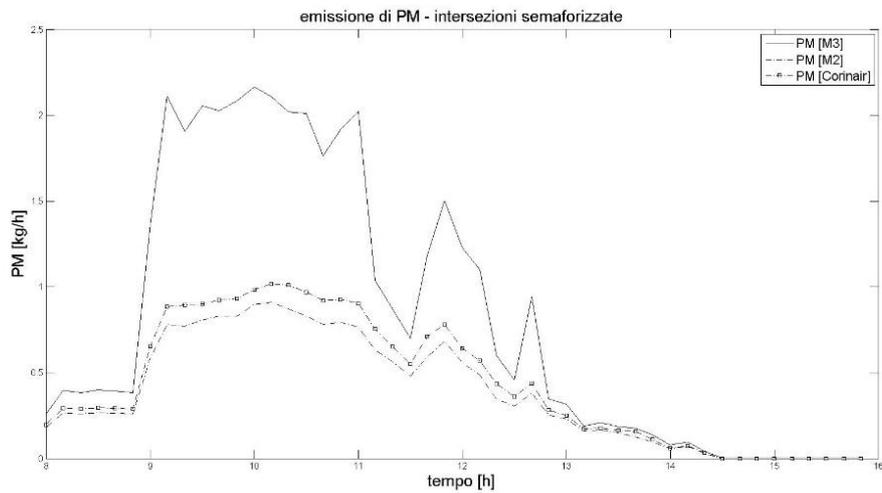


Figura 70. Emissioni di PM nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma)

In accordo con le analisi fatte nella rete di Brindisi anche nella rete stradale dell'Eur si è riscontrata una sovrastima del modello M3 nel caso di archi corti e congestionati, viceversa per gli archi lunghi e poco congestionati.

In Figura 73, Figura 74, Figura 75 si riportano le differenze in valore assoluto tra i risultati forniti dall'approccio Corinair ed il modello M3.

Al fine di evidenziare le intersezioni più critiche da un punto di vista delle emissioni inquinanti è possibile rappresentare i dati attraverso l'utilizzo di un sistema GIS. Ad esempio è possibile fornire un quadro chiaro e di facile lettura in riferimento all'emissione prodotta dai veicoli in coda alle intersezioni semaforizzate (Figura 71).

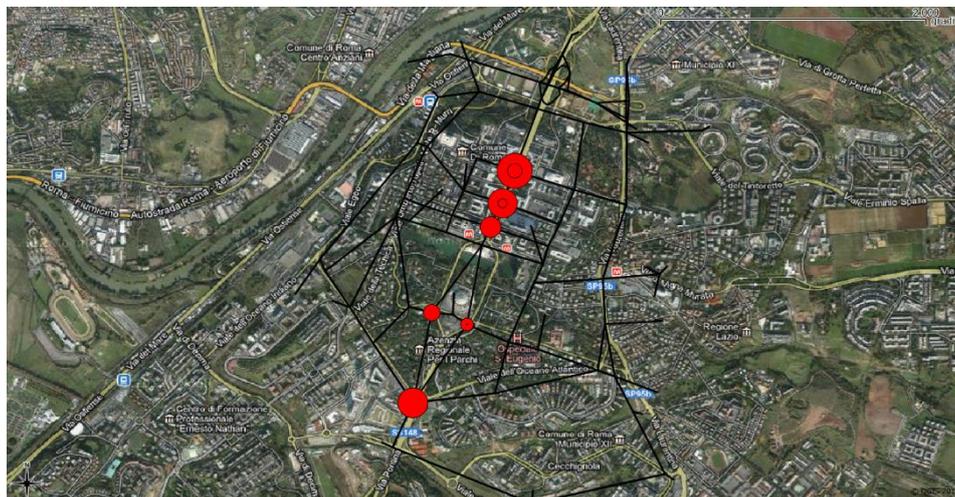


Figura 71. Distribuzione spaziale delle emissioni di CO relative alla fase di coda nelle intersezioni semaforizzate delle rete dell'Eur (Roma).

Allo stesso modo è possibile illustrare l'andamento delle emissioni sugli archi consentendo una facile lettura delle zone più critiche (Figura 72).

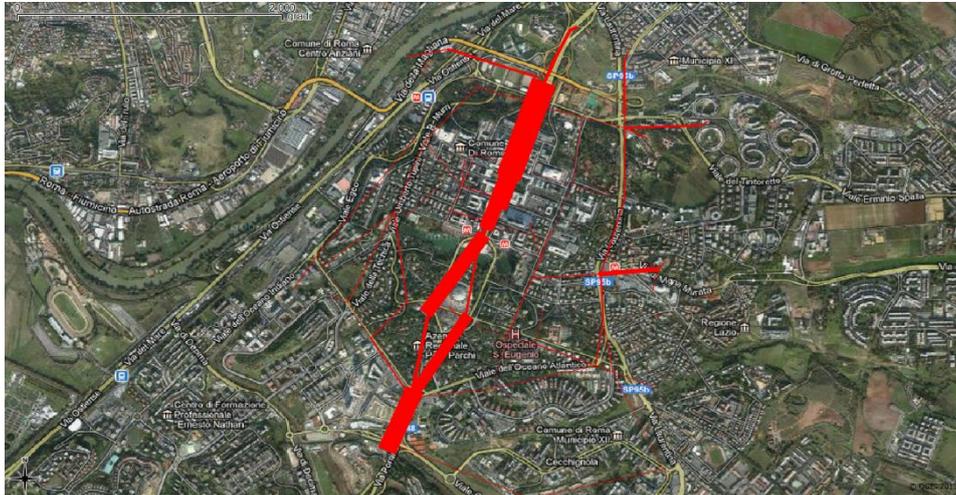


Figura 72. Distribuzione spaziale delle emissioni di CO nella rete dell'Eur (Roma).

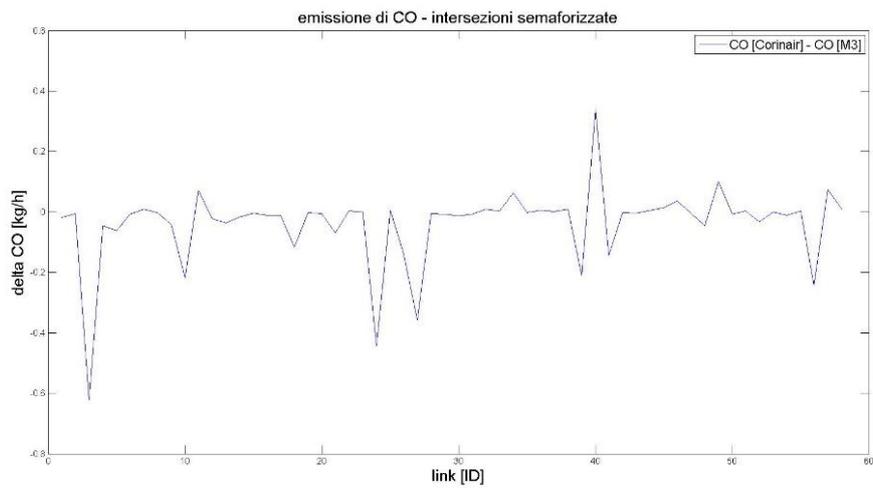


Figura 73. Differenza di emissione di CO nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma) tra l'approccio Corinair e il modello M3.

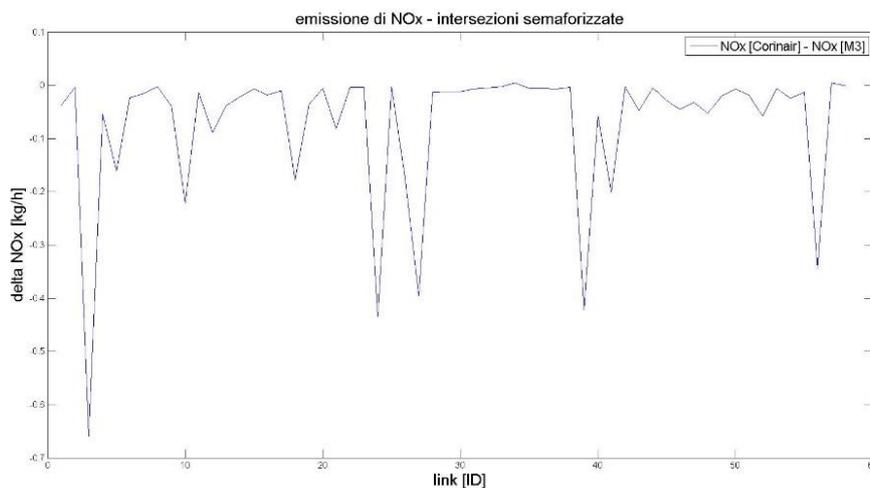


Figura 74. Differenza di emissione di NOx nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma) tra l'approccio Corinair e il modello M3.

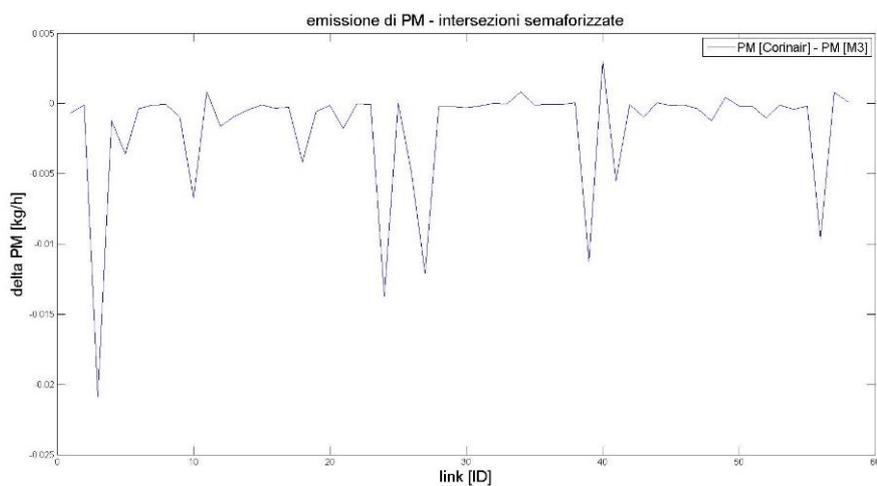


Figura 75. Differenza di emissione di PM nelle intersezioni semaforizzate della rete dell'Eur (Roma) tra l'approccio Corinair e il modello M3.

Infine per testare e quantificare il contributo alle emissioni delle intersezioni non semaforizzate è stata eseguita un'analisi di dettaglio sulle medesime. In particolare è stato applicato il sotto-modello per le intersezioni non semaforizzate proposto in 5.1.2.

Le intersezioni non semaforizzate analizzate nella rete dell'Eur sono 23; i risultati mostrano una sovrastima di +193% per la CO, di +219% per l'NOx e di +198% per il PM.

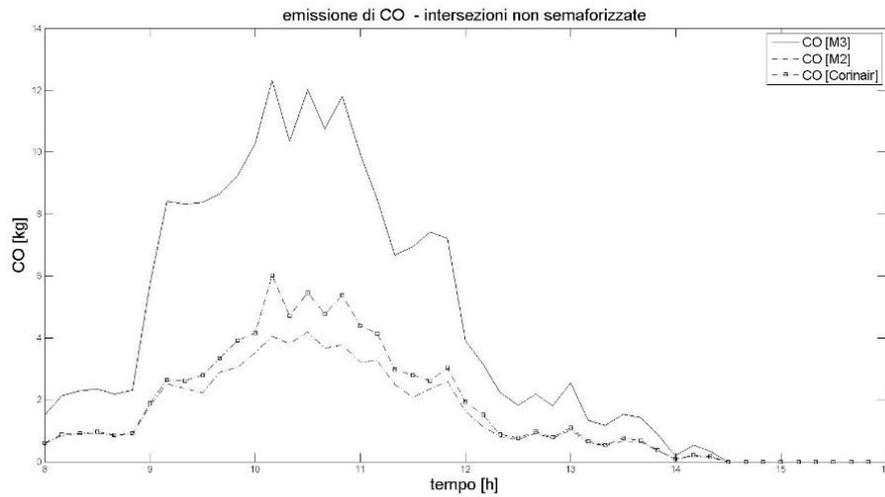


Figura 76. Emissioni di CO nelle intersezioni non semaforizzate della rete dell'Eur (Roma)

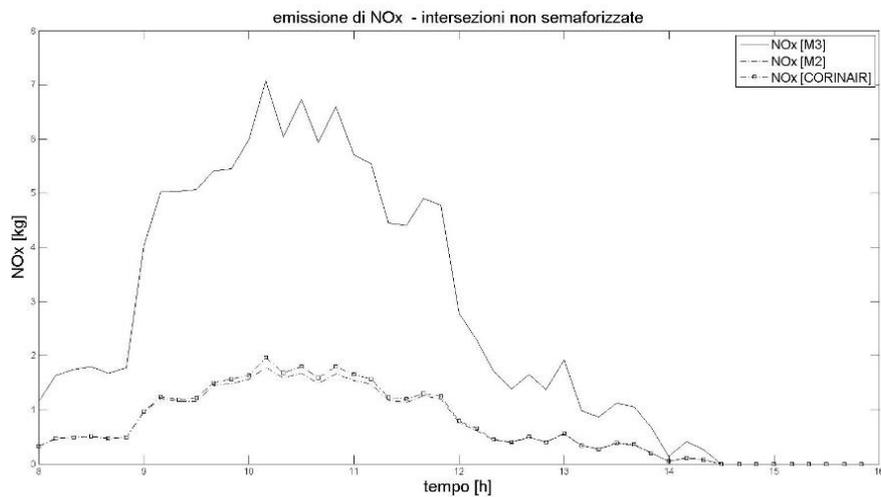


Figura 77. Emissioni di NOx nelle intersezioni non semaforizzate della rete dell'Eur (Roma)

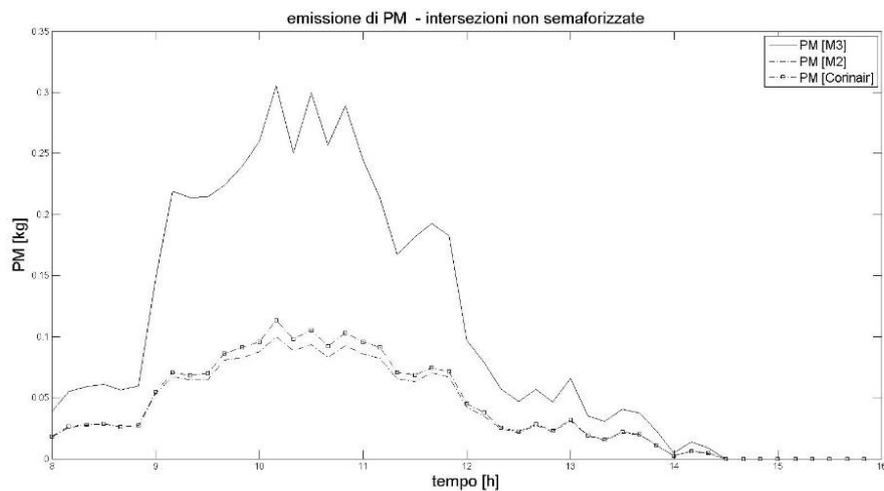


Figura 78. Emissioni di PM nelle intersezioni non semaforizzate della rete dell'Eur (Roma)

E' opportuno evidenziare che nella rete dell'Eur nonostante il modello M3 sovrastimi le emissioni per le intersezioni non semaforizzate, prendendo in conto il surplus di emissione legato alla fase di coda e accelerazione, il valore assoluto di queste emissioni rappresenta circa il 10% del quantitativo totale emesso (20g/h contro 200g/h).

7 Simulazione di interventi di “traffic management”

Nel capitolo 6 sono stati illustrati due casi studio relativi alle città di Brindisi e Roma stimando le emissioni inquinanti allo stato attuale e in funzione del parco veicolare circolante.

In questo capitolo sono presentati i risultati ottenuti dall'adozione di alcuni interventi di ottimizzazione simulati mediante la modellazione proposta.

7.1 Rete di Brindisi:

Nella rete di Brindisi sono stati simulati i seguenti interventi di ottimizzazione:

- Ottimizzazione parametri semaforici;
- Ottimizzazione dei sensi unici;
- Sostituzione dei veicoli Euro0 in favore di veicoli meno inquinanti (orizzonte temporale al 2020).

I primi due interventi sono stati valutati congiuntamente (opt.1). Il terzo intervento costituisce un'alternativa valutata distintamente (opt.2).

L'ottimizzazione dei parametri semaforici è stata effettuata sui due corridoi principali della città: corridoio di V.le Aldo Moro e corridoio di Via S.G. Bosco. I due corridoi sono perpendicolari tra di loro e presentano un nodo in comune. Pertanto è stato assegnato a questo nodo il ruolo di nodo master. Quindi una volta stimati i flussi con il modello mesoscopico dinamico e dopo aver individuato il nodo master (ovvero il nodo con offset nullo di default), attraverso l'utilizzo del software Synchro è stato possibile definire i parametri ottimi degli impianti semaforici; nel dettaglio sono stati definiti valori ottimi di ciclo, tempo di verde e tempo di offset. Per la scelta del ciclo ottimo è stato considerato lo stesso valore su tutte le intersezioni.

I parametri ottimi sono stati inseriti all'interno del modello mesoscopico dinamico ed è stata effettuata un'altra assegnazione al fine

di stimare nuovamente i flussi d'arco presenti negli archi costituenti i corridoi e stimare nuovamente i parametri ottimi mediante Synchro. La procedura è iterativa fino a convergenza. Nel caso specifico dopo 4 iterazioni è stato possibile raggiungere la convergenza dei flussi d'arco e il ciclo ottimo trovato alla prima iterazione è stato aumentato dell'8% alla quarta iterazione. Si ricorda che i flussi d'arco cambiano ad ogni iterazione in base ai tempi di percorso tra le coppie o-d della rete, ovvero in base ai parametri semaforici.

In termini di "traffico" la soluzione consente una riduzione del ritardo del 58% sul corridoio di V.le A. Moro e del 70% sul corridoio di S.G. Bosco.

Il livello di servizio passa da LOS F a LOS B con una significativa riduzione delle code sulla rete (Figura 79).

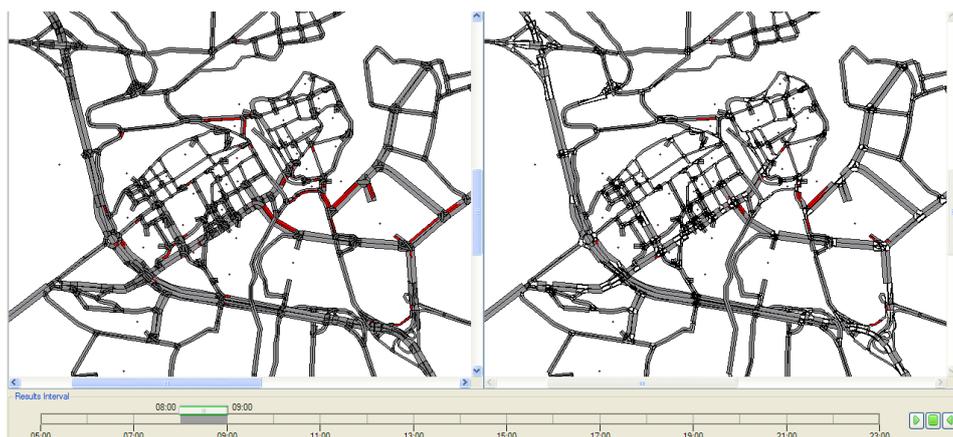


Figura 79. Rappresentazione delle code in Dynameq nella rete di Brindisi allo stato attuale (sinistra) e dopo gli interventi di ottimizzazione opt.1 (destra).

L'ottimizzazione dei sensi unici è stata eseguita mediante la procedura di Montella (1996).

Dopo aver definito gli interventi di ottimizzazione è stata eseguita una nuova assegnazione e per i quattro scenari definiti in 6.1.1 sono state calcolate le emissioni di CO, NOx e PM.

In Figura 80 è riportata la riduzione di CO a seguito dell'adozione degli interventi di ottimizzazione sopra esposti.

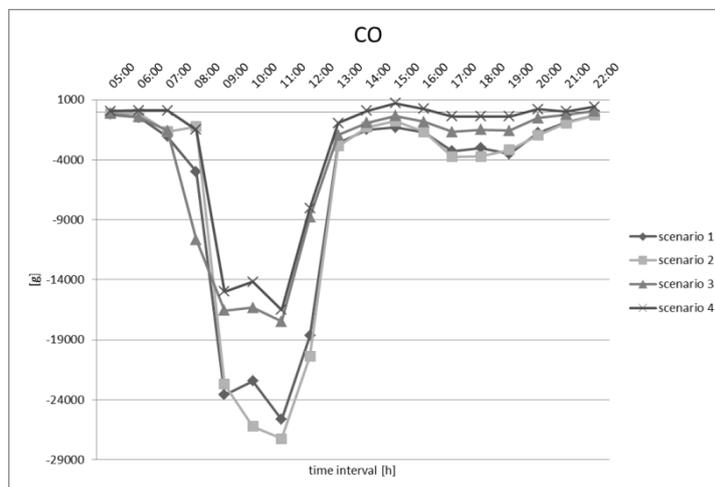


Figura 80. Riduzione dell'emissione di CO nella rete di Brindisi (opt.1)

Il risultato mostra una significativa riduzione delle emissioni variabile tra il 5% ed il 25% nell'ora di punta e del 5% nelle restanti ore. Il miglioramento è minore per gli scenari 3 e 4 dove la stima delle emissioni sembra essere più affidabile.

Anche per l'NOx e per il PM le soluzioni di ottimizzazione proposte portano ad una riduzione delle emissioni inquinanti con variazioni comprese tra il 2% e il 12% nell'ora di punta; nelle restanti ore la variazione risulta molto contenuta e pari a circa il 2%. Il risultato sottolinea l'importanza delle condizioni di congestione nella produzione e quindi nella stima delle emissioni. Attraverso interventi mirati alla riduzione della congestione urbana e con conseguente aumento delle velocità di percorrenza (in ambito urbano) è possibile ottenere una riduzione delle emissioni inquinanti. Non è tuttavia da sottovalutare l'effetto del secondo ordine ovvero l'effetto legato ad una maggiore percorrenza dei veicoli (aumento dei chilometri percorsi) a favore di percorsi tra le coppie o-d più lunghi ma meno congestionati a seguito di interventi di ottimizzazione.

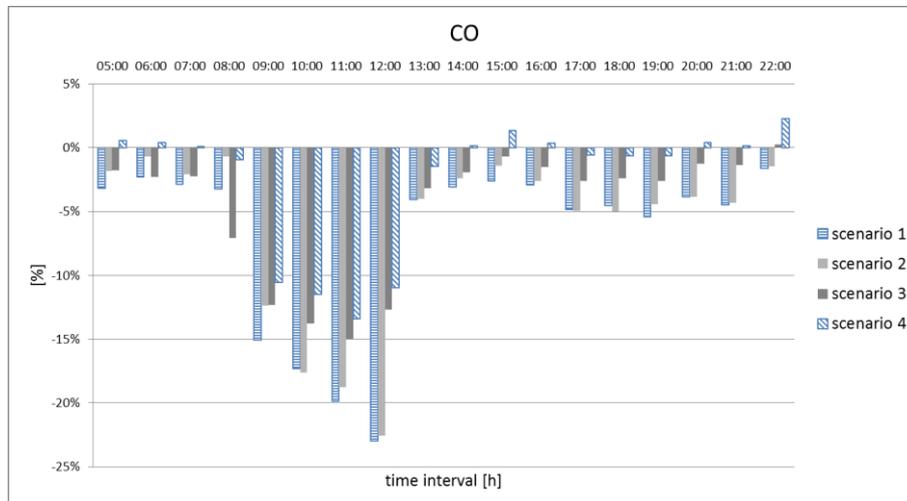


Figura 81. Riduzione percentuale delle emissioni di CO a seguito degli interventi di ottimizzazione (opt.1)

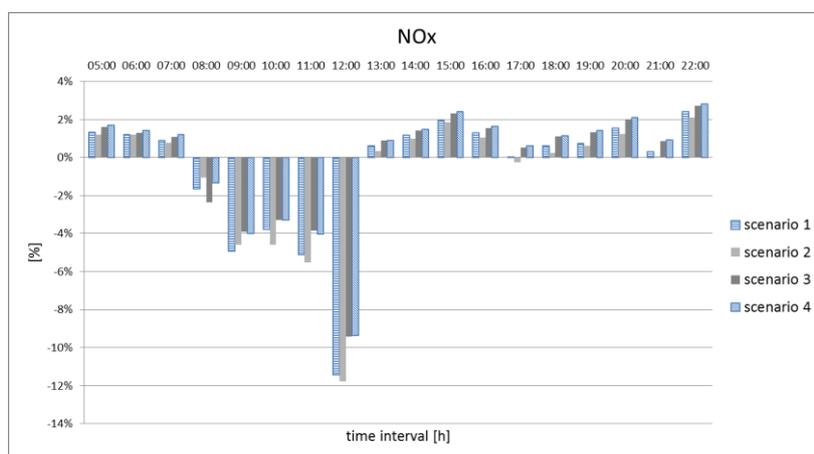


Figura 82. Riduzione percentuale delle emissioni di NOx a seguito degli interventi di ottimizzazione (opt.1)

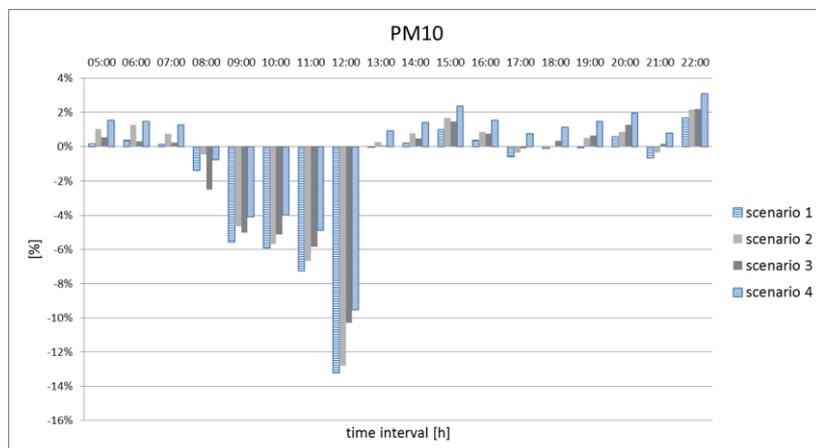


Figura 83. Riduzione percentuale delle emissioni di PM a seguito degli interventi di ottimizzazione (opt.1)

Con l'adozione della sola ottimizzazione degli impianti semaforici (inclusa la sincronizzazione) è possibile ridurre le emissioni anche se in misura minore rispetto all'adozione di tutti gli interventi di ottimizzazione (sincronizzazione e sensi unici). La riduzione per la CO varia dal 2% al 15% durante l'ora di punta ed è di circa il 5% nelle restanti ore; la riduzione per l'NOx e il PM varia tra il 2% e l'8%.

In caso di adozione di strategie sulla flotta veicolare è stato considerato uno scenario relativo all'orizzonte temporale del 2020 nel quale si è ipotizzata la completa sostituzione dei veicoli Euro0 a favore di veicoli meno inquinati.

I risultati mostrano come sia possibile raggiungere riduzione dell'ordine del 50% per la CO, 30% per l'NOx e del 20% per il PM.

In Figura 84, Figura 85 sono riportate le riduzioni percentuali tra lo scenario di progetto al 2020 e gli scenari 2 e 4 definiti in 6.1.1.

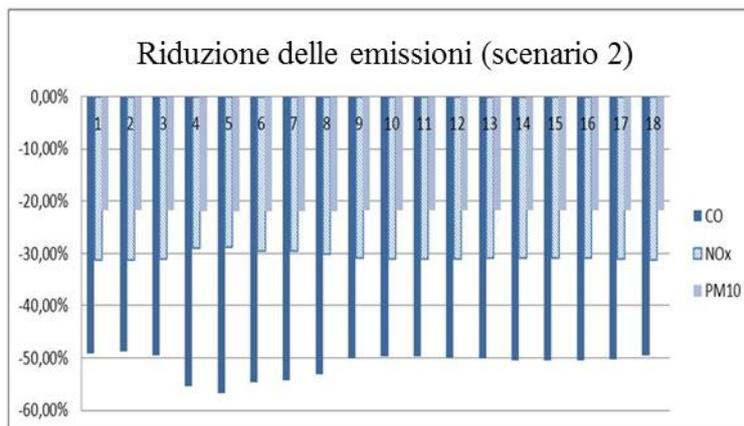


Figura 84. Riduzione percentuale delle emissioni nello scenario 2 a seguito degli interventi di ottimizzazione (opt.2)

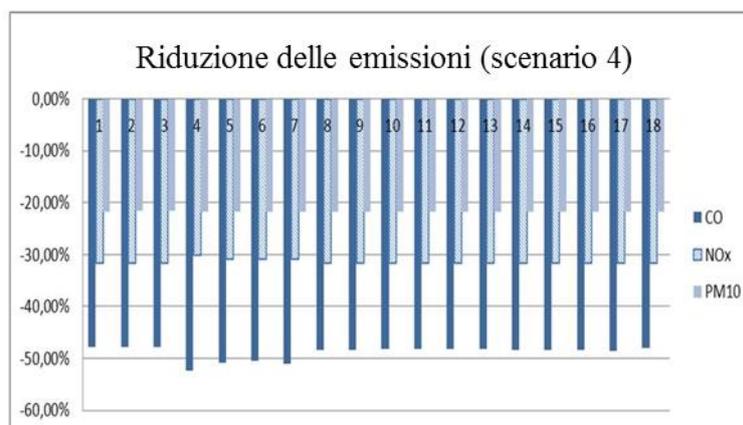


Figura 85. Riduzione percentuale delle emissioni nello scenario 4 a seguito degli interventi di ottimizzazione (opt.2)

7.2 Rete dell'Eur (Roma):

Nella rete dell'Eur (Roma) sono stati simulati gli effetti dei seguenti interventi di ottimizzazione:

- Sostituzione dei veicoli più inquinanti a favore di veicoli elettrici
- Incremento dell'utilizzo del trasporto pubblico (modal shift)
- Sostituzione dei veicoli più inquinanti a favore di veicoli ibridi

Per il primo intervento (hp.1 - mobilità elettrica) è stata ipotizzata una sostituzione del 5%, del 10% e del 15% dei veicoli più inquinanti a favore di veicoli a trazione elettrica. Questo intervento comporta la necessità di stimare differenti funzioni di emissione specifica in base al cambiamento del parco veicolare circolante.

Per l'incremento nell'utilizzo del trasporto pubblico (hp.2), anche in considerazione della presenza della linea B della metropolitana (fermate di Eur Fermi ed Eur Palasport), è stato ipotizzato un incremento del 2%, del 4% e del 6%. Questo intervento comporta un cambiamento nella domanda di spostamenti e quindi la necessità di dovere effettuare di volta in volta un'assegnazione.

Per il terzo intervento (hp.3 - mobilità ibrida) è stata ipotizzata una sostituzione del 5%, del 10% e del 15% dei veicoli più inquinanti a favore di veicoli a trazione ibrida. Anche questo intervento comporta la necessità di stimare differenti funzioni di emissione specifica in base al cambiamento del parco veicolare circolante.

In Tabella 12 è riportato un prospetto di quanto appena illustrato.

Hp1: incremento della mobilità elettrica	Scenario 1	Sc1	5%
	Scenario 2	Sc2	10%
	Scenario 3	Sc3	15%
Hp2: incremento della ripartizione modale a favore del TPL	Scenario 1	Sc4	5%
	Scenario 2	Sc5	10%
	Scenario 3	Sc6	15%
Hp3: incremento della mobilità ibrida	Scenario 7	Sc7	5%
	Scenario 8	Sc8	10%
	Scenario 9	Sc9	15%

Tabella 12. Scenari di ottimizzazione proposti nella rete dell'Eur

Nel caso della mobilità ibrida ed elettrica sono stati applicati i sotto-modelli di riferimento illustrati in 5.2.3.

In Figura 86, sono riportati i profili di emissione di CO per gli scenari relativi alla prima ipotesi e per lo scenario sc0 di riferimento (opzione zero).

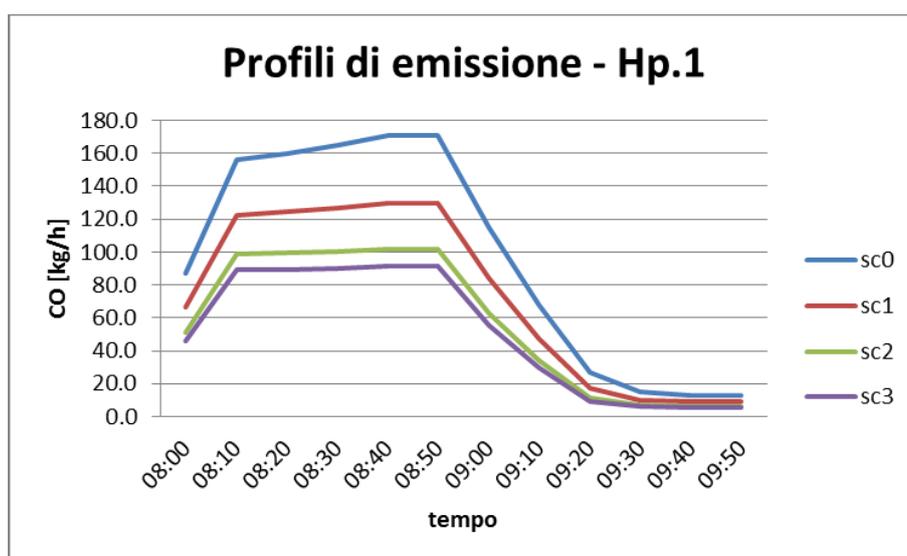


Figura 86. Profili di emissione di CO nella rete dell'Eur – hp.1

Nei profili di emissione riportati per gli scenari sc1-2-3 sono incluse anche le emissioni relative alla produzione di energia elettrica con sistemi tradizionali costituiti da centrali a carbone. In Figura 87, Figura 88 è riportata la stima di emissione inquinante legata alla produzione dell'energia elettrica per i veicoli elettrici definiti in ogni scenario ed in funzione della distanza media di percorrenza sulla rete.

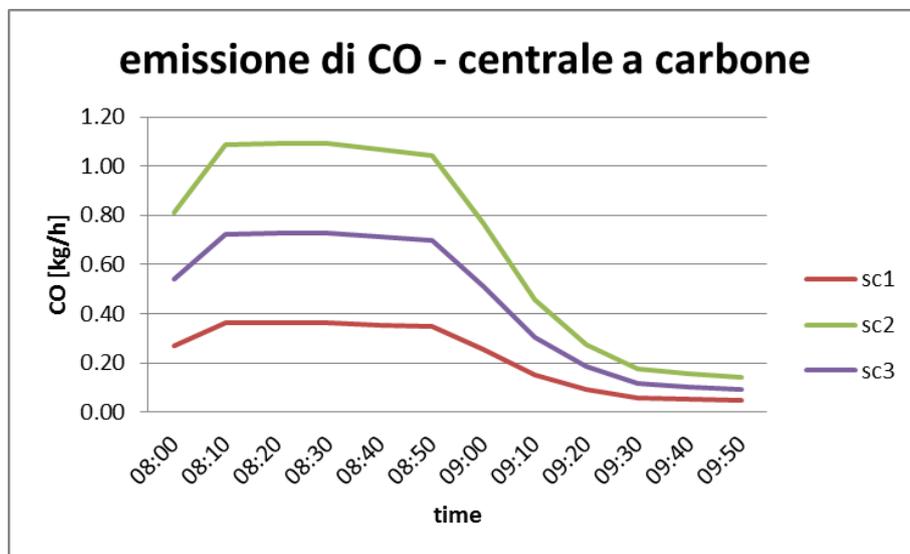


Figura 87. Profili di emissione di CO per la produzione di energia elettrica (centrale a carbone) dei veicoli elettrici circolanti sulla rete dell'Eur – hp.1

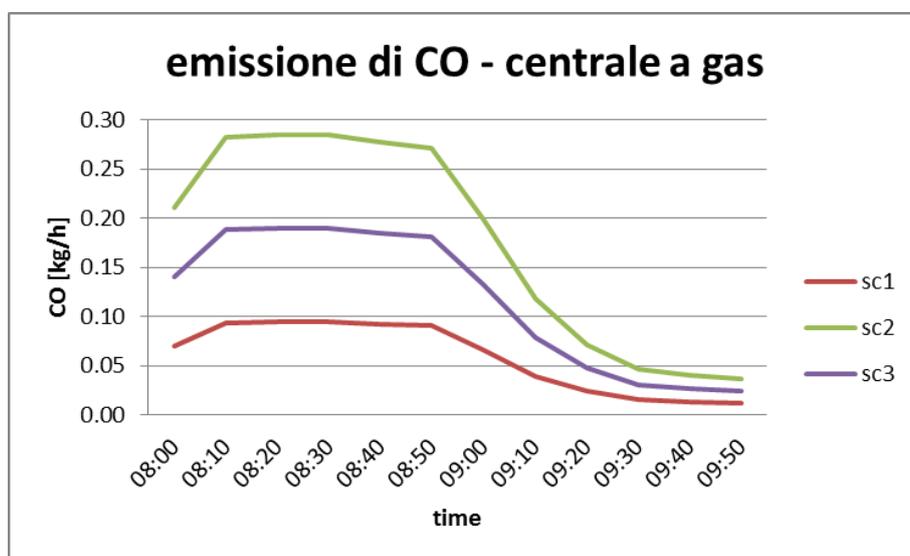


Figura 88. Profili di emissione di CO per la produzione di energia elettrica (centrale a gas) dei veicoli elettrici circolanti sulla rete dell'Eur – hp.1

I risultati mostrano un basso impatto di emissione di CO legata alla produzione dell'energia elettrica.

In Figura 89 sono riportati i profili di emissione di CO per i tre scenari relativi all'incremento della ripartizione modale a favore del trasporto pubblico locale e dello scenario sc0 di riferimento (opzione zero).

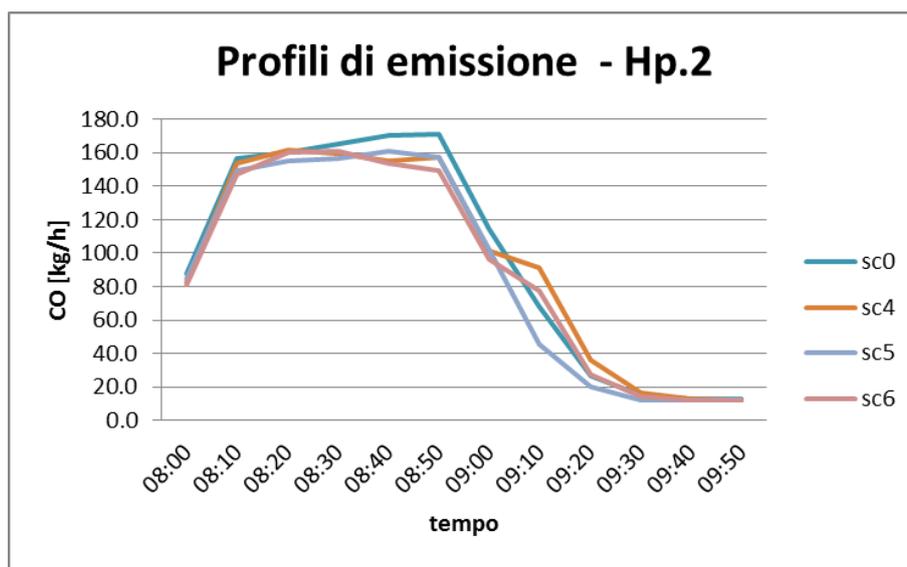


Figura 89. Profili di emissione di CO nella rete dell'Eur – hp.2

In Figura 90, sono riportati i profili di emissione di CO per i tre scenari relativi all'incremento della mobilità ibrida e dello scenario sc0 di riferimento (opzione zero).

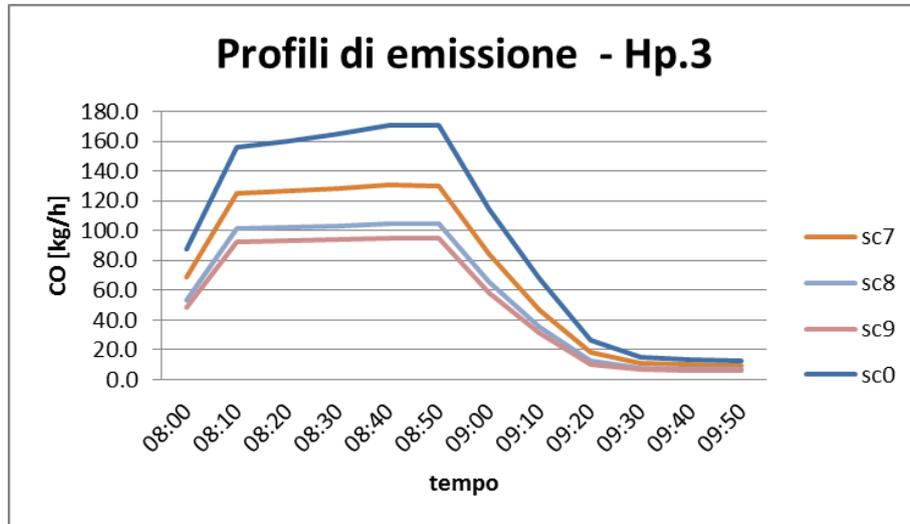


Figura 90. Profili di emissione di CO nella rete dell'Eur – hp.3

In sintesi attraverso questi interventi di ottimizzazione è possibile quasi dimezzare l'emissione di CO. Gli interventi più efficienti in ordine sono legati all'introduzione della mobilità elettrica, di quella ibrida e all'aumento nell'utilizzo del trasporto pubblico locale.

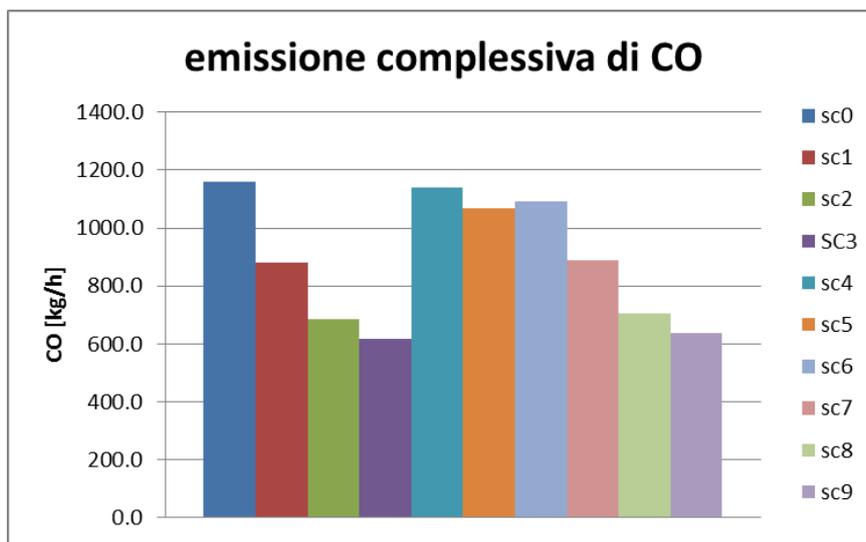


Figura 91. Emissione complessiva di CO nella rete dell'Eur (Roma).

Un significativa riduzione è possibile già attraverso l'adozione degli scenari sc1 ed sc7 con I quali è possibile sostituire quella ridotta parte di parco circolante costituita da veicoli inquinanti di vecchia generazione.

I restanti interventi portano sicuramente un ulteriore beneficio ma sicuramente meno efficace e non in misura proporzionale ai due in oggetto.

8 Conclusioni e sviluppi futuri

Considerate le finalità della ricerca già illustrate precedentemente, è stata sviluppata una modellazione per la stima delle emissioni inquinanti in ambito urbano e legate al traffico veicolare.

Una delle finalità proposte è la possibilità di valutare reti di medie e grandi dimensioni considerando diverse finestre temporali, ovvero effettuare un'analisi con variabilità non solo spaziale ma anche temporale.

Partendo dalla modellazione disponibile in letteratura, sia a livello macroscopico che microscopico è stato possibile sviluppare due differenti modelli; un modello a due stadi (M2) ed un modello a tre stadi (M3). In particolare l'approccio macroscopico è stato utilizzato come punto di partenza per lo sviluppo generale della modellazione mesoscopica proposta; l'idea è stata quella di passare da un livello più generale (macro) ad uno più dettagliato (meso) attraverso l'adozione di alcuni parametri aggiuntivi nella rappresentazione dei nodi (tempo di verde, offset, ecc.).

L'approccio microscopico è stato utilizzato come base di partenza sia per la definizione dei fattori specifici di emissione legati alla fase di accelerazione e coda che per lo sviluppo dei sottomodelli mesoscopici per lo studio delle intersezioni semaforizzate e non semaforizzate e nei quali sono state evidentemente introdotte alcune semplificazioni per passare da un livello micro ad uno meso.

L'intera modellazione proposta è stata progettata con una struttura ad "hub" ovvero un modello centrale di riferimento per i diversi sottomodelli proposti per diversi casi particolari, quali il sottomodulo per la stima delle intersezioni semaforizzate, quello per le intersezioni non semaforizzate, ecc.

Anche la scelta della scala temporale di riferimento, ovvero numero e dimensione delle finestre temporali di analisi è del tutto generalizzata offrendo la possibilità di effettuare analisi su diversi orizzonti temporali e garantendo una notevole flessibilità.

I modelli proposti (M2 ed M3) sono stati applicati nella rete stradale di Brindisi e in quella del quartiere Eur di Roma.

Le due reti presentano caratteristiche molto diverse tra loro (Tabella 13) in quanto la prima, seppur più estesa, presenta condizioni di congestione bassa ed è caratterizzata da un basso numero di intersezioni semaforizzate e congestionate; viceversa per la rete dell'Eur.

	Tempo di analisi	VHT [h]	VKT [km]	Velocità media [km/h]	Dev. Std velocità [km/h]	Lunghezza della rete [km]
Brindisi	06:00-23:00	14 493	691 907	52.40	7.50	251.50
Eur	06:00-10:00	12 391	293 665	29.90	11.50	91.60

Tabella 13. Confronto tra la rete stradale di Brindisi e quella dell'Eur (Roma)

I valori riportati nella tabella precedente dimostrano una congestione più elevata nella rete dell'Eur rispetto a quella di Brindisi.

I risultati ottenuti nella rete di Brindisi hanno dimostrato che i modelli proposti M2 ed M3 forniscono generalmente una sottostima delle emissioni anche se con valori molto prossimi a quelli forniti dall'approccio macroscopico Corinair. In condizioni di bassa congestione e con bassi valori del rapporto lunghezza di coda-lunghezza d'arco, in ragione della forma caratteristica delle funzioni di emissione specifica un modello macroscopico, basato su valori medi di velocità, fornisce una sovrastima delle emissioni rispetto ai risultati forniti dal modello M2 nel quale l'emissione è stimata come somma del contributo della parte d'arco in congestione e di quella a deflusso libero. Questa sottostima è più marcata nel caso del monossido di carbonio con valori fino al 35% nella rete di Brindisi poco congestionata. Nel caso dell'NOx e del PM10 i valori forniti dal modello M2 sono molto simili a quelli forniti dal modello Corinair.

Sempre nella rete di Brindisi ma con l'applicazione del modello M3 è possibile quasi azzerare la sottostima di CO, grazie alla stima del surplus di emissione legato alle fasi di coda e accelerazione; mentre per l'NOx ed il PM si ottiene una sovrastima dell'ordine del 5% a livello globale. Analizzando le sole intersezioni semaforizzate, poco congestionate, è stato riscontrato il medesimo risultato, ovvero una sottostima di -14% dell'emissione di CO ed una sovrastima di oltre il 60% dell'emissione di NOx e PM.

Nel caso della rete dell'Eur sono stati riscontrati risultati differenti nel caso di utilizzo di un modello a tre stadi in quanto la rete presenta un'elevata incidenza delle intersezioni semaforizzate e un livello di congestione più alto.

Il modello a due stadi fornisce i medesimi risultati riscontrati nel caso della rete di Brindisi ovvero una leggera sottostima delle emissioni inquinanti.

Applicando il modello a tre stadi è stata riscontrata una sovrastima sia per la CO che per gli NOx e per il PM10.

Analizzando le sole intersezioni semaforizzate le differenze aumentano con valori di 36% per la CO, di 122% per gli NOx e di 100% per il PM10. Il risultato è coerente con le aspettative, ovvero in caso di archi corti e congestionati è lecito aspettarsi degli incrementi nella stima delle emissioni.

Dall'analisi delle intersezioni non semaforizzate è emersa ancora una sovrastima del modello a tre stadi rispetto al modello macroscopico Corinair anche se tuttavia il contributo di queste emissioni rappresenta circa il 10% dell'intera stima sulla rete. Con questo non si vuole ridurre l'importanza della modellazione ad-hoc sviluppata per le intersezioni non semaforizzate ma solo evidenziare il loro modesto contributo in rete urbane con molte intersezioni semaforizzate. I valori stimati risultano anche doppi rispetto a quelli stimati da Corinair e in caso di reti congestionate e con pochi impianti semaforici questo contributo potrebbe cambiare significativamente le stime fornite da un approccio macroscopico.

Dall'analisi dei risultati appena riportati si può affermare che il modello a due stadi tende a sottostimare le emissioni inquinanti sia in reti congestionate che in reti poco congestionate contrariamente alle attese. In realtà la spiegazione di questo risultato apparentemente strano risiede nella forma delle funzioni di emissione specifica e nella conseguente necessità di una corretta calibrazione delle stesse le quali giocano un ruolo fondamentale soprattutto in modelli basati esclusivamente su dati aggregati e mediati sull'arco.

Il modello a tre stadi è invece basato sia sulle funzioni di emissione specifica media che su fattori di emissione stimati a partire da un approccio microscopico (VSP). Le emissioni sono computate considerando esplicitamente il surplus legato sia alla fase di accelerazione che di coda; i risultati mostrano che il modello M3 fornisce una sovrastima delle emissioni di NOx e PM ed una molto lieve sottostima di CO in reti non congestionate, mentre in caso di reti congestionate sovrastima le emissioni per i tre inquinanti considerati.

La modellazione proposta è stata inoltre applicata nelle medesime reti per simulare interventi di ottimizzazione. Sulla rete di Brindisi sono stati

ipotizzati degli interventi di traffic management (opt.1), mediante l'ottimizzazione degli impianti semaforici e dei sensi unici; è stato inoltre simulato un miglioramento del parco veicolare circolante con orizzonte 2020 attraverso l'eliminazione dei veicoli più inquinanti (opt.2). Nel primo caso (opt.1) i risultati hanno dimostrato la possibilità teorica e potenziale di ridurre le emissioni fino del 20% di CO e di circa il 12% per l'NOx e per il PM. Nel secondo caso (opt.2) potenzialmente è possibile quasi ridurre del 50% la CO e circa il 30% l'NOx ed il PM a dimostrazione di un parco circolante obsoleto.

Nella rete dell'Eur sono stati proposti tre tipi di interventi di miglioramento: due basati sulla sostituzione rispettivamente delle auto più inquinanti con veicoli elettrici ed ibridi, l'altro basato sull'incremento della ripartizione modale a favore del TPL. I risultati ottenuti mostrano ancora una volta il beneficio indotto dall'eliminazione dei veicoli più inquinanti a favore di veicoli più efficienti con la possibilità teorica di dimezzare l'emissione di CO. Anche un incremento nell'utilizzo del TPL porta ad una riduzione delle emissioni inquinanti fino al 20% della CO.

Molti ancora sono i temi da affrontare nell'ambito della presente ricerca che coinvolge differenti discipline e differenti ambiti anche all'interno della stessa ingegneria dei trasporti; da un lato emerge la necessità futura di sviluppare curve specifiche di emissione ad-hoc basate su dati reali sia ottenuti mediante sperimentazioni di laboratorio che attraverso l'utilizzo di strumentazioni specifiche montate a bordo veicoli per la raccolta di veri e propri dati di telemetria/emissione on-board. Dall'altro si presenta la necessità di affinare la modellazione proposta, verificando su altre reti la robustezza delle soluzioni e ipotesi fatte e di calibrare e validare i valori assunto dalle variabili in gioco.

E' incorso uno studio specifico per le intersezioni semaforizzate e per i corridoi urbani finalizzato al confronto dei risultati forniti da un modello analitico microscopico e quelli forniti da un modello macroscopico anche attraverso l'utilizzo di un diagramma fondamentale macroscopico riferito all'intero boulevard urbano. Il lavoro, ancora incompleto, non è stato riportato in questa sede precisando però l'importanza che questo potrà rivestire negli sviluppi futuri del presente e più ampio lavoro di ricerca.

Akcelic, R., Biggs, D.C. (1987) 'Acceleration profile models for vehicles in road traffic', *Transportation Science*, 21(1), pp36-54, 1987.

Akcelic, R., Besley, M., Roper, R. (1999) 'Fundamental relationship for traffic flows at signalized intersection'. *ARRB Transportation research - Research Report ARR340*, 1999.

Bai, S., Chiu, Y., Niemeier, D.A.: 'A comparative analysis of using trip-based versus link-based traffic data for regional mobile source emissions estimation', *Atmospheric Environment*, 2007, 41, pp 7512–7523

Bai, S., Chiu, Y., Niemeier, D.A.: 'Using Dynamic Assignment to improve regional mobile emissions estimation', *Proc. Int. Conf. 87th annual meeting of Transportation Research Board*, Washington D.C., January 2008

Barth, M., Scora, G. and Younglove T.: 'Estimating emissions and fuel consumption for different levels of freeway congestion', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* N. 1664, 1999, pp.47-57

B. Montella: 'Pianificazione e controllo del traffico urbano. Modelli e metodi'. CUEN, 1996.

E. Cascetta: "Modelli per i sistemi di trasporto, teoria e applicazioni", Utet 2006

Cantarella, G.E., Vitetta, A. (2010). *La regolazione di intersezioni stradali semaforizzate-Metodi e applicazioni*, FrancoAngeli Editore, Milano, 2010.

Cipriani, E., Florian, M., Mahut, M., Nigro, M.: 'A gradient approximation approach for adjusting temporal origin-destination matrices'. *Transportation research. Part c, emerging technologies*, vol. 19, p. 270-282, 2011, ISSN: 0968-090X, doi: 10.1016/j.trc.2010.05.013

Di Gangi, M., Mussone, L. (2010). *Progettazione e verifica funzionale delle intersezioni semaforizzate*. Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, Italy.

EEA Technical report, *EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009*, updated June 2010, <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>.

EEA Technical report (2011), *Air quality in Europe — 2011 report*, <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2011>, accessed September 2012

EEA Technical report (2011), *Greenhouse gas emissions in Europe: a retrospective trend analysis for the period 1990–2008*, <http://www.eea.europa.eu/publications/ghg-retrospective-trend-analysis-1990-2008>, accessed September 2012

Florian, M., Mahut, M., Tremblay, N. (2006) ‘A simulation based dynamic traffic assignment: the model, solution algorithm and applications’. Proceedings of the *International Symposium of Transport Simulation* ISTS06. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2006.

Gkatzofglia, D., Kouridis, C., Ntziachristos, L.: ‘Copert 4, Computer programme to calculate emissions from road transport, User manual’, 2007

Gori, S., La Spada, S., Mannini, L., Nigro, M. (2012a) ‘An emission dynamic meso-simulation model to evaluate traffic strategies in a wide urban network’. Proceedings of the *19th ITS World Congress*, Vienna, Austria, October 2012.

Gori, S., La Spada, S., Mannini, L., Nigro, M. (2012b) ‘Within-Day Dynamic Estimation of Pollutant Emissions: a Procedure for Wide Urban Network’. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 54 (2012) 312 – 322.

Gori, S., La Spada, S., Mannini, L., Nigro, M. (2012c) ‘A dynamic mesoscopic emission model for signalized intersections’. Submitted for the *16th IEEE ITSC Conference*.

Highway Capacity Manual 2010 (HCM2010). Transportation Research Board.

Hussein Dia, Sakda Panwai, Noppakun Boongrapue, Tu Ton and Nariida Smith (2006). ‘Comparative Evaluation of Power-Based Environmental Emissions Models’. Proceedings of the *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. Toronto, Canada, September 17-20, 2006.

Li, J.Q., Gupta, S.D., Zhang, L., Zhou, K., Zhang, W. (2012) 'Evaluate Bus emissions generated near far-side and near-side stops and potential reductions by ITS: an empirical study'. *Transportation Research Part D* 17 (2012) 73-77.

Liao, T., Ho, W., Hu, T. (2012). 'Fuel Consumption and Emission Models Development and Application for Advanced Traffic Management Strategies'. Proceeding of *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Anchorage, Alaska, USA, September 16-19, 2012.

Lin, J., Yi-Chang Chiu, Vallamsundar, S., Bai, S. (2011). 'Integration of MOVES and Dynamic Traffic Assignment Models for Fine-Grained Transportation and Air Quality Analyses'. Proceedings of *IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*. Vienna, Austria, June 29 - July 1, 2011.

Lumbreras, J., Valdes, M., Borge, R., Rodriguez M.E.: 'Assessment of vehicle emissions projections in Madrid (Spain) from 2004 to 2012 considering several conditions strategies', 2007, Technical University of Madrid (UPM)

Kraschl-Hirschmann, K., Zallinger, M., Luz, R., Fellendorf, M., Hausberger, S. (2011) 'A method for emission estimation for microscopic traffic flow simulation'. Proceeding of *IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*. Vienna, Austria, June 29 - July 1, 2011.

Kraschl-Hirschmann, K., Zallinger, M., Luz, R., Fellendorf, M., Hausberger, S. (2010) 'A New Method to Calculate Emissions with Simulated Traffic Conditions'. Proceeding of *13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*. Madeira Island, Portugal, September 19-22, 2010.

H. Rakha, Y. Ding, (2003) "Impacts of stops on vehicle fuel consumption and emissions", *Journal of Transportation Engineering*, Vo 129, Issue 1, pp.23-32

Rouphail, N.M., Frey, H. C., Colyar, J. D., Unal A.: 'Vehicle emissions and traffic measures: exploratory analysis of field observations at signalized arterials', 2001, 80th annual meeting of TRB

Shukla, A., Alam M.: ‘Assessment of real world on-road vehicle emissions under dynamic urban traffic conditions in Delhi’, *International Journal of Urban Sciences*, 14 (2), 2010

R. Smit, M. Poelman, J. Schrijver, “Improved road traffic emissions inventories by adding mean speed distributions”, *Elsevier atmospheric environment* 42 (2008) 916-926

Song, G., Yu, L., Zhang, Y.: ‘Applicability of Traffic Microsimulation Models in Vehicle Emissions Estimates’ *Transportation Research Record*:

Stevanovic, A., Stevanovic, J., Zhang, K., Batterman S. (2009), “Optimizing traffic control to reduce fuel consumption and vehicular emissions”, *Transportation Research Record: Journal of the transportation research board* No.2128, pp.105-113

Journal of the Transportation Research Board, No. 2270, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012, pp. 132–141

Viti, F., Hoogendoorn, S., Van Zuylen, H., Wilmlink, I., Van Arem B.: ‘Speed and acceleration distributions at a traffic signal analyzed from microscopic real and simulated data’, 11th international IEEE conference on ITS, 2008

Yue, H., Rakha, H.: ‘Validation of the VT-Meso vehicle fuel consumption and emission model, *Efficient Transportation and Pavement Systems*’, Al-Qadi, Sayed, Alnuaimi & Masad (eds), 2009 Taylor & Francis Group, London

Zhai, H., Frey, H.C., Roupail, N.M. (2008) ‘A vehicle-specific power emissions estimates for diesel transit buses’. *Environmental Science and Technology* 42, 7985-7991, 2008.

Zhang, B., Shang, L., Chen, D. (2009) ‘A Study on the Traffic Intersection Vehicle Emission Base on Urban Microscopic Traffic Simulation Model’. *Proceeding of First International Workshop on Education Technology and Computer Science*.

Ringraziamenti

In queste poche righe vorrei ringraziare tutte le persone che mi sono state vicine in questi tre anni e non solo.

Un ringraziamento particolare al Prof. Stefano Carrese per la sua guida, disponibilità, professionalità e per la sua grande umanità dimostrata nel corso degli anni.

Un ringraziamento speciale al Prof. Stefano Gori e all'Ing. Marialisa Nigro per il loro prezioso contributo teorico e pratico, per la loro immensa disponibilità e per fiducia mostrata nei miei confronti.

Vorrei ringraziare i miei colleghi e amici di laboratorio Andrea, Francesco e Livia con i quali ho avuto il piacere di trascorrere questi ultimi tre anni, crescendo non solo professionalmente ma soprattutto umanamente.

Infine un sincero ringraziamento alla mia famiglia, che mi è sempre stata vicino in ogni mia scelta, sostenendomi nei momenti più difficili e gioendo con me in quelli più belli.