Università degli studi ROMA TRE

Dottorato di ricerca in Scienze dell'Ingegneria Civile
XX Ciclo

Tesi di Dottorato

Modelli ed algoritmi per l'assegnazione di traffico secondo criteri di ottimizzazione delle emissioni veicolari

Dottorando: Francisco de Borja Beltran Belles

Docente guida: Prof. Stefano Carrese

Coordinatore del dottorato: Prof. Leopoldo Franco

Roma, Febbraio 2008

Collana delle tesi di Dottorato di Ricerca
In Scienze dell'Ingegneria Civile
Università degli Studi Roma Tre
Tesi n° 16

Sommario

La mobilità sostenibile è un tema emergente nelle attuali politiche di pianificazione dei trasporti dal livello urbano a quello extraurbano come conseguenza dell'aumento degli impatti sull'ambiente dei sistemi di trasporto. Con sostenibilità si intende un insieme di azioni proposte al fine di migliorare il sistema senza compromettere lo svolgimento normale delle attività. I trasporti ambientalmente compatibili (EST: Environmentally Sustainable Transportation) sono i trasporti che senza danneggiare la salute pubblica e l'ecosistema riescono a soddisfare l'accessibilità. Nel panorama internazionale sono frequenti interventi sulla mobilità e misure straordinarie di gestione della circolazione veicolare finalizzati al contenimento ed alla riduzione delle emissioni. La ricerca propone l'investigazione su modelli di equilibrio e metodi di assegnazione al fine di sviluppare algoritmi per l'ottimizzazione della circolazione stradale secondo un criterio di minime emissioni ambientali, prevedendo in particolare politiche tariffarie della circolazione su tratte della rete stradale

La gran parte degli approcci disponibili in letteratura propongono l'utilizzo di strumenti di simulazione (ISHTAR, PROPOLIS,..) delle diverse politiche di trasporto mediante l'integrazione di programmi consolidati i di risoluzione dei problemi di traffico e delle emissioni. Nonostante questi studi abbiano livelli di dettaglio molto elevati, è riconosciuta la mancanza di modelli matematici per la determinazione delle politiche ottimali. Programmi matematici e modelli di ottimizzazioni sono stati utilizzati per la risoluzione dei problemi di congestion pricing e per risolvere il problema di assegnazione di traffico.

L'obiettivo di questo lavoro è proporre un problema di ottimizzazione e risolverlo mediante tecniche di programmazione matematica basate su programmazione bi-livello. L'utilità di tali modelli è la possibilità di risolvere il classico problema di assegnazione all'equilibrio statico incorporando il calcolo e l'ottimizzazione delle emissioni e delle concentrazioni di inquinanti dai sistemi di trasporto in una rete. La struttura bi-livello è composta di due problemi di ottimizzazione, il problema di livello superiore e il problema di livello inferiore. Il problema di livello superiore rappresenta i criteri di decisioni dei gestori della rete che desiderano una rete di trasporto 'sostenibile', mentre il problema di

livello inferiore rappresenta le decisioni degli utenti che scelgono il loro cammino in modo di minimizzare il loro costo. Nel livello superiore sono inclusi gli impatti dovuti alla congestione sulla qualità dell'aria e integrate nella programmazione con l'obiettivo di valutare differenti politiche ed interventi. I modelli sono stati applicati a una rete di test ipotetica ma realistica e risolti tramite il solver GAMS in diverse condizioni di traffico condizioni e meteorologiche. Finalmente il programma ottenuto è stato integrato tramite una macro nel software commerciale di assegnazione TransCad attraverso un eseguibile realizzato in Matlab che serve di connettore fra GAMS e TransCad.

Il lavoro ha prodotto un modello abbastanza robusto da poter, senza troppa difficoltà, testare diverse politiche di gestione del traffico con l'obiettivo di ridurre l'emissioni di inquinanti generate dai sistemi di trasporto su una rete de piccola media dimensione. Fra le possibili strategie a disposizione si è valutata l'introduzione di alcuni schemi di tariffazione dove si è calcolato il pedaggio ottimale da applicare per diminuire le emissioni e il problema di allocazione ottimale di un quantitativo di capacità nella rete.

I risultati di questi modelli e le analisi comparative mostrano la potenzialità dei modelli e degli algoritmi di risoluzione per la valutazione di strategie, anche per raggiungere obiettivi che non riguardino le problematiche ambientali. I modelli sembrano adatti anche per essere applicati in altre tipologie di problemi e di conseguenza, oltre ai risultati ottenuti, risulta particolarmente interessante l'approccio adottato durante il lavoro di ricerca.

Abstract

Since the transport system impacts on the environment are increasing, more attention mobility is given to sustainable in the transport planning policies of both at the urban and extra-urban level. The sustainable mobility policies are aimed at improving the system without interfering with the normal activities. The Environmentally Sustainable Transportation (EST) should not damage public health and ecosystem and met the specification of accessibility. In the international outlook several examples are available on the mobility and extraordinary measures of traffic managing focused on the reduction of the emissions.

Despite all studies dealing with sustainability, there seems to be a lack of mathematical programming models to identify optimal strategies or policies. This research proposes models and conventional mathematical programs in order to solve classical transportation problems such as optimal toll problems or traffic assignment and useful to approach our environmental problems.

In our research we have proposed a bi-level structure for several optimization models and a set of algorithms to solve them. The contribution of the research is the possibility of integrating emission measurements of pollutants through a transportation network. The upper level problem of bi-level defines the decisions of transportation network manager who aims to optimize the transportation network, whereas the lower problem represent the user's decisions that seek to minimize their total travel costs. The objective is to minimize the total emissions of transportation network where users choice their routes according to a user equilibrium.

We conduct a computational effort with state of art solvers to find a solution on a test network to solve traffic user equilibrium and bi-level problem. The research ends with a discussion of solution and used approach as well as an interpretation of the results.

Indice

ELENCO DELLE FIGURE ..... **VIII**

ELENCO DELLE TABELLE ..... **XI**

ELENCO DEI SIMBOLI ..... **XIV**

1. INTRODUZIONE **1**

1.1. INQUINAMENTO AMBIENTALE DEI SISTEMI DI TRASPORTO: IL PESO DEI TRASPORTI NEI CONSUMI ED NELLE EMISSIONI 4
1.2. MOBILITÀ SOSTENIBILE: CONGESTIONE ED INQUINAMENTO AMBIENTALE 22
1.3. CONGESTION PRICING 30
1.4. OBIETTIVI DELLA RICERCA 39

2. RELAZIONI FRA I MODELLI DI TRAFFICO E I MODELLI DI EMISSIONE **41**

2.1. MODELLI PER IL PROBLEMA DELL'ASSEGNAZIONE DI TRAFFICO 41
2.1.1. CONDIZIONI DI EQUILIBRIO DI WARDROP 42
2.2. FORMALIZZAZIONE MATEMATICA DELL'EQUILIBRIO DELL'UTENTE 47
2.3. MODELLO DI EQUILIBRIO GENERALE E DEFINIZIONI ALTERNATIVE DI EQUILIBRIO 53
2.4. APPROCCI ANALITICI PER LO STUDIO INTEGRATO DEI SISTEMI DI TRASPORTO 56
2.5. PROGRAMMAZIONE BI-LIVELLO 61
2.6. PROGRAMMI MATEMATICI CON VINCOLI DI EQUILIBRIO (MPEC) 63

3. MODELLO DI OTTIMIZZAZIONE DELLE EMISSIONI SU RETE **66**

3.1. MODELLI DI STIMA DELLE EMISSIONI DI TRASPORTO: LE FUNZIONI DI EMISSIONI. 66
3.2. RISOLUZIONE DEL PROBLEMA DI ASSEGNAZIONE 83
3.3. GESTIONE DELLA CONGESTIONE: PROBLEMI DEI PEDAGGI E RISOLUZIONE DEL PROBLEMA BLP DEI PEDAGGI OTTIMALI 88
3.4. ENVIRONMENTAL EQUILIBRIUM ASSIGNEMENT 90
3.5. ESTENSIONE DEL MODELLO 93
3.6. RISOLUZIONE DEL PROBLEMA BI-LIVELLO MEDIANTE L'APPLICAZIONE DI ALGORITMI MPEC 96

4. APPLICAZIONI E RISULTATI DEI MODELLI PROPOSTI **99**

4.1. CARATTERISTICHE DELLA RETE DI TEST 99
4.2. PROBLEMA DI MASSIMO RICAVO DEI PEDAGGI 100
4.3. APPLICAZIONE DEL MODELLO DE ASSEGNAZIONE AMBIENTALE EEA (ENVIRONMENTAL EQUILIBRIUM ASSIGNEMENT) 107
4.4. PROBLEMA DEL MIGLIORAMENTO DI CAPACITÀ SULLA RETE 110

4.5. RISULTATI NUMERICI E ANALISI 111

5. CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI **..... 113**

6. BIBLIOGRAFIA **..... 116**

Elenco delle figure

1	*Andamento dei passaggeri km in Europa (Fonte ECMT)*	*2*
2	*Andamento del consumo di energia primaria in Italia (TPES, total primari energy sources) e delle emissioni inquinanti e di gas serra (GHG, greenhouse gases). FONTE: APAT*	*6*
3	*Emissioni di PM10 in Italia (fonte: APAT)*	*7*
4	*Distribuzione percentuale delle emissioni inquinanti per settore*	*8*
5	*Distribuzione percentuale delle emissioni di PM10 per settore nell'anno 2003*	
6	*Distribuzione delle emissioni di PM10 per il settore trasporti su strada in tonnellate*	*11*
7	*Numero totale di veicoli circolanti in Italia (1990-2003) (fonte: elaborazione ENEA su dati ACI)*	*13*
8	*Parco circolante autovetture in base all'alimentazione (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati ACI)*	*13*
9	*Parco circolante veicoli commerciali leggeri in base all'alimentazione (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati ACI)*	*14*
10	*Parco circolante veicoli commerciali pesanti, bus urbani e bus extraurbani (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati ACI)*	*15*
11	*Parco circolante veicoli in base all'alimentazione (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati ACI)*	*16*

12	*Emissioni di PM da trasporto stradale. Ciclo di guida urbano (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati APAT)*	*20*
13	*Emissioni di PM attribuite alle autovetture passeggeri (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati APAT)*	*20*
14	*Emissioni di PM attribuite ai veicoli commerciali leggeri (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati APAT)*	*20*
15	*Emissioni di PM attribuite ai veicoli commerciali pesanti (1990-2003)*	*22*
16	*Emissioni di PM attribuite ai bus urbani ed extraurbani (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati APAT)*	*22*
17	*Emissioni di PM attribuite ai veicoli a due ruote (1990-2003)*	*22*
18	*Sviluppo della sostenibilità massimizza l'efficienza con scarsi livelli di consumo*	*23*
19	*Componenti della sostenibilità*	*24*
20	*Indicatori e livello di analisi (Fonte Litman, 2008)*	*21*
21	*Elenco delle strategie a diposizione del pianificatore*	*22*
22	*Ottimale road pricing in un modello indipendente del tempo*	*32*
23	*Zona centro di Londra*	*38*
24	*Medie dei fattori di emissione in funzione della velocità con il peso lordo del veicolo*	*82*
25	*velocità media di un veicolo in funzione del rapporto f/C*	*91*
26	*Emissioni totali in una arco in relazione al flusso di traffico*	*92*

27	*Un esempio possibile di introduzione di una politica di zone pricing*	*94*
28	*Emissioni sulla rete Sioux Falls*	*98*
29	*Scenario TO senza pedaggi*	*99*
30	*Scenario T1 con tre pedaggi*	*99*
31	*Scenario T2 con restrizione degli accessi alla zona centrale della rete*	*100*
32	*Flusso nello scenario T0*	*100*
33	*Emissione nello scenarioT0*	*101*
34	*Flusso nello scenario T1*	*103*
35	*Emissione nello scenario T1*	*103*
36	*Flusso dello scenario T2*	*104*
37	*Emissioni nello scenario T2*	*104*
38	*Flussi di traffico nello scenario S1*	*106*
39	*Emissioni nello scenario S1*	*106*
40	*Flussi di traffico nello scenario S2*	*107*
41	*Emissioni nello scenario S2*	*107*

Elenco delle tabelle

1	*Serie storica nazionale delle emissioni di PM10 per settore in tonnellate (1990-2003)*	*6*
2	*Sorgenti principali in relazione al peso percentuale delle emissioni specifiche di PM10 sul totale (fonte: APAT)*	*11*
3	*Componenti della sostenibilità*	*25*
4	*Impatti dei sistemi di trasporto*	*26*
5	*Incassi del congestion charging di Londra*	*39*
6	*Metodi di calcolo utilizzati per la stima delle emissioni*	*70*
7	*Dipendenza dalla velocità delle emissioni di CO per autoveicoli a*	*72*
8	*Dipendenza delle emissioni VOC dalla velocità per autoveicoli a benzina*	*73*
9	*Dipendenza delle emissioni di NOx dalla velocità per veicoli a benzina*	*74*
10	*Dipendenza delle emissioni di CO2 dalla velocità per autoveicoli a benzina*	*75*
11	*Variazione dei vari inquinanti per veicoli diesel < 2.5 t.*	*75*
12	*Dipendenza dei vari inquinanti per veicoli disel che soddisfano la direttiva EURO 1*	*76*
13	*Dipendenza dei fattori di emissione per autoveicoli alimentati a GPL < 2.5 t*	*76*
14	*Dipendenza dei fattori di emissione per veicoli alimentati a GPL < 2.5 t. che soddisfano la direttiva EURO 1*	*77*

15	*Dipendenza dalla velocità dei fattori di emissione per i veicoli alimentati a benzina < 3.5 t.*	*77*
16	*Dipendenza dei fattori di emissione per veicoli diesel < 3.5 t.*	*77*
17	*Coefficienti di riduzione in % per i veicoli EURO 2, EURO3 e EURO4*	*77*
18	*Coefficienti per i fattori di emissione per i veicoli da trasporto con peso lordo compreso tra 3.5 – 7.5 tonnellate*	*80*
19	*Coefficienti per i fattori di emissione per i veicoli da trasporto con peso lordo compreso tra 7.5 – 16 tonnellate*	*80*
20	*Coefficienti per i fattori di emissione per i veicoli da trasporto con peso lordo compreso tra 16– 32 tonnellate*	*80*
21	*Coefficienti per i fattori di emissione per i veicoli da trasporto con peso lordo compreso tra 32– 40 tonnellate*	*81*
22	*Coefficienti di emissione per autobus urbani*	*81*
23	*Coefficienti di emissione per bus extra urbani*	*81*
24	*Coefficienti di emissione per veicoli peso lordo > di 40 tonnellate*	*81*
25	*Risultati del problema di massimo ricavo*	*102*
26	*Tariffe ottimali scenario T1*	*102*
27	*Tariffe ottimali scenario T2*	*102*
28	*Risultati del problema di massimo ricavo e minima emissione*	*105*
29	*Tariffe ottimali scenario S1*	*108*
30	*Tariffe ottimali scenario S2*	*109*

30 Miglioramento di capacità

110

Elenco dei simboli

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

a	*Accesso/indice arco*
d	*Flusso, domanda*
f	*Flusso d'arco*
H	*Flusso del percorso*
i	*Indice classe di utente*
k	*Indice di percorso*
t	*Costo di arco*
Z	*Costo del percorso*
δ	*Matrice di incidenza arco-percorso*
$G = (N, A)$	*Rete definita dall'insieme di archi e nodi*
P,Q,C	*Insieme degli origini, destinazioni e coppie OD*
W_i, V_i	*Insieme di nodi iniziati e finiti nel nodo i*
R_{pq}	*Insieme di percorsi dal nodo p al nodo q*
$\Delta^T = \delta_{pqra}$	*Matrice di incidenza arco-percorso*
$A = (a_{ib})$	*Matrice di incidenza nodo-arco*
O_p, D_q	*Domanda in origine p e destinazione q*
$d = (d_{pq})$	*Domanda fissa*

$h = h_{pqr}$	*Flusso percorso*
$f = (f_a), f = (f_{ij})$*Flusso*	*Flusso totale di arco.*
$f_{pq} = (f_{pqk})$	*Flusso sull'arco della componente k*
$f = \sum_{k \in C} f_k$	*Flusso totale di arco*
H_d	*Insieme di domanda fattibile e flussi di percorso*
F^r	*Insieme di flusso di arco fattibile nella rappresentazione arco-percorso*
F^n	*Insieme di flusso di arco fattibile nella rappresentazione arco-nodo*
$g = (g_{pq})$	*Funzione di domanda*
$c = (c_{pqr})$	*Costo del cammino r*
$\pi = (\pi_{pq})$	*Costo del cammino minimo*
$t = (t_a)$	*Costo dell'arco a*
$\bar{t} = (\bar{t}_a)$	*Costo marginale dell'arco a*
R^*_{pq}	*Percorsi di equilibrio*
d^*	*Domanda all' equilibrio*
H^*	*Flusso di percorso all'equilibrio*
f^*	*Flusso di arco all'equilibrio*
$\mathbb{R}_{++}$	*Insieme dei numeri reali positivi*

1. Introduzione

Il problema della sostenibilità ambientale è affrontato dalla gran parte delle città e dei centri urbani abitati con approcci qualora analitici e più spesso con discutibili metodologie, adottate nella disperazione di trovare una soluzione di compromesso per affrontare gli episodi di emergenza ambientale e discutibile funzionamento.
Il problema del traffico nei centri cittadini si traduce in maggiori tempi di percorrenza che producono fenomeni di congestione e incremento delle emissioni e delle concentrazioni di inquinanti in atmosfera. L'aumento dell'inquinamento in città ha raggiunto tali livelli di preoccupazione da essere messo al centro dell'attenzione delle autorità nazionali ed europee. La preoccupazione dettata dai superamenti dei livelli di norma spinge le autorità locali, responsabili legalmente dalla ripercussioni dell'inquinamento ambientale sulla salute dei cittadini, ad studiare piani di emergenza quali la chiusura dei centri o l'introduzione delle targhe alterne.
I motori a combustione convenzionali sono fra le maggiori cause di inquinamento, in particolare di monossido di carbonio, CO (66%), idrocarburi (48%), ossidi di azoto, NOx (37%)(ECTM,2004) . Questa situazione rischia di perdurare negli anni avenire nonostante gli sforzi da parte dalle Autorità, tanto a livello regionale che nazionale, mediante incentivi nella ricerca su motori di propulsione sempre più ecologici e standard di emissione più restringenti. La principale causa di questo fenomeno si osserva dall'analisi dei trend del numero di passeggeri e di monte chilometri percorsi.

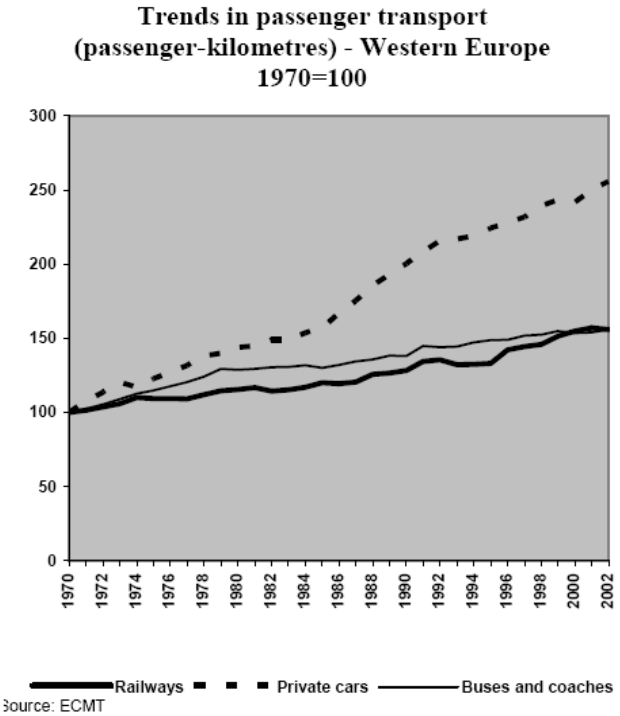

Figura 1: Andamento dei passaggeri km in Europa (Fonte ECMT)

L'approccio proposto per lo studio dei problemi di pianificazione dei trasporti e pianificazione della qualità dell'aria proposti sia dalla National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) e dell'Environment European Agency (EEA) richiedono un approccio integrato della pianificazione dei trasporti e della qualità dell'aria. L'interazione fra i due sistemi è cosi stretta da essere necessario uno sviluppo in parallelo dei due sistemi con strutture di studi e simulazione che permettano una procedura di feedback per valutare le conseguenze dei cambiamenti di uno dei due sistemi sull'altro. Questo approccio differisce di molto da quello delle valutazioni di impatto ambientale dove la ricaduta ambientale di una nuova infrastruttura, o più in generale di una qualunque modifica sulla rete, è valutata solo a valle dello studio del traffico. Il presente lavoro pretende di analizzare in un unico approccio lo studio dei due sistemi mettendo in evidenza i legami esistenti fra le emissioni, il flusso e le velocità.

Non sono numerosi i riferimenti in letteratura dove sia stato considerato un approccio di questo genere. L'approccio trasportistico tradizionale non considera nella funzione obiettivo alcun riferimento all'aspetto ambientale ed in particolare alle emissioni. La formulazione classica

propone per il calcolo dell'assegnazione del traffico veicolare di minimizzare il tempo totale o il tempo medio di spostamento. Poiché esiste una complessa interazione fra la capacità della rete, flusso, velocità e emissioni di inquinanti, è necessario un approccio integrato che tenga conto degli obiettivi ambientali e i tradizionali obiettivi economici di efficienza.

L'obiettivo del presente lavoro è presentare un modello matematico integrato destinato a quantificare e valutare l'efficienza delle politiche indirizzate al miglioramento della qualità dell'aria e mostrare l'utilità di un tale approccio mediante l'applicazione ad una ipotetica rete di trasporto.

Lo sviluppo di sistemi di trasporto sostenibili è una area di ricerca di interesse nazionale e molti sforzi sono stati dedicati negli ultimi anni. In questi studi, la congestione da traffico (impatti economici) e l'inquinamento (impatti ambientale) dei sistemi di trasporto sono al centro della attenzione. L'obiettivo di questi studi è alleviare la congestione e l'emissione tramite l'uso di diversi metodi e politiche. La gran parte di questi lavori propone approcci basati sulla simulazione per la valutazione delle politiche di trasporto. Un esempio di modello integrato è ISHTAR, progetto europeo finanziato nel VPQ e dove hanno partecipato diversi fornitori di software come VISUM o SoundPlan e coordinato da ENEA. ISHTAR è un strumento di simulazione progettato per assistere nel processo di decisioni sulla efficacia ed efficienza di diverse politiche di trasporto e qualità dell'aria mediante l'integrazione di strumenti per la pianificazione dei trasporti (VISUM) e una catena modellistica adatta a simulare le emissioni di inquinanti (TEE) e la loro dispersione in atmosfera (ARIA).

Esistono in letteratura anche studi che sfruttano strumenti di programmazione matematica. Fra questi studi si trova una collezione di modelli analitici che possono essere usati per la valutazione e mantenimento della sostenibilità. Haurie (2003) ha proposto un sistema integrato per la valutazione dei sistemi energetici fra i quali considera i sistemi di trasporto. Il modello proposto permette di accoppiare due modelli complementari che operano a scale spaziali e temporali diverse. Questo approccio che considera insieme la struttura fisico-chimica e tecnico-economica dei problemi di controllo dell'inquinamento permette una valutazione intuitiva delle strategie di abbattimento dell'inquinamento ambientale.

Nella valutazione degli impatti considera anche le sorgenti fisse e il modello MARKAL (haurie et al, 1992) può essere applicato a diverse scala da urbana fino regionale. Il modello di traffico risolve l'equilibrio dell'utente fornendo i carichi su ogni segmento della rete data una matrice Origine – Destinazione. Le emissioni sono poi determinate tramite l'uso di funzioni in base alla velocità calcolate dall'assegnazione di traffico e servono per l'applicazione del modello di dispersione integrato nel programma. Nargurney introduce per la prima volta il termine 'emissioni pricing' (Nargurney et al, 2001) che definisce la tariffa per il passaggio di un veicolo in un arco in modo che un predeterminato livello di emissioni non sia superato. Nagurney (Nargurney et al, 1998)propone anche in questo campo diversi modelli con l'introduzione di elementari fattori di emissione e vincoli emissivi per la risoluzione dell'equilibrio (Nargurney et al, 2001).
Il documento di questa tesi è organizzato come segue. Il capitolo 2 offre una visione dello stato dell'arte relativo ai modelli di traffico esistenti e in particolare i modelli riguardanti la risoluzione dell'equilibrio dell'utente e sulle metodologie esistenti per l'analisi delle emissioni di inquinanti dai sistemi di trasporto. Il capitolo 3 illustra la struttura del modello e dei suoi componenti e l'algoritmo risolutivo. Nel capitolo 4 saranno analizzate le applicazioni del modello sulla rete scelta. Le conclusioni e le future aree di ricerca saranno presentate nel capitolo 5.

1.1. Inquinamento ambientale dei sistemi di trasporto: il peso dei trasporti nei consumi ed nelle emissioni

Una fonte importante di incertezza nel settore dell'inquinamento da traffico è rappresentata dalle emissioni di particolato dall'usura di freni, pneumatici e manto stradale, per le quali nell'inventario nazionale delle emissioni è stata utilizzata la metodologia proposta nell'ultima edizione del Guidebook EEA (EMEP/CORINAIR, 2007).
Dato il rilevante peso delle emissioni da traffico in aree densamente popolate come i centri urbani italiani, è di grande importanza la diminuzione delle incertezze nelle stime delle emissioni da traffico.
Oltre alle carenze in seguito discusse sul bilancio dei carburanti consumati a scala locale, di grande importanza per valutare il trend delle

emissioni, si segnalano i seguenti punti critici nei dati utilizzati per la stima delle emissioni da traffico:

- carenze nei dati dei flussi di traffico, in quanto le misure dei flussi e le matrici Origine/Destinazione sono spesso parziali, e poco precise per i mezzi pesanti;
- incertezza del modello di assegnazione dei flussi, in particolare nel modellizzare spostamenti non sistematici o per i veicoli commerciali leggeri e pesanti;
- incertezza nella velocità di percorrenza media degli archi, in quanto i dati forniti dai modelli di traffico non sarebbero direttamente da utilizzare come input alle curve dei fattori di emissione COPERT (2) (Samaras, 2000), che si basano su velocità medie di specifici cicli di guida;
- incertezza nella velocità di percorrenza effettiva dei tratti stradali, in quanto le curve di deflusso spesso non sono in grado di descrivere le velocità effettive delle strade italiane, o la presenza di code in una buona parte della rete stradale;
- incertezza nelle curve di distribuzione temporale dei flussi di traffico, di grande importanza per la stima delle emissioni annue;
- incertezza nelle percorrenze dei veicoli in funzione della loro età e cilindrata, e delle percorrenze urbane per quanto riguarda la stima delle emissioni a freddo;
- a tutto questo va aggiunto che i fattori di emissione COPERT non tengono conto delle fasi di accelerazione/decelerazione che, soprattutto in condizioni di traffico congestionato (e quindi per valutazione delle emissioni su scala locale in aree urbane) possono avere una influenza non trascurabile sulle quantità di inquinanti emesse.

La Figura 2 riporta i numeri indice del consumo di fonti primarie e delle emissioni in atmosfera dei principali inquinanti e dei gas serra in Italia dal 1990 al 2003.

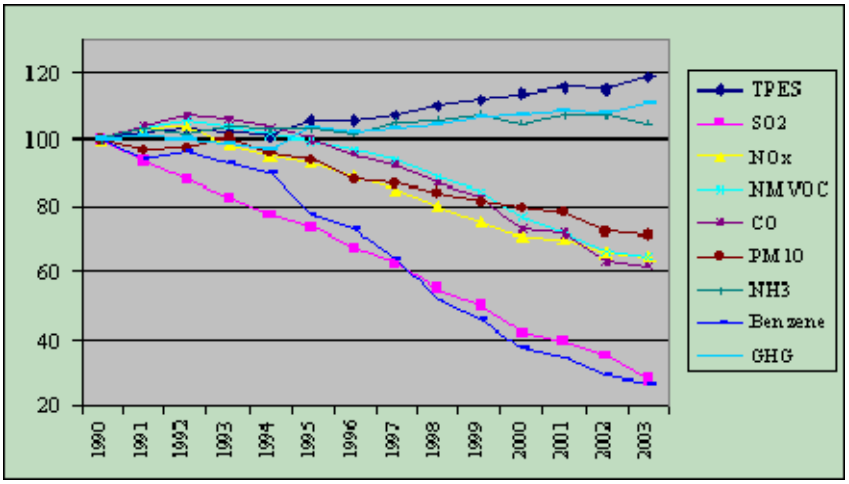

Figura 2:Andamento del consumo di energia primaria in Italia (TPES, total primari energy sources) e delle emissioni inquinanti e di gas serra (GHG, greenhouse gases). FONTE: APAT

La serie storica delle emissioni di PM10 dal 1990 al 2003 è riportata nella Tabella 1 e in Figura 3. La stima delle emissioni nell'inventario nazionale prevede la quantificazione della dose emissiva da oltre 40 attività e processi produttivi; l'aggregazione dei livelli delle emissioni in solo 5 settori rappresentativi è stata scelta al fine di semplificare l'esposizione dei risultati.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Produzione energia	44.842	43.766	43.077	42.834	42.695	38.986	32.975	28.072	25.266	21.152	18.272	16.176	12.060	7.678
Industria	62.381	60.301	59.076	56.795	56.346	58.541	54.344	49.608	47.617	46.810	46.406	45.679	44.677	46.097
Residenziale e terziario	13.896	15.030	15.857	14.612	16.162	16.248	15.629	17.582	16.820	19.135	19.989	20.931	17.233	18.475
Trasporti	98.081	96.320	99.343	100.956	98.046	96.434	94.973	93.813	92.312	90.934	87.078	87.700	85.151	84.548
Agricoltura e foreste	22.705	19.061	19.031	27.302	18.899	16.535	14.941	20.549	21.098	19.144	20.803	18.593	16.372	15.913
Totale	**241.905**	**234.479**	**236.383**	**242.499**	**232.149**	**226.743**	**212.863**	**209.625**	**203.114**	**197.175**	**192.548**	**189.079**	**175.493**	**172.710**

Tabella 1: Serie storica nazionale delle emissioni di PM10 per settore in tonnellate (1990-2003) FONTE APAT

Dai valori riportati si nota una diminuzione della quantità totale di emissione di PM10, dal 1990 al 2003, di circa il 29%, passando da 242.000 a 173.000 tonnellate circa. Il decremento si osserva in tutti i settori, escluso quello residenziale e terziario.

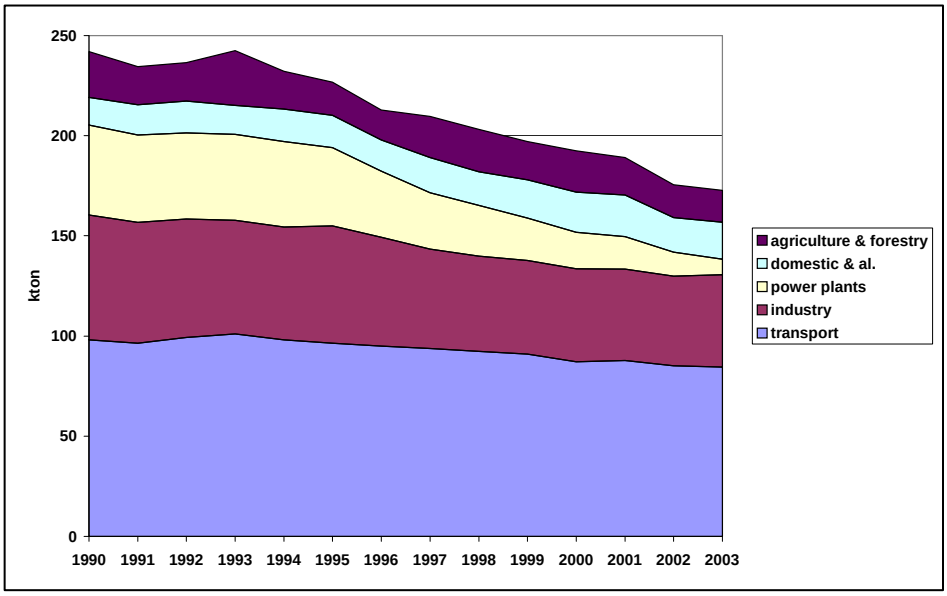

Figura 3: Emissioni di PM10 in Italia (fonte: APAT)

La riduzione delle emissioni nazionali si è verificata principalmente nel settore della produzione di energia, con una diminuzione dell'83%; in questo settore sono incluse le emissioni derivanti dalla combustione per la produzione di energia elettrica e le emissioni dell'industria di trasformazione. La riduzione è dovuta, per la quasi totalità, all'applicazione della normativa per il rispetto dei limiti di emissione di particolato dai grandi impianti di produzione energetica (DM12/07/1990) ed in particolare attraverso l'utilizzo di combustibili migliori e di nuove e più efficienti tecnologie di abbattimento delle emissioni. Seguono il settore dell'agricoltura e delle foreste (-30%), che include le emissioni da combustione di stoppie e di rifiuti sia agricoli che di origine urbana, degli incendi forestali, l'industria (-26%), le cui emissioni sono dovute sia alla fase di combustione che di processo. Il settore dei trasporti (-14%), è quello più importante dal punto di vista delle emissioni di PM10; nel totale del settore sono riportate oltre alle emissioni propriamente attribuite ai trasporti stradali anche quelle relative ad altre sorgenti mobili, ovvero ai trasporti off-road in agricoltura, industria, foreste e giardinaggio, e ai porti e aeroporti; le emissioni da trasporto stradale costituiscono, comunque, più del 65% delle emissioni del settore. In particolare, la stima delle emissioni del trasporto su strada si riferisce alle emissioni degli autoveicoli e dei motocicli e ciclomotori, distinte per tipo di combustibile

utilizzato. La riduzione registrata in tale settore è da attribuire alle minori emissioni conseguenti al rinnovo del parco circolante, sia a benzina che diesel, e all'attuazione delle direttive relative alla qualità dei combustibili. L'aumento che si osserva nel settore residenziale e terziario, per il riscaldamento degli ambienti e degli edifici, invece, è stimato pari al 33% (Figura 4).

	Produzione di energia	Industria	Residenziale e terziario	Trasporti	Agricoltura e foreste	Totale
1990	44.842	62.381	13.896	98.081	22.705	241.905
1991	43.766	60.301	15.030	96.320	19.061	234.479
1992	43.077	59.076	15.857	99.343	19.031	236.383
1993	42.834	56.795	14.612	100.956	27.302	242.499
1994	42.695	56.346	16.162	98.046	18.899	232.149
1995	38.986	58.541	16.248	96.434	16.535	226.743
1996	32.975	54.344	15.629	94.973	14.941	212.863
1997	28.072	49.608	17.582	93.813	20.549	209.625
1998	25.266	47.617	16.820	92.312	21.098	203.114
1999	21.152	46.810	19.135	90.934	19.144	197.175
2000	18.272	46.406	19.989	87.078	20.803	192.548
2001	16.176	45.679	20.931	87.700	18.593	189.079
2002	12.060	44.677	17.233	85.151	16.372	175.493
2003	7.678	46.097	18.475	84.548	15.913	172.710
	-83%	-26%	+33%	-14%	-30%	-29%

Fonte dati: APAT

Figura 4: Distribuzione percentuale delle emissioni inquinanti per settore

Nella Figura 5 è riportata la distribuzione percentuale per settore sul totale delle emissioni di PM10 per l'anno 2003; dalla figura si osserva che le emissioni dovute ai trasporti sono pari al 49% del totale, il settore industriale rappresenta il 27% del totale, il settore residenziale l'11%, le emissioni da combustione di stoppie e rifiuti agricoli e da incendi forestali pesano il 9%, mentre il settore energia è pari al 4% del totale.
Dal confronto di questi dati con quelli riportati in Figura 3, si evidenzia come, a partire dagli anni '90, il peso del principale settore (quello dei trasporti), è aumentato dal 41 al 49%; un notevole incremento è stato riscontrato anche per il settore residenziale, dal 6 al 11%, mentre il peso percentuale è rimasto invariato per i settori industria e agricoltura e foreste.

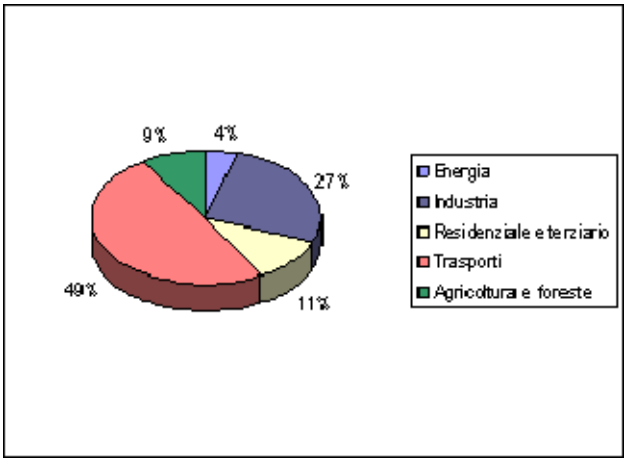

Figura 5: Distribuzione percentuale delle emissioni di PM10 per settore nell'anno 2003

Una considerevole riduzione si osserva solo nel settore relativo alla produzione di energia che è passato dal 18 al 4%. In quest'ultimo sono incluse le emissioni derivanti dalla combustione per la produzione di energia elettrica e le emissioni dell'industria di trasformazione. La riduzione di circa il 65%, dal 1990 al 2003, è dovuta, per la quasi totalità, ad una diminuzione delle emissioni di PM10 dalle centrali elettriche ed, in misura minore, dalle raffinerie, per l'applicazione della normativa per il rispetto dei limiti di emissione al camino di particolato solido dai grandi impianti di produzione energetica (DM 12/07/1990), sia attraverso l'utilizzo di combustibili migliori che l'installazione di tecnologie di abbattimento delle emissioni.

Le emissioni sotto la voce industria racchiudono, invece, le quote originate dai settori combustione industriale, dai processi produttivi, dall'estrazione e/o distribuzione dei combustibili fossili e dall'uso solventi. Tra questi, un peso preponderante sul totale delle emissioni del settore si osserva per la combustione industriale e per i processi produttivi. Anche in questo settore le emissioni si sono ridotte negli anni novanta in conseguenza dell'applicazione della normativa per i grandi impianti di combustione.

Il settore terziario e residenziale, che include il riscaldamento nel terziario, residenziale e in agricoltura, presenta come già accennato, dal 1990 al 2003, un incremento sul totale delle emissioni di oltre il 30%, dovuto ad un generale incremento dei consumi energetici, ed in particolare ad un crescente utilizzo della legna come combustibile e del

gas naturale nelle caldaie per uso domestico. Inoltre, si deve sottolineare che il Bilancio Energetico Nazionale, che è la fonte ufficiale di riferimento per tali consumi, riporta solo i dati di biomassa commercializzata escludendo una parte rilevante dei consumi che alcuni studi hanno valutato pari a tre volte i dati ufficiali (4). D'altra parte, i fattori di emissione della combustione di legna nelle stufe e nei camini domestici sono ancora affetti da una elevata incertezza (5).
Il settore dei trasporti è quello più importante dal punto di vista delle emissioni di PM10. Nel totale del settore sono riportate oltre alle emissioni propriamente attribuite ai trasporti stradali anche quelle relative ad altre sorgenti mobili, ovvero ai trasporti off-road in agricoltura, industria, foreste e giardinaggio, e ad altre sorgenti puntuali quali porti ed aeroporti; le emissioni da trasporto stradale costituiscono, comunque, il 65% delle emissioni del settore. In particolare, la stima delle emissioni del trasporto su strada si riferisce alle emissioni degli autoveicoli, dei motoveicoli e dei mezzi commerciali pesanti, distinte per tipo di combustibile utilizzato (benzina, diesel, GPL). Le emissioni sono inoltre differenziate tra quelle che si verificano allo scarico e quelle dovute all'abrasione dell'asfalto ed all'usura delle gomme e dei freni.
Nella Figura 6 sono riportate le emissioni dal trasporto su strada distribuite per tipologia di veicolo dal 1990 al 2003.

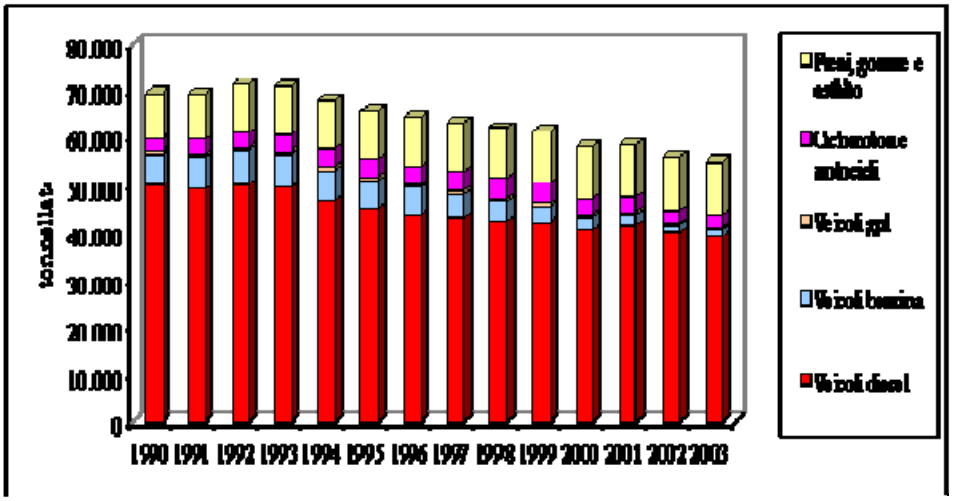

Figura 6: Distribuzione delle emissioni di PM10 per il settore trasporti su strada in tonnellate

La riduzione delle emissioni, sia per gli autoveicoli a benzina che diesel, è avvenuta in seguito al rinnovo del parco circolante con veicoli che rispondono alle direttive europee EURO I ed EURO II ed al recepimento delle direttive relative alla qualità dei combustibili. Il miglioramento del processo di combustione e l'introduzione delle marmitte catalitiche hanno comportato, da un lato, una generale riduzione di sostanze inquinanti regolamentate come i VOC, CO, NOx ed SO2, dall'altro una riduzione anche nelle emissioni di PM10, sostanza non regolamentata in tali Direttive.
Si può osservare dalla Figura 6 che la principale fonte di emissione dei trasporti su strada sono i veicoli diesel ed in particolare i veicoli commerciali pesanti. E' interessante inoltre notare, sempre per i veicoli diesel, come a partire dal 1997 non sia più evidente la tendenza alla diminuzione delle emissioni di PM10.

SNAP		% cumulata
0303	Processi di combustione con contatto	12,4
0806	Off-road Agricoltura	22,4
0701	Automobili	31,8
0202	Residenziale	40,8
0703	Veicoli pesanti P > 3.5 t e autobus	49,3
0707	Pneumatici, freni e manto stradale	55,9
0907	Incenerimento di rifiuti agricoli (escl. 1003)	62,4
0406	Proc. ind. legno/pasta-carta/alim./bevande e altre industrie	68,7
0702	Veicoli leggeri P < 3.5 t	74,5
0402	Proc. nelle ind. del ferro/acciaio e nelle miniere di carb.	79,7
0101	Centrali elettriche e di cogenerazione pubbliche	83,2
0808	Off-road Industria	86,4
0804	Attività marittime	89,6
1103	Incendi foreste e altra vegetazione	91,1
0301	Combustione in caldaie turbine a gas e motori fissi	92,5
1003	Combustione di residui agricoli	93,6
0704	Motocicli cc < 50 cm^3	94,6
0203	Agricoltura	95,7

Tabella 2: Sorgenti principali in relazione al peso percentuale delle emissioni specifiche di PM10 sul totale (fonte: APAT)

Nella Tabella 2, sono elencate le sorgenti di emissione in relazione alle emissioni di particolato solido, le cosiddette key sources, definite come quelle categorie che sommate in ordine decrescente di grandezza raggiungono il 95% del totale delle emissioni.
Dato il crescere dell'attenzione, da parte dell'opinione pubblica e dei decisori, all'inquinamento da PM10 in ambiente urbano, principalmente per gli effetti nocivi sulla salute dell'uomo, è importante stimare il contributo delle emissioni attribuibili alle aree urbane dal totale nazionale.

Prendendo in esame l'insieme delle attività dell'inventario nazionale e le relative emissioni, considerando che alcune attività sono presenti solo in ambito urbano, altre sono solo parzialmente urbane e altre, infine, non sono presenti affatto in ambito urbano, si stima che circa il 15-20% delle emissioni totali di PM10 a livello nazionale, con riferimento all'intera serie storica, viene emesso in aree urbane. Di queste, il 55-60% è attribuito alle emissioni da trasporto su strada, il 35-40% al riscaldamento e il 5-10% ad altre fonti.
Inoltre, bisogna considerare che circa il 10% delle emissioni totali nazionali viene emesso da grandi impianti industriali che sono localizzati in "aree a rischio", contigue ad ambiti urbani, ed in determinate condizioni meteo-climatiche possono determinare particolari condizioni di inquinamento sull'immediata vicinanza urbana.
Come già specificato, la stima delle emissioni del PM10 nell'inventario nazionale si riferisce al particolato cosiddetto primario e non tiene in considerazione le emissioni secondarie e la risospensione delle polveri.

1.1.1. Il parco circolante

Per quanto riguarda i trasporti stradali, dal 1990 al 2003 il numero totale di veicoli motorizzati circolanti in Italia è costantemente aumentato. Rispetto al 1990 l'incremento percentuale è stato pari al 31,5% (Figura 7). I maggiori incrementi si sono avuti nelle categorie: autoveicoli passeggeri +25.1% sul totale; veicoli a due ruote +45.7% e veicoli commerciali leggeri +108%. Invariate le altre categorie veicolari: veicoli commerciali pesanti; bus urbani ed extraurbani (Figura 8).

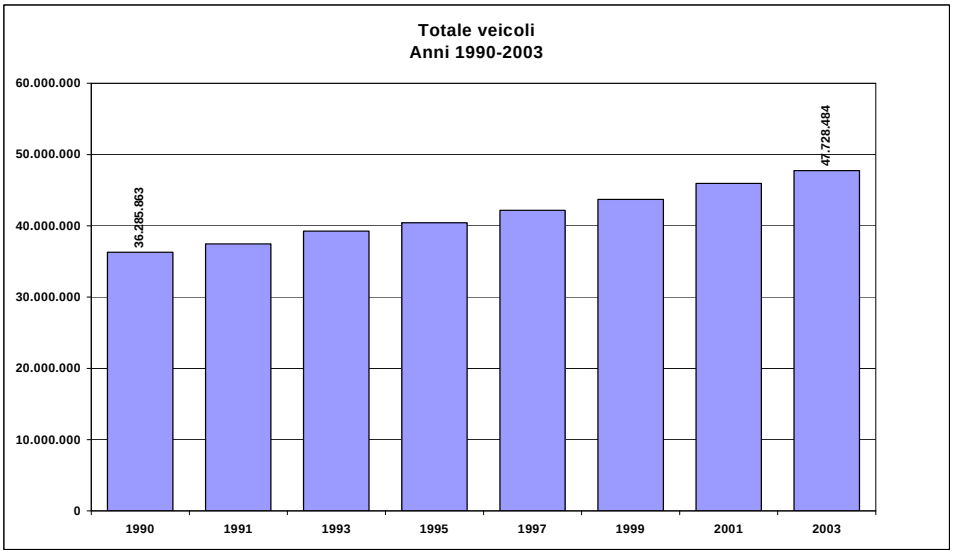

Figura 7: Numero totale di veicoli circolanti in Italia (1990-2003) (fonte: elaborazione ENEA su dati ACI)

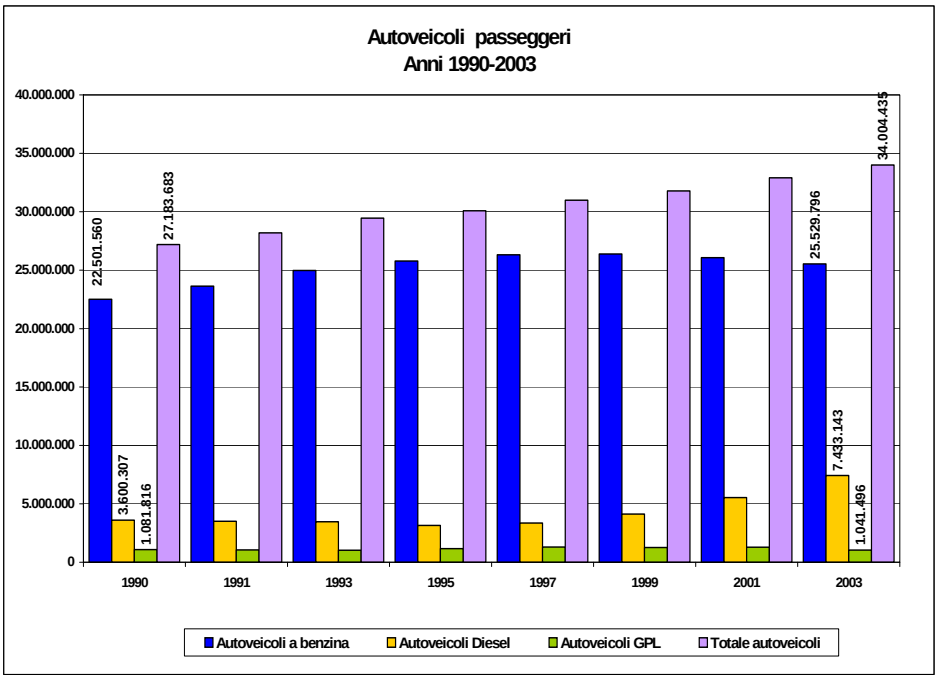

Figura 8: Parco circolante autovetture in base all'alimentazione (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati ACI)

Rispetto ai veicoli a due ruote va rimarcato il trend in diminuzione dei ciclomotori a partire dal 1999 e quello in aumento dei motocicli.
Riguardo al tipo di alimentazione, i veicoli alimentati a benzina sono aumentati del 20%, rispetto al totale dei veicoli circolanti nel 1990, mentre quelli a gasolio sono cresciuti del 95%. Praticamente invariato il parco a GPL.
Va però segnalato che mentre le autovetture a benzina negli ultimi anni mostrano un trend in diminuzione, le autovetture diesel sono in forte crescita.
Si evidenzia inoltre l'enorme peso dei veicoli commerciali leggeri alimentati a diesel sul totale e come questi siano dal '90 al '03 in continua e forte crescita (Figura 9).

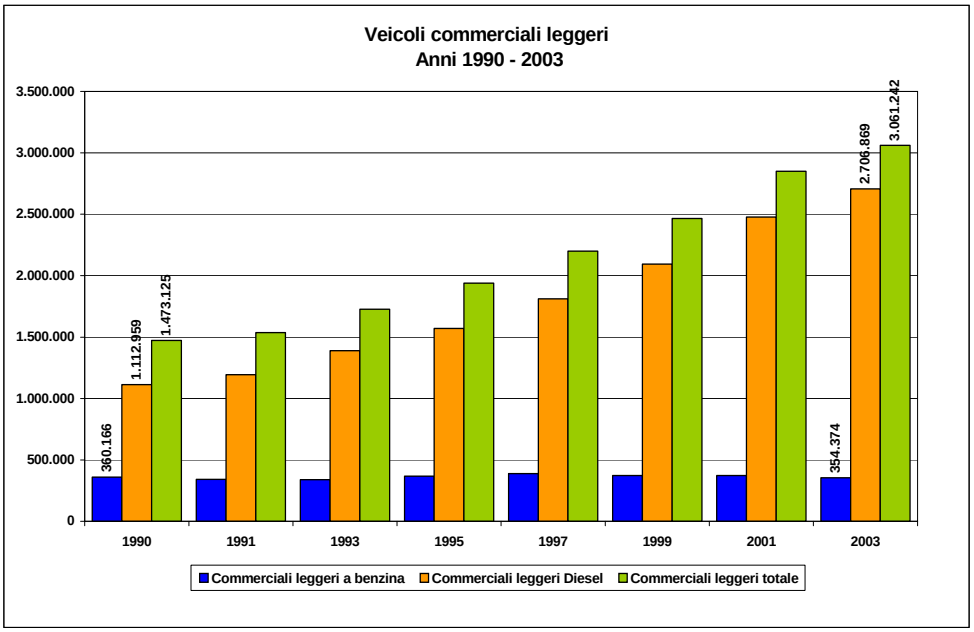

Figura 9: Parco circolante veicoli commerciali leggeri in base all'alimentazione (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati ACI)

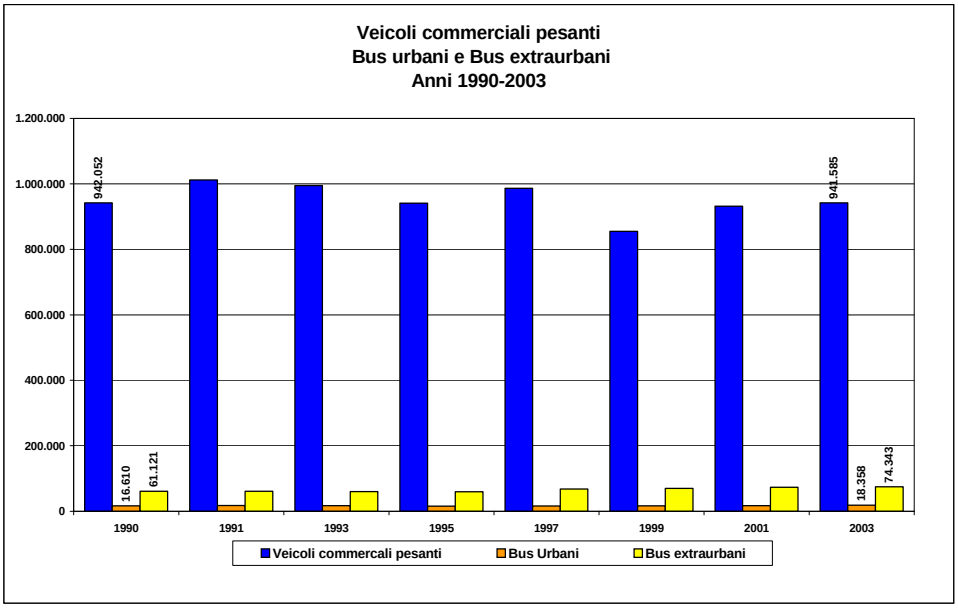

Figura 10: Parco circolante veicoli commerciali pesanti, bus urbani e bus extraurbani (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati ACI)

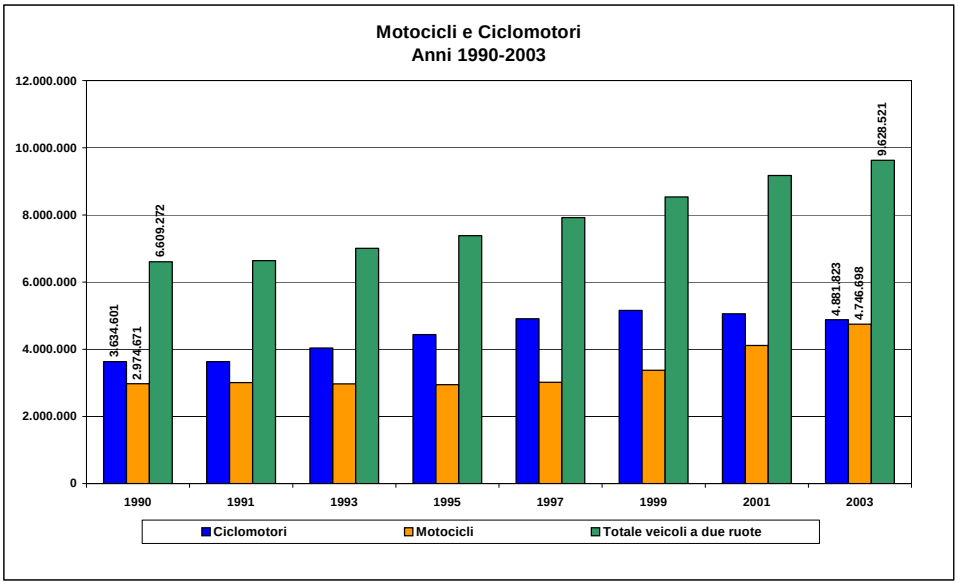

Figura 11: Parco circolante ciclomotori e motocicli (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati ACI e APAT)

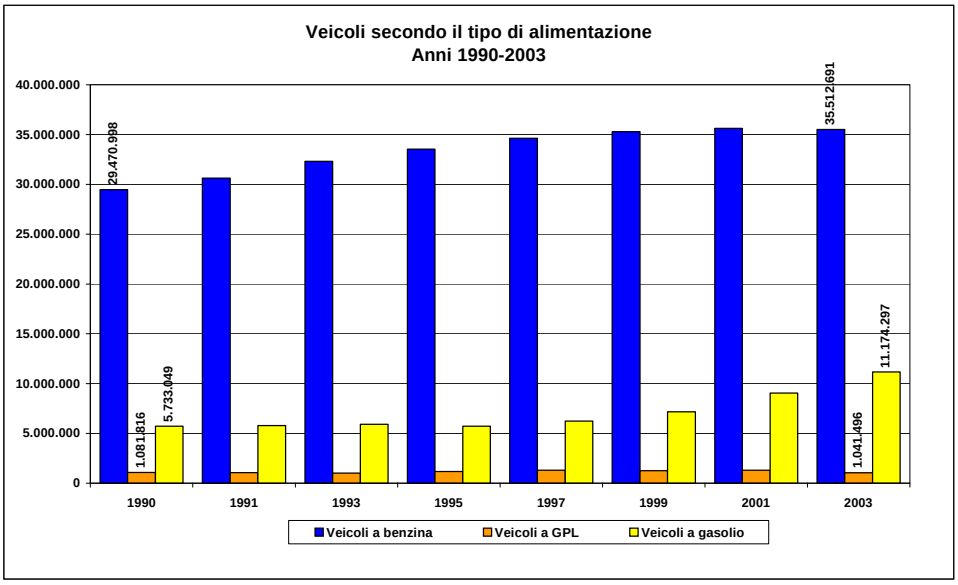

Figura 12: Parco circolante veicoli in base all'alimentazione (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati ACI)

1.1.2. Emissioni da trasporto su strada in ambito urbano

La stima delle emissioni di sostanze inquinanti dell'atmosfera causate dal trasporto stradale viene effettuata utilizzando il programma di calcolo COPERT III (Samaras, 2000) messo a punto dall'Agenzia Europea per l'Ambiente e raccomandato a tutti i Paesi membri per la compilazione degli inventari nazionali delle emissioni.

Il software richiede come principali dati di input:

- Il parco veicolare circolante suddiviso per
  - Categoria di veicolo
  - Alimentazione
  - Cilindrata (o peso a pieno carico per i veicoli commerciali leggeri e pesanti)
  - Anno di immatricolazione (per tenere conto delle normative di riduzione dei limiti di emissioni);
- Le percorrenze medie annuali effettuate dalle singole categorie veicolari in ambito urbano, extraurbano ed autostradale;
- Le velocità medie di percorrenza delle singole categorie veicolari in ambito urbano, extraurbano ed autostradale;

- Il percorso medio giornaliero effettuato dalle singole categorie veicolari in ambito urbano;
- Le temperature minime, massime, medie mensili
- I consumi di carburanti annuali suddivisi in benzina (con o senza piombo), gasolio e GPL;
- Le caratteristiche qualitative dei carburanti quali il tenore di piombo, il tenore di zolfo, la pressione di vapore Reid ed il rapporto HC.

Senza entrare nel merito dell'algoritmo, in base ai dati di input il software calcola la quantità del singolo inquinante emesso annualmente dalla specifica categoria veicolare come somma di tre differenti "tipi" di emissione

$$\mathbf{E_{totale} = E_{caldo} + E_{freddo} + E_{evaporative}}$$

dove:

- $\mathbf{E_{caldo}}$**:** è la quantità (g) emessa quando il motore ha raggiunto le condizioni di stabilità termica e/o il dispositivo di post-trattamento dei gas di scarico (marmitta catalitica) ha raggiunto la temperatura di funzionamento ottimale;
- $\mathbf{E_{freddo}}$**:** è la quantità (g) emessa dall'accensione del motore fino al raggiungimento delle condizioni di stabilità termica;
- $\mathbf{E_{evap}}$**:** è la quantità (g) di COVNM (Composti Organici Volatili Non Metanici) emessa a causa dell'evaporazione del carburante dal sistema di alimentazione (solo per i veicoli a benzina).

Le emissioni a caldo dipendono dalla categoria veicolare, dalla tecnologia veicolare e dalla velocità. Le emissioni a freddo dipendono principalmente dalla percentuale di percorrenza effettuata con il motore a freddo che a sua volta dipende sia dalla tecnologia veicolare che dalla temperatura ambiente. Anche se le emissioni a freddo avvengono per tutte le categorie veicolari, il software le calcola solo per le autovetture passeggeri e per i veicoli commerciali leggeri perché solo per queste categorie sono disponibili i relativi fattori di emissione.

Le emissioni a caldo e le emissioni a freddo sono dette anche emissioni "exhaust" e sono quelle che fuoriescono dal sistema di scarico dei veicoli a motore.
I singoli "tipi" di emissione sono strettamente dipendenti dalle condizioni operative del motore. Differenti condizioni di guida si riflettono in differenti condizioni di esercizio del motore e, quindi, in differenti "tipi" di emissioni. Nella guida in autostrada, per esempio, non si hanno "emissioni a freddo" in quando il motore, essendo stato avviato prima dell'ingresso in autostrada e lavorando generalmente a carichi elevati, ha senz'altro raggiunto le condizioni di stabilità termica. Al contrario le emissioni a freddo si verificano quasi esclusivamente nelle condizioni di guida urbana, caratterizzate da brevi spostamenti e da bassi carichi. Tralasciando i dettagli tecnici, il software riaggrega le emissioni attribuendole a tre specifiche condizioni di guida: urbana; extraurbana e autostradale.

$$E_{tot} = E_{urb} + E_{extraurb} + E_{autostr}.$$

Le principali emissioni prese in considerazione dal software sono: il monossido di carbonio (CO), gli ossidi di azoto (NOx), i composti organici volatili non metanici (COVNM), il metano (CH4), l'anidride solforosa (SO2), il piombo (Pb), il protossido di azoto (N2O), l'ammoniaca (NH3) ed il materiale particolato (PM).
Una volta inseriti i dati di input il programma oltre a calcolare le emissioni dei vari inquinanti citati calcola anche i consumi totali di carburante (benzina, gasolio e GPL). I consumi calcolati vengono confrontati con i consumi immessi come dato di input. Il programma viene reiterato, calibrando alcuni parametri: le percorrenze annuali, le quote di queste effettuate in ambito urbano, extraurbano ed autostradale e le velocità medie fino a quando i due dati coincidono.
Questa metodologia viene correntemente applicata per la stima delle emissioni a livello nazionale in quanto è ragionevole supporre che i carburanti venduti vengano "consumati" all'interno del territorio nazionale. Gli effetti di "frontiera"(carburanti acquistati all'estero e consumati in Italia e viceversa) si compensano e, in ogni caso, hanno un peso percentuale sul totale dei consumi irrilevante.
Per quanto riguarda le emissioni di PM il software calcola le emissioni dovute ai soli veicoli diesel. Le emissioni di PM dovute ai veicoli

alimentati a benzina ed a GPL sono calcolate utilizzando fattori di emissione disponibili in letteratura1.
Come noto, oltre alle emissioni exhaust, il traffico veicolare produce emissioni di particolato dovute all'usura dei freni, dei pneumatici e del manto stradale. Anche in questo caso la stima delle emissioni viene effettuata utilizzando dati sperimentali disponibili in letteratura.
Come evidenziato dal grafico riportato nella Figura 13 le emissioni totali di PM in ambito urbano nel 2003 sono diminuite del 21% rispetto a quelle del 1990. Tale diminuzione, nonostante l'aumento del numero totale dei veicoli e del numero dei veicoli diesel, è da attribuire principalmente allo svecchiamento del parco circolante ed al miglioramento dei combustibili.
L'aumento dei veicoli diesel ha provocato negli anni più recenti una inversione di tendenza che ha riportato le emissioni di PM attribuite a questo tipo di alimentazione ai valori del 1993 (vedi Figure 14 e 15).
Le emissioni urbane dei veicoli commerciali pesanti (Figura 16) sono diminuite dal 1990 al 2003 grazie alla normativa sulla limitazione delle emissioni inquinanti e grazie anche al fatto che in questo intervallo di tempo il numero dei veicoli non ha subito variazioni apprezzabili.

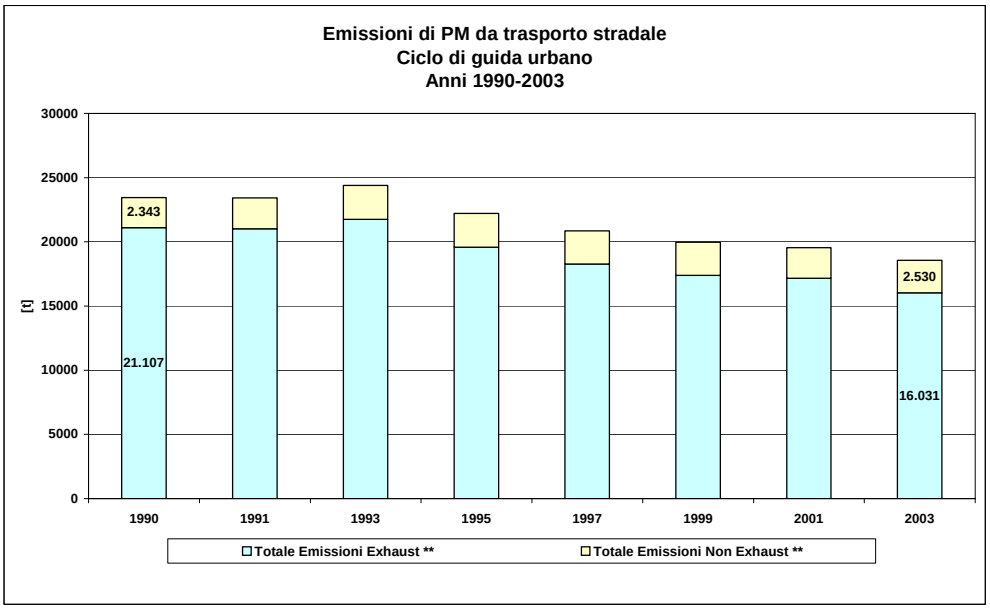

Figura 13: Emissioni di PM da trasporto stradale. Ciclo di guida urbano (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati APAT)

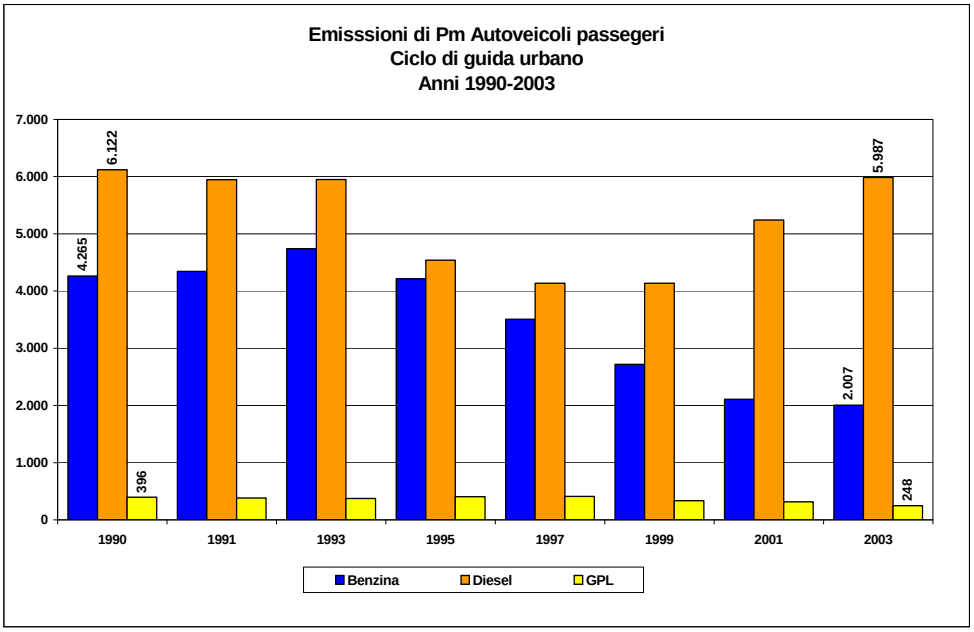

Figura 14: Emissioni di PM attribuite alle autovetture passeggeri (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati APAT)

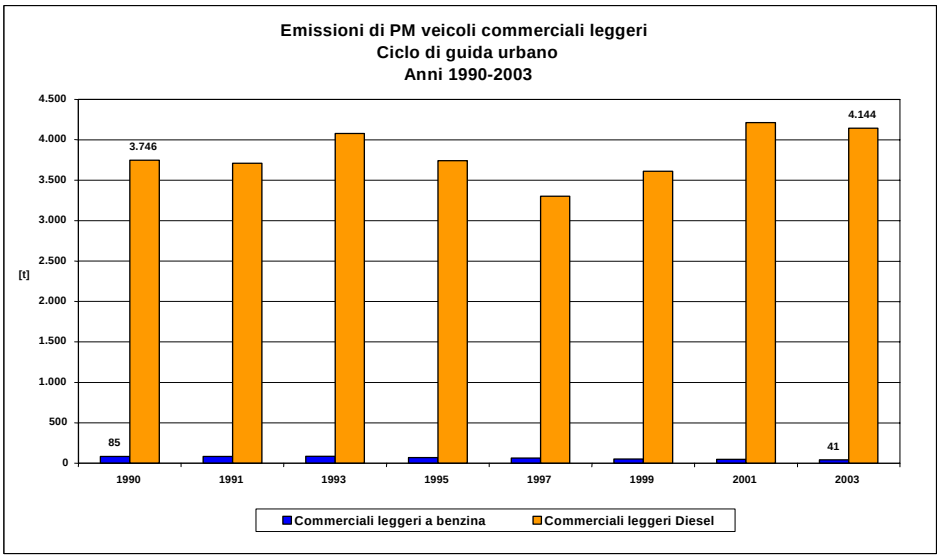

Figura 15: Emissioni di PM attribuite ai veicoli commerciali leggeri (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati APAT)

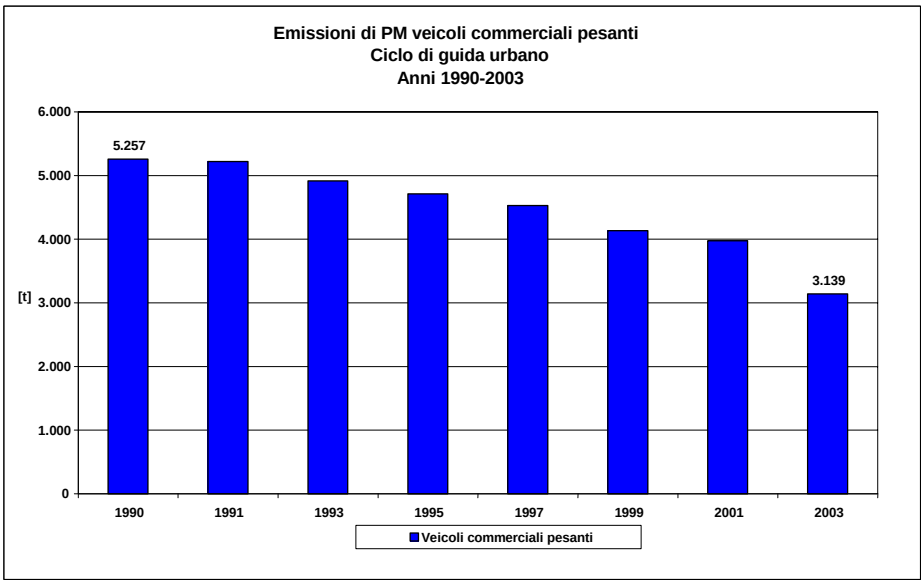

Figura 16: Emissioni di PM attribuite ai veicoli commerciali pesanti (1990-2003)

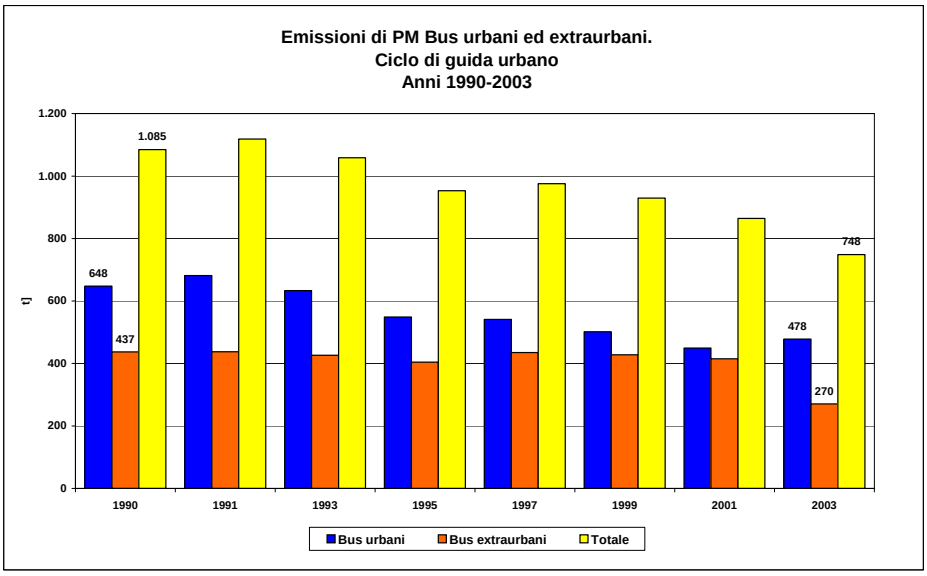

Figura 17: Emissioni di PM attribuite ai bus urbani ed extraurbani (1990-2003) (fonte:elaborazione ENEA su dati APAT)

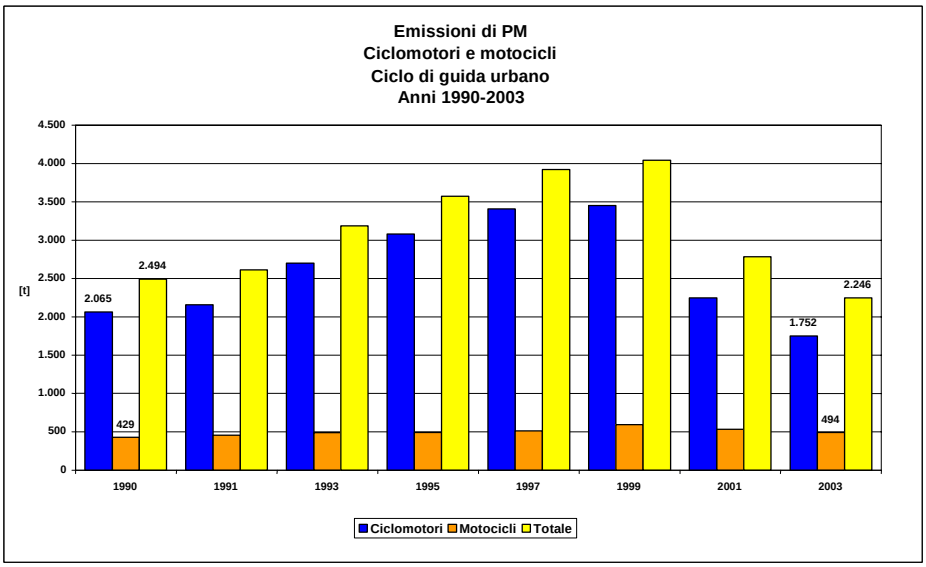

Figura 18: Emissioni di PM attribuite ai veicoli a due ruote (1990-2003)

1.2. Mobilità sostenibile: congestione ed inquinamento ambientale

Un sistema di trasporto sostenibile è stato definito dalla ECTM come un sistema (ECTM, 2004; CST,2005):

- Permette di raggiungere in modo sicuro i bisogni individuali e della società in un modo compatibile con la salute umana e in rispetto dell'ecosistema, e con equità con e fra le generazioni.
- E affidabile, funziona efficientemente, offre possibilità di scelta del modo di trasporto e supporta l'economia.
- Limita le emissione e i residui, minimizza il consumo di risorse non compatibili, limita il consumo di energie rinnovabili , promuove il riciclaggio e minimizza gli effetti degli impatti sull'uso del territorio.

L'innovazione nel modo di affrontare questi problemi è quella di proporre degli indicatori capaci di misurare facilmente gli obiettivi e gli impatti. In generale, la sostenibilità promuove un uso delle risorse sufficiente, tendenza opposta alle convenzioni economiche che assumono che un consumo crescente è desiderato. La sostenibilità richiede un etica

conservatrice che massimizzi l'efficienza nell'uso delle risorse, con un efficace politica tariffaria e dell'uso dei parcheggi. Questa tendenza è in opposizione a quella proposta dal consumismo che privilegia massimizzare l'uso di risorse (incluso la mobilità). La sostenibilità richiede l'imposizione di vincoli di tipo ambientale per limitare l'uso di risorse

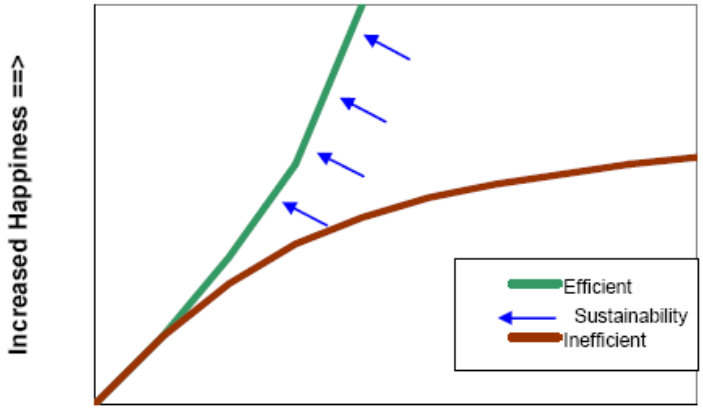

Figura 19: Sviluppo della sostenibilità massimizza l'efficienza con scarsi livelli di consumo

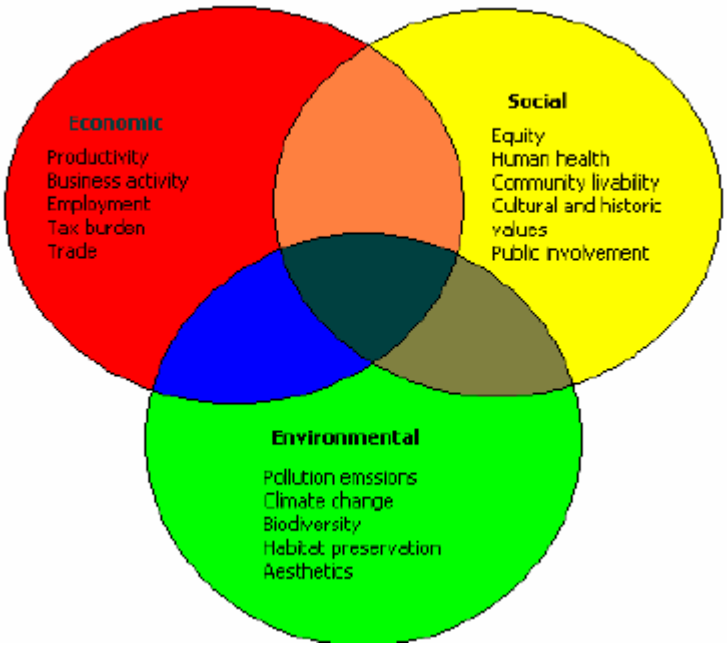

Figura 20: Componenti della sosteniblità (Fonte Litman 2008)

Si possono associare tre componenti alla sostenibilità: ambientale, economico e sociale. Le relazioni fra queste componenti sono mostrate in figure 20. Di conseguenza la sostenibilità può essere definita con rispetto alle tre componenti (Litman, 2008).
Con rispetto agli aspetti sociali, il sistema di trasporto dovrebbe:

- Garantire la salute umana, il comfort e la convenienza senza affettare la vita sociale,
- Permettere e favorire lo sviluppo, e fornisce sempre un alternativa delle modalità di trasporto,
- Non produrre più impatti di quelli ammissibili dalla società

Con rispetto all'aspetto economico, i sistemi di trasporto dovrebbero:

- Fornire servizi efficienti e di capacità sufficiente,
- Essere finanziariamente abbordabili
- Favorire lo sviluppo economico sostenibile

Con rispetto all'aspetto ambientale, i sistemi di trasporto dovrebbero:

- Fare un uso del territorio con scarsi impatti ambientali
- Usare risorse energetiche rinnovabili
- Non produrre più emissioni e rifiuti di quelli ammissibili

La protezione dei cittadini di fronte ai problemi legati all'inquinamento ambientale è oggi una delle maggiori preoccupazioni delle società moderne e il trasporto è una fra le principali fonte di inquinamento. Non è sorprendente che la qualità dell'aria giochi un ruolo principale nelle politiche e decisione prese in materia di trasporti e che una grande sforzo sia stato effettuato per mitigare gli impatti.

Economico	**Sociale**	**Ambientale**
Produttività	Salute umana	Emissioni
Uso del territorio	Vivibilità delle città	Cambio Climatico
Posti di lavoro e attività economica	Coinvolgimento pubblico	Protezione natura
Tasse		

Tabella 3: Componenti della sostenibilità

La protezione ambientale può essere studiata da diverse posizione: tecnica, legale, ecologica e politica. Da un punto di vista ingegneristico si

cercano soluzione tecnologiche e metodologie per abbattere gli impatti e i rischi dovuti all'esposizione agli inquinanti.
Da un punto di vista economico, il prezzo (o in questo caso una tassa) sono il meccanismo utilizzato per allocare le risorse. E pero estremamente difficile applicare questo meccanismo quando si tratta con la qualità dell'aria perché non esiste un obbligo di pagare per il danno causato.
Fra i danni imputabili all'uso del veicolo si includono:

- Effetti estetici dovuti alle nuove infrastrutture e l'uso del veicolo proprio;
- Inquinamento del suolo e acqua dalla costruzione e l'uso delle infrastrutture;
- Rumore e vibrazioni;
- Emissioni dai veicoli e i suoi effetti sulla qualità dell'aria;
- Cambio climatico dovuto alle emissioni di gas serra, in particolare di CO_2. Circa il 20-30% delle emissioni di gas serra provengono dai sistemi di trasporto.

Economico	Sociale	Ambientale
Congestione di traffico	Equità sociale	Inquinamento dell'aria e dell'acqua
Barriere alla mobilità	Impatti sulla difficoltà a muoversi	Cambio climatico
Incidenti	Impatti sulla salute	Rumore e vibrazioni
Costi delle infrastrutture	Vivibilità delle città	Danni sull'ecosistema
Costi degli utenti		Impatti idrologici

Tabella 4: Impatti dei sistemi di trasporto

1.2.1. Indicatori

Gli indicatori sono utilizzati per valutare il progresso verso l'obiettivo fissato. Cosi l'utilizzo di un indicatore può fornire utili informazioni e misurare efficientemente gli obiettivi pero questi devono essere scelti con cura. Nel caso delle valutazioni ambientali di una rete di trasporto, gli indicatori scelti devono tenere conto di tutti i relativi impatti. In letteratura i sistemi di trasporto sono valutati tramite un insieme di indicatori. I più

convenzionali sono il livello di servizio, la velocità media del traffico. Dal punto di vista di un sistema di trasporto sostenibile altri indicatori possono essere usato come il consumo di combustibile, le emissioni di inquinanti, la percentuale di utilizzo della macchina, etc. Molte volte dato anche per la semplicità degli stessi, queste indicatori falliscono nel misurare l'efficienza del sistema.

Un processo di pianificazione coinvolge indicatori per la congestione del traffico (definendo come deve essere misurata la congestione), obiettivi (la riduzione di congestione e si questa è importante per una tipologia di veicoli come autobus o camion o un miglioramento nella ripartizione modale), e i target (cambiamenti negli impatti della congestione o nel comportamento degli utenti che dovrebbero essere raggiunti) e soglie(livelli oltre i quali devono essere intraprese altre azioni per ridurre la congestione).

L'importante è capire che diversi tipi di indicatori riflettono diverse ipotesi o ponderazioni. Alcuni di questi indicatori si concentrano sulle tematiche della mobilità mentre altri danno un migliore prospettiva del problema considerando l'accessibilità tenendo in conto le alternative modali per compiere lo spostamento o l'uso del territorio. Per esempio, il livello di servizio da una informazione sulla congestione però non offre nessuna indicazione sulla qualità del servizio dei modi alternativi o sulla accessibilità legata all'uso del territorio.

L'uso degli indicatori può richiamare diversi livelli di analisi, come illustrato in figura 21. Per esempio, ci sono degli indicatori che sono di notevole aiuto nel processo decisionale (qualità della pianificazione), effetti sulla salute e l'ambiente (danni, morti,..), impatti economici (costi di mitigazione,..). Un indice della sostenibilità dovrebbe includere diversi indicatori in grado di riflettere diversi livelli di analisi, pero è importante considerare le relazioni intrinseche degli indicatori per evitare di duplicare le informazioni. Per esempio la riduzione del monte chilometri in una rete ridurrà inesorabilmente anche gli inquinanti emessi. Di conseguenza può essere utile riportare tutte i due fattori nello studio però sarebbe sbagliato considerarli come indicatori di impatti diversi.

Level	Examples
External Trends ↓	Changes in population, income, economic activity, political pressures, etc.
Decision-Making ↓	Planning process, pricing policies, stakeholder involvement, etc.
Options and Incentives ↓	Facility design and operations, transport services, prices, user information, etc.
Response (Physical Changes) ↓	Changes in mobility, mode choice, pollution emissions, crashes, land development patterns, etc.
Cumulative Impacts ↓	Changes in ambient pollution, traffic risk levels, overall accessibility, transportation costs, etc.
Human and Environmental Effects ↓	Changes in pollution exposure, health, traffic injuries and fatalities, ecological productivity, etc.
Economic Impacts ↓	Property damages, medical expenses, productivity losses, mitigation and compensation costs.
Performance Evaluation	Ability to achieve specified targets.

Figura 21: Indicatori e livello di analisi (Fonte Litman, 2008)

1.2.2. Strategie

Un ampio numero di strategie per migliorare la sostenibilità nei trasporti sono state proposte fra le quali la gestione della domanda, politiche tariffarie della sosta, interventi di congestion pricing, miglioramenti tecnologici delle vetture, uso di combustibili alternativi e l'utilizzo di procedure integrate di pianificazione ed uso del territorio. In passato l'applicazione di queste misure è stato scarso e molto lento dovuto alla complessità dell'evento e alla grandezza e tempestività degli impatti.
In seguito una tabella è presentata con una lista parziale delle strategie dal punto di vista trasportistico che sono state suggerite per uno sviluppo sostenibile. Le categorie in cui le strategie sono state divise sono: veicoli, strada, controllo e domanda. La prima categoria pretende ridurre gli impatti negativi sull'ambiente dei veicoli tramite il miglioramento della tecnologia e l'uso di combustibili puliti. Nel breve periodo si pretende migliorare l'efficienza dei veicoli convenzionali per ridurre le emissioni di inquinanti. Nel lungo periodo la strategie prevede l'introduzione di nuove tecnologie e nuovo combustibili.
La seconda categoria riguarda i miglioramento delle sedi stradali e delle operazioni. Rientrano in questa categoria i miglioramento del flusso

veicolare come l'ottimizzazione dei cicli semaforici, ramp metering, traffic calming e la riduzione delle fasi di guida di 'stop and go'. In questo caso sono proposti anche dei corsi di guida per ridurre le brusche accelerazioni o l'aumento del consumo di combustibile ad alte velocità, che possono ridurre le emissioni. Rientrano in questa categoria anche interventi di gestione degli incidenti, di localizzazione del veicolo, e in generale il miglioramento di queste operazioni tramite l'introduzione di sistemi ITS. Il miglioramento delle operazioni di routing e schedulino possono aiutare a ridurre il consumo di combustibile in entrambi spostamenti passeggeri e merci.

La gestione della domanda è la terza categoria e possono essere considerate diverse sottocategorie. Cosi abbiamo il miglioramento della ripartizione modale, pricing, telelavoro, e uso del territorio. La ripartizione modale deve essere tale di riuscire a sostituire una percentuale sempre maggiore di spostamenti privati verso modi di trasporto più puliti. Questo obiettivo può essere raggiunto migliorando il servizio dei modi alternativi capaci di attrarre domanda o utilizzare incentivi per l'utilizzi di mezzi di trasporto alternativi. Le politiche tariffarie per incentivare o disincentivare certi modi di trasporto possono essere utilizzate nel breve periodo per ridurre domanda e incoraggiare modi di trasporti alternativi. Tasse e tariffe possono affettare la proprietà del veicolo, il prezzo del combustibile o il prezzo per circolare in certe aree. L'uso del territorio e lo sviluppo urbano affettano le generazione e le attrazioni di una zona all'interno del sistema facendo si che progettando con certi criteri (alte densità, uso del territorio misto) possono rendere certi tipologie di mezzi di trasporto (bicicletta, trasporto pubblico) convenienti e pratici.

Vehicle / Fuel Technological Changes:

1. **Improved Efficiency of Conventional Vehicles**
   - Manufacturer Innovations / Supplier Offerings
   - Responses to Consumer Demand
   - Responses to Government Regulation and Incentives: CAFE Standards, R&D Partnerships, Taxes, Rebates, Subsidies
2. **New Vehicle Technologies**
3. **New Fuels**

Road / Vehicle Operations Improvements:

1. **Conventional Traffic Flow Improvements**
   - Traffic Signal Timing
   - Ramp Metering
   - Flow Metering
   - Bottleneck Removal
2. **Intelligent Transportation System Improvements**
   - Smart Highways
   - Smart Vehicles
   - Accident / Incident Management
   - Routing and Scheduling Enhancements
3. **Driver Education**
4. **Improved Logistics and Fleet Management**

Demand Management:

1. **Modal Substitution**
   - Transit, Paratransit, Ridesharing, Walking, Biking Improvements and Incentives
   - Rail Substitutes for Truck
2. **Telecommunications Substitutions**
   - Telecommuting
   - Teleshopping
   - Teleconferencing
   - Distance Learning
   - Information Technology-Enhanced Routing and Scheduling (Passengers, Freight)
3. **Pricing Incentives / Disincentives**
   - Gas Tax Increases
   - Vehicle Sales Tax Based on Fuel Efficiency and Expected Life
   - Vehicle Registration / License Fee Based on Fuel Efficiency, Use (Measured or Estimated)
   - Other Impact Fees Based on Use
   - Subsidies for Preferred Modes, Telecommunications Substitutes, Etc.
4. **Land Use –Transportation Strategies**
   - Compact Development
   - Mixed Use Development
   - Higher Development Densities
   - Transit, Pedestrian, Bike Friendly Development

Figura 22: Elenco delle strategie a diposizione del pianificatore (Deakin, 2008)

Il TRB (TRB Special Report 251, 1997) ha prodotto tramite studi sul campo un rapporto dove sono valutati le riduzioni delle emissioni prodotte da ciascun scenario:

- Da un sistema aggressivo di gestione della domanda e pianificazione dell'uso del territorio si ottine una riduzione del 6% nel 2020 e del 15% nel 2040
- Dall'introduzione di veicoli alimentati con nuovi combustibili meno inquinanti, con 1.5% annuale di tasso di sostituzione si ottiene un 15-20% di riduzione nell'anno 2020 e del 35% nell'anno 2040
- Dall'aumento del prezzo del combustibile di un 3% annuo si ottiene un 20% di riduzione nell'anno 2020 e del 40% nell'anno 2040.
- Dall'introduzione di veicoli a basse emissioni (5% della flotta nel 2020 e 35% della flotta al 2040) no si ottengono valori significativi nell'anno 2020 e del 30% nell'anno 2040.

Lo studio del TRB conclude che, assumendo che questi scenari forniscano dei risultati attendibili, per raggiungere quanto stabilito nel Protocolo di Kyoto richiederebbe una politica aggressiva di rinnovo del parco (combustibili più efficienti, nuovo tecnologie) o l'utilizzo di nuovi combustibili, o una combinazione di sostituzioni di veicoli, combustibile compatibili e strategie di gestione della domanda.

1.3. Congestion pricing

Durante gli ultimi 10 anni la crescita del traffico ha reso inefficienti gli investimenti realizzati in nuove infrastrutture ed adeguamenti a quelle esistenti. E stato più volte dimostrato come l'incremento di capacità non comporti dei benefici per la risoluzione del problema della congestione. La congestione veicolare comporta diversi costi agli utenti: velocità ridotte e maggiori tempi di percorso, maggiori consumi, difficoltà per usare altre mezzi di trasporto e in maggiore scala causa problemi per allocazioni di zone residenziali ed industriali e commerciali. Il costo del consumo e dell'incremento di tempo sono stimati in centinaia di euro per anno (Shanrk and Lomax, 1999) come già esposto nel capitolo precedente.
La congestione è la conseguenza intrinseca dell'interazione fra domanda e offerta: la capacità è una grandezza costante nel tempo e costosa qualora

si voglia aumentarla mentre la domanda varia nel tempo e tende sempre ad aumentare nel tempo. Diverse politiche sono state applicate per alleviare il problema della congestione. La prima risposta, largamente utilizzata negli anni passati, è l'aumento della capacità a disposizione. La seconda il controllo della domanda per scoraggiare l'uso dell'auto privata durante le ora di punta e migliorare la ripartizione modale in favore del trasporto pubblico: limitando l'accesso alle aree congestionate tramite l'utilizzo di permessi di circolazione o agendo sulla sosta, introducendo blocchi per tutte o solo alcune classi veicolari, etc. La terza soluzione adottata è migliorare l'efficienza del sistema di trasporto, allocando la stessa domanda di traffico però ad un costo minore. Rientrano in questa soluzione tutte le azione che riguardano il controllo della rete: ottimizzazione dei cicli semaforici, ramp-meetering, corsie preferenziali e sistemi di informazioni all'utente o ITS.

Per quanto riguarda i provvedimenti prima elencati per alleviare la congestione, in questo capitolo si farà riferimento unicamente al caso del 'congestion pricing' in quanto pertinenti a quanto sviluppato durante l'attività di ricerca. L'intervento di tariffare una serie di archi della rete o di percorsi nasce dell'evidente scelta degli utenti che cercano di ottimizzare al massimo le loro scelte sia a livello di mezzo di trasporto sia di percorso. Pigou (1920) e Knight (1924) furono i primi a considerare questa possibilità anche se è Vickrey (1963) il primo a identificare il potenziale di una misura di road pricing per influenzare la scelta degli utenti e il modo di trasporto, e le loro implicazione nell'uso del territorio. Una rassegna dei contributi di Vickrey nel campo del congestion pricing si trova in Arnott et al. (1994).

Il congestion pricing consiste in introdurre una tariffa per l'utilizzo di una risorsa in linea con la severità del fenomeno di congestione presente sulla risorsa stessa. Di conseguenza le tariffe o 'tolls' devono variare a secondo del periodo di tempo considerato, luogo, tipo di veicolo, e della coincidenza di eventi come incidenti o cattive condizione meteo. Nonostante economicamente e in qualche caso pratico sia stato dimostrato l'efficacia di un provvedimento di road pricing sono ancora poche le applicazioni nel mondo. Negli ultimi anni però, a seguito del riuscito provvedimento di Londra, sembra che le applicazioni e le sperimentazione siano in aumento.

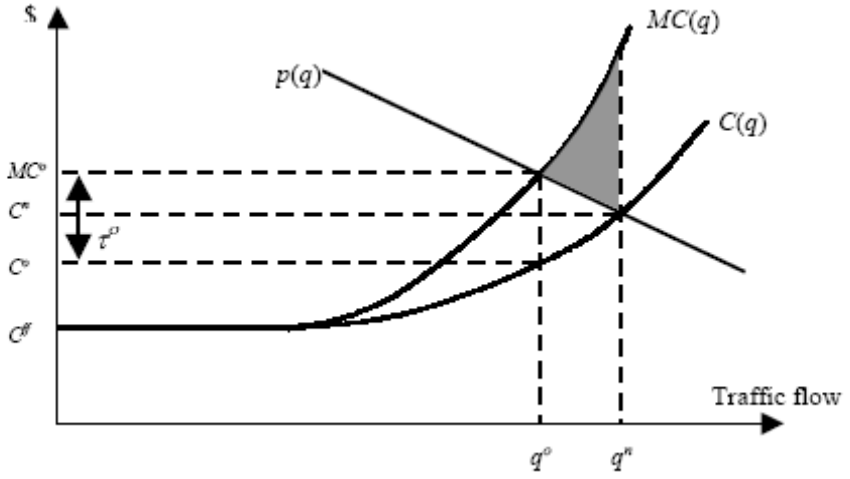

Figura 23: Ottimale road pricing in un modello indipendente del tempo (Fonte Lindsey, 2001)

Il principio basico di un intervento di road pricing può essere spiegato tramite le curve della figura 23. L'asse orizzontale rappresenta il flusso veicolare e l'asse verticale il costo generalizzato dello spostamento che includo i costi operativi legati allo spostamento, il tempo dello spostamento e le tariffe. A bassi volumi di traffico i veicoli circolano in condizioni di 'flusso libero' e il costo dello spostamento è pressoché costante. Per elevati volumi di traffico, appare la congestione, le velocità cominciano a diminuire e la curva dei costi presenta si impenna con una pendenza con una pendenza proporzionale alla severità del fenomeno di congestione riscontrato. Se si aggiunge una curva di domanda p(q) si ha il classico diagramma domanda-offerta. La domanda si assume abbia una pendenza negativa, a tenore della diminuzione di spostamenti generati all'aumentare del prezzo. In una situazione dove non si abbiano delle tariffe, il punto di equilibrio risulterà nel punto di intersezione fra la curva C(q) e la curva p(q), risultano un flusso di equilibrio q^n e un prezzo C^n. Se consideriamo unicamente come costo esterno la congestione, ignorando per ora gli incidenti e l'inquinamento, il costo totale TC è pari a TC = c(q)*q e il costo marginale di uno spostamento supplementare è pari a $MC(q)= \partial TC(q)/ \partial q = C(q) + q\ \partial C(q)/ \partial q$.

L'ottimo del sistema o ottimo sociale si trova in figura 1 rappresentato dal punto di intersezione fra la curva del costo marginale MC(q) e la domanda p(q), dove il costo marginale è MC^0 e il numero di spostamenti

q^0, quindi minore del flusso ottenuto in situazione di equilibrio Di conseguenza, l'ottimo può essere raggiunto in condizioni di equilibrio se gli utenti sono obbligati a pagare un prezzo pari a MC^0. Il costo totale di spostamento è la somma dei costi operativi e la tariffa, la tariffa sarà $\tau^0 = MC(q^0)-C(q^0) = q^0 \partial C(q^0)/ \partial q$ dove $\partial C(q^0)/ \partial q$ è la congestione marginale dell'utente n+1 nel sistema. Questa prima definizione di toll o tariffa è chiamata 'tariffa Pigouviana'.
Risulta di questa relazione come l'introduzione di una tariffa, sia necessaria per raggiungere l'ottimo sociale o ottimo mo del sistema, equivalga a dire che gli utenti pagano la congestione con il loro proprio tempo. L'introduzione della tariffa non significa che la congestione non esista più, una leggera congestione rimane sempre e quando il costo generalizzato C^0 sia maggiore del costo a flusso libero C^{eff}.
Il beneficio ottenuta con l'introduzione di una tariffa ottimale è nel guadagno sociale, surplus, definito dalla riduzione dei costi meno la riduzione dei benefici dovuti alla riduzione di traffico. Il beneficio può essere espresso graficamente dalla zona ombreggiata della figura 2. Gli utenti q^0 che continuano ad impegnare l'infrastruttura soffrono un incremento del costo $MC^0 - C^n$. Gli utenti q^n-q^0 che abbandonano la strada soffrono una perdita di surplus che oscilla fra 0 per gli utenti prima del toll q^n , a $MC^0 - C^n$ per il nuovo utente marginale a q^0. Questa perdita è alla radice delle critiche del road pricing.
Il modello appena presentato è indipendente del tempo. Un modello dipendente dal tempo può essere costruito a partire del modello di Pigou, aggiungendo due elementi: la variazione della domanda nel tempo e la variazione del flusso nel tempo e nello spazio.
Il caso appena citato spiega il principio del 'congestion pricing' quando i toll possono essere decisi in linea con i costi generati di ciascun utente. Tali prezzi sono chiamati di primo ottimo o best first perché in effetti rappresenta il primo ottimo in cui tutte le strade sono usate con la massima efficienza. Nonostante la sua validità teorica, il congestion pricing di primo ottimo è quasi impraticabile. Ultimamente l'attenzione si è riversata verso più realistiche forme del second best congestion pricing, nelle quali i vari costi o vincoli vanno a dissuadere o impediscono la impostazione di quello di primo livello. Esempio del secondo tipo di congestion princing è l'uso di cordoni per preservare i centri dal traffico invece di tariffare tutti gli archi della rete. Le regole per impostare il problema del congestion pricing di secondo ottimo sono generalmente

molto complicate perche devono riflettere tutti gli effetti indiretti, quelli buoni quelli cattivi (Bohm, 1987).

1.3.1. Congestion pricing applicate a reti stradali

Beckmann et al (1956), Dafermos (1973) e Yang e Hang (1988) hanno risolto il problema nel caso statico, cioè applicando una tariffa efficiente su ciascun arco della rete. E pero abbastanza improbabile che tariffa a livello di arco possano essere stabilite a livello di rete e questo fatto è imputabile ai elevati costi operativi e all'aumento dei tempi persi per le operazioni di pagamento. L'utilizzo di varchi elettronici ha costi meno elevati pero richiede troppi investimenti, in piu della difficoltà connesse all'identificazione del veicolo. Per questo insieme di ragioni la disposizione di varchi a livello di ogni strada è inviabile. Un secondo vincolo per l'introduzione di un sistema di primo ottimo è il fatto che si deve lasciare la possibilità di un alternativa non tariffata. Queste considerazione portano alla domanda di come impostare un sistema di congestion pricing in modo di considerare congestione non tariffata e percorsi senza varchi a livello di rete.
Lambert (1968) e Marchand (1968) furono i primi a affrontare questo problema, usando una semplice rete includendo un unico varco (strada A) e una strada non tariffata (strada B) che collegavano in parallelo un origine e una destinazione. In questo caso la strada è in congestione. L'eccessivo utilizzo della strada B può essere alleviato diminuendo la tariffa del varco A sotto il livello della soluzione di primo ottimo in modo di spostare utenti dalla strada B alla strada A. La soluzione di secondo ottimo è calcolata bilanciando i guadagni dalla riduzione di utilizzo della strada B contro i costi dell'indotto troppo utilizzo della strada A. Verhoef et al (1998) dimostrano che se la strada B è particolarmente congestionata, l'ottimo del secondo problema in A sarà negativo. Concretamente dimostrano che la tariffa ottimale dipende del relativo tempo a vuoto e dalla capacità delle due strade, e nell'elasticità della domanda in relazione al prezzo. Dal punto di vista dei benefici in termini di welfare o benessere del problema di secondo ordine è unicamente una frazione dei benefici ottenuti dal primo problema . Liu and Macdonal (1998) corroborano questo risultato usando un modello descrittivo della statale Route 91 della California durante i test per l'implementazione di un varco a pagamento.

Questi studi possono in qualche modo sottostimare i benefici ottenuto dal secondo problema perché ignorano il processo per cui il prezzo può alterare il comportamento degli utenti. Braid (1996) e de Palma e Lindsey (2000) permettono di introdurre giustamente degli spostamenti considerando 'time varying tolls' nello stesso problema citato precedentemente. In questo caso il secondo caso ottiene migliore risultati in termini di benefici. Un altro modo dove si osserva il miglioramento dell'efficienza con il secondo ottimo è quando si considerano più classi d'utenti con diversi valori di tempo di spostamento assegnato. Pensiamo al caso di una corsia a pagamento, questa risulta più cara però attira utenza con alti valori di tempo di spostamento, mentre quella 'gratuita' è meno cara e offre un servizio più scadente. Usando un modello con due categorie di utenti con diversi valori di tempo di spostamento , Small e Yan (1999) hanno trovato che l'efficienza delle corsie a pagamento in relazione al primo ottimo è maggiore rispetto al modello con eterogeneità nei calori di tempo.

Un approccio generale per trattare la congestione con il problema di secondo ottimo in una rete è stato proposto da Verhoef (1998), che individua dei varchi ottimali statici in un qualunque sotto-insieme di archi (includendo anche i parcheggi) in un rete. La formula, abbastanza complicata, include termini relativi ai costi marginali esterni, e pesi che dipendono della elasticità dei costi e della domanda. L'applicazione di questa formula è molto complicata dovuto alle difficoltà di reperire tutti i valori necessari. E per questo che l'autore propone una formulazione ridotta (third – best - pricing) e una serie di consigli per la messa in pratica.

Un altro problema relativo al congestion pricing è la scelta dell'insieme di archi sui quali andare ad intervenire con il congestion pricing. Questo problema è stato trattato da Verhoef (1998). Nei luoghi dove è stato implementato o testato questi sistemi, Hong Kong o Singapore, hanno definito bene il contorno di applicazione, che semplifica di molto il problema. Questa operazione non è sempre possibile e quindi i pianificatori se confrontano con il problema che la congestione si sposta dalle strade con varchi a quelle senza. Di conseguenza, i maggiori candidati ad accogliere un varco sono le strade a scorrimento veloce e quelle importanti caratterizzate di alti volumi di traffico e tempi di spostamenti ragionevoli nella lunga distanza.

Risulta evidente che il congestion pricing può produrre degli avversi effetti a livello di rete (May and Milne. 2000). Usando gli attuali

strumenti di simulazione all'equilibrio nella rete di trasporto di Cambridge, sono stati confrontati diversi schemi di road pricing: il classico congestion pricing, chiusura del centro (cordon pricing), varchi dipendenti dal tempo e varchi dipendenti dalla distanza. Tutti i quattro schemi si sono dimostrati inclini ad avverse condizioni al contorno, incluso per gli spostamenti 'rat-running' (utenti che cercano le strade non tariffate). Più scoraggianti è il fatto che c'è una piccola percentuale di utenti che ottengono maggiori riduzioni con lo schema di congestion pricing che con gli altri schemi. Per indurre gli utenti a ricondurli a strade con meno congestionate, il congestion pricing tende pure a incrementare le percorrenze, con potenziali effetti ambientali.
De Borger e Proost (2000) calcolano l'efficienza del carico di chilometri, del carico di combustibile, dei parcheggi e il prezzo del trasporto pubblico utilizzando il modello multimodale TRENEN. Hanno concluso nel loro lavoro che la tariffazione dei parcheggi in combinazione con l'introduzioni di cordoni possono portare a efficienze maggiori del 70% dell'efficienze ottenute con la soluzione del problema di primo ottimo, mentre il potenziale del prezzo del combustibile e del trasporto pubblico hanno efficienze molto più limitate.
Gli utenti della rete di trasporto presentano diverse caratteristiche nei loro valore del tempo di spostamento, preferenze di trip-timing, velocità desiderata fra gli altri. Una importante questione nella progettazione di uno schema di congestion charging può essere se è possibile introdurre queste differenze. Arnott e Krauss (1998) hanno dimostrato che è possibile usare varchi anonimi con gruppi di utenti eterogenei e trovare delle tariffe che possono essere variate liberamente nel tempo. L'ottimo di un sistema anonimo deriva dal fatto che la tariffa appropriata dipende solo dei costi marginali esterni, e non delle preferenze individuali.
I benefici di avere utenti con diversi valori del loro tempo che usano strade diverse deve essere pesato con i benefici di avere utenti con diverse preferenze spostamento-tempo nelle stesse strade in tempi diversi. Arnott (1992) investiga lo scarto fra le due utilizzando il modello con congestione forte e due gruppi di utenti e due strade. La distribuzione dei due gruppi nelle due strade è quello desiderato quando i due gruppi hanno soglie di congestione similari, quindi il beneficio è piccolo.
Un'altra caratteristica degli utenti che può influenzare il progetto di un congestion pricing è la velocità. La velocità è un caratteristica delle classi di utenti e delle capacità dei veicoli. Verhoef (1999) ha investigato le ottime tariffe per due gruppi che utilizzano una strada dove è vietato

sorpassare. Il traffico è assunto essere sufficientemente leggero tale che in assenza di differenze di velocità desiderata, non ci sia congestione e necessità di varchi. Verhoef et al dimostrano che le tariffe ottimale per i veicoli lenti è sempre superiore di quelle per i veicoli veloci, e diminuisce con la frazione di veicoli lenti nel traffico totali. Le tariffe decrescono per due ragioni: la prima è che i veicoli lenti ritardano meno che i veloci in media, e secondo, la media della velocità dei veicoli veloci decresce asintoticamente verso la velocità dei veicoli lenti.
La implementazioni di schemi ottimi richiede l'utilizzo di varchi non-anonimi perché veicoli lenti devono pagare di più di quelli veloci. Questo è sempre più vero se la distinzione è fatta fra veicoli leggeri e pesanti. In realtà, per ragioni pratiche o politiche le tariffe ai varchi devono essere uguali. Verhoef et al (1999) dimostra che l'ottimo del secondo problema è la media pesata delle esternalità creata per ciascun gruppo.
L'eterogeneità delle caratteristiche dei veicoli può essere approcciata allo stesso modo dell'eterogeneità degli utenti, I principi del pricing nel caso della congestione statica con classi di veicoli eterogenee è stata stabilita da Dafermos (1973). Tariffare per tipologia di veicolo richiede varchi non anonimi. Queste tipologie sono attualmente applicate a seconda della classe di veicolo (leggero, pesante), numero si assi, peso, etc. E abbastanza consueto che i pianificatori adottino questo tipo di schemi dovuto al maggiore contributo dei camion nella congestione e nelle emissioni, considerando il valore della domanda equivalente.

1.3.2. Il caso di Londra

Dal 17 febbraio del 2003 i conducenti che desiderano entrare nel centro urbano di Londra nei giorni festivi dalle 7:00 alle 18:30 devono pagare 8. Ci sono diverse eccezioni: taxi, veicoli guidati da disabili, veicoli alimentati con combustibili alternativi e autobus. I residenti hanno un 90% di sconto. L'are dove è applicato il congetion charging è indicato tramite segnaletica orizzontale e verticale.

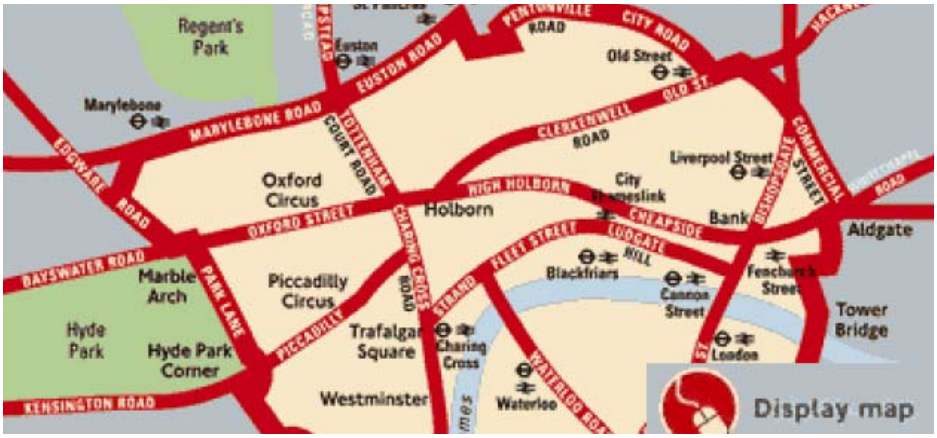

Figura 24: Zona centro di Londra

I pagamenti possono essere realizzati tramite l'acquisto dei biglietti, tramite le macchine disposte sulle strade e tramite internet e cellulare. I conducenti possono acquistare abbonamenti settimanali, mensili e annuali con sconti di circa il 15%. Un sistema di videosorveglianza controlla le targhe dei veicoli e controlla che siano nella lista di veicoli autorizzati. Il sistema è considerato efficiente: attualmente 110.000 conducenti pagano la tariffa (98.000 veicoli leggeri e 12.000 pesanti). Nonostante, il sistema è considerato non ottimale perche:

- La tariffa non è basata sulla distanza percorsa all'interno dell'area considerata;
- La tariffa non è dipendente dell'orario, quindi non varia e non è maggiore nei periodi di maggiore congestione;
- La tariffa non cambia con la posizione, quindi non è maggiore nelle strade con maggiore congestione;
- I prezzi sono sovrastimati;
- Il trasporto pubblico non è stata potenziato in modo di fare fronte all'aumento di domanda

Il progetto prevedeva dei costi di attivazione, primi 3 anni, e gestione fino il 2008 pari a 500M. Come si osserva in tabella, nel 2004/2005 i benefici avuti dagli utenti è stato inferiore a quello atteso, mentre sono stati superiori gli incassi provenienti dalle multe.

	Total (NPV)	Per Operating Year
Start up costs	£180M	£36M
Operating costs	£320M	£64M
Total Cost	*£500M*	*£100M*
Charge revenues	£690M	£138M
Penalty revenues	£110M	£22M
Total Annualized Revenue	*£800M*	*£160M*

Tabella 5: Incassi del congestion charging di Londra

Transport for London e diversi enti accademici hanno stabilito un programma quinquennale di monitoraggio del servizio da un punto di vista economico, sociale e ambientali del sistema (www.tfl.gov.uk/tfl/cclondon/cc_monitoring.shtml). Da questo studio si osserva che più di un milione di utenti entrano nel centro di Londra durante l'ora di punta della mattina di un giorni feriale tipo. Circa l'85% di questi spostamenti si realizzano con il trasporto pubblico. Prima dell'introduzione del sistema, il 12% degli spostamenti erano realizzati con l'auto privata. Dopo cinque mesi questa quota si è ridotta del 20%, cioè il 10% è traffico privato. La gran parte degli utenti hanno cambiato modalità di trasporto, in particolare hanno migrato verso il bus.
Significativo è l'aumento della velocità nella zona in studio. La velocità media è aumentata del 37%, dalle 8 miglie/ora (13 km/h) alle 11 miglie/ore (17 km/h) dopo l'implementazione del sistema. Durante l'ora di punta i ritardi sono diminuiti del 30% e i ritardi nel trasporto pubblico del 50%. Le utenze del trasporto pubblico sono aumentate, soprattutto su gomma del 14% e del 1% sulla metro. Questo suppone una maggiore efficienza del trasporto pubblico locale che riesce a produrre più chilometri per unità di tempo.
Il programma prevede l'utilizzo degli incassi per migliorare il servizio di trasporto pubblico, aumentare il numero di veicoli a disposizione e migliorare la rete di metro.

1.4. Obiettivi della ricerca

Nonostante il numero di studi in letteratura che affrontano il problema della sostenibilità nella gestione e nel progetto delle reti di trasporto, si osserva una mancanza di modelli appropriati per l'ottimizzazione. Questo lavoro si inserisce in questo ambito, nella ricerca di modelli di equilibrio e

di ottimizzazione e di programmi matematici per la risoluzione dei sistemi di trasporto sostenibili.
La costruzione di un modello con questi obiettivi richiede l'integrazione dei due sistemi: trasporti e ambiente. In questo lavoro si determinano in primo luogo i basici concetti di un modello di ottimizzazione dove i flussi sugli archi devono garantire un comportamento dell'utente tale che le condizioni di equilibrio del'utente siano soddisfatte. La risoluzione di questo problema ammette diverse formulazioni che sono presse in considerazione dimostrando teoricamente e numericamente la loro equivalenza sulla rete in studio. Le relazioni fra i flussi di traffico e le emissioni devono essere anche studiate in modo di poter costruire un modello che tenga conto del peso delle emissioni di ciascun utente nella scelta del percorso. Il modello proposto sfrutta diverse politiche come l'introduzione di un sistema di 'toll pricing', di 'congestion pricing' e di aumento della capacità complessiva della rete. Con queste politiche si cerca di modificare il comportamento degli utenti nella scelta dei percorsi in modo di fare pesare agli utenti l'effettiva emissione mediante il pagamento di una tassa per l'attraversamento di un arco. Per analizzare diverse politiche sono stati condotti dei calcoli numerici che dimostrano la valenza dell'approccio e dimostrano l'importanza dell'istrumento in relazione con gli strumenti di simulazioni e di valutazione.
Le simulazioni dopo l'introduzione delle nuove funzioni obiettivi delle emissioni forniscono politiche ottimali con valori di emissioni molto realistici.

2. Relazioni fra i modelli di traffico e i modelli di emissione

Essendo la mobilità sostenibile un area di ricerca di recente interesse per le problematiche ambientali e di congestione, legate a chiusure dei centri abitati e al fenomeno delle targhe alterne nelle città italiane, sono innumerevoli gli studi esistenti in letteratura che trattano l'argomento. Gli argomenti trattati dalla ricerca riguardano il problema dell'assegnazione di traffico di tipo statico e la quantificazione dell'emissioni veicolari e di calcolo delle concentrazioni di inquinanti cosi come l'accoppiamento dei due sistemi tramite modelli di tipo multilivello per l'ottimizzazione del sistema. Fra gli approcci esistenti in letteratura ci sono gli strumenti di simulazione per la valutazione degli scenari mediante confronti di tipo multicriteria e approcci che utilizzano modelli e strumenti di programmazione matematica per la risoluzione del problema di ottimo. In questo capitolo saranno analizzati i più recenti lavori riguardanti questi argomenti.
La letteratura rilevante per lo svolgimento di questa ricerca è stata organizzata in tre correnti di studio:

1. Analisi empirici degli inquinanti emessi dai veicoli a motori
2. Approcci integrati sulla gestione e la pianificazione dei sistemi di trasporto e di qualità dell'aria
3. Sistemi di ottimizzazione delle reti di trasporto con particolare attenzione alla formulazione matematica ed algoritmica del problema di assegnazione.

2.1. Modelli per il problema dell'assegnazione di traffico

L'assegnazione di traffico è la parte del processo di pianificazione dei trasporti che permette l'allocazione di un insieme di spostamenti che avvengono in una specifica rete di trasporto o sistema. Gli input dell'assegnazione richiedono una completa descrizione del sistema trasportistico e una matrice di spostamenti interzonali. L'output del processo dipende della sofisticazione della procedura di assegnazione,

pero anche con gli algoritmi più semplici il calcolo fornisce una stima dei volumi di traffico e dei corrispondenti tempi di spostamento o costi su ciascun arco della rete del sistema di trasporto. L'obiettivo della assegnazione del traffico è quella di identificare il funzionamento della rete e di evidenziare le disfunzionalità dell'esistente sistema di trasporto mediante l'assegnazione di futuri carichi sulla attuale rete, valutare gli effetti di miglioramenti o estensioni dell'attuale sistema di trasporti assegnando flussi di traffico futuri sulla rete che include i futuri miglioramenti o cambiamenti, testare alternativi sistemi di trasporto mediante procedure iterative e molti altre applicazioni.
Ogni modello di traffico deve riflettere nell'algoritmo le decisone degli utenti relativi al quando, dove e come avviene lo spostamento. Il problema dell'assegnazione statico a livello macroscopico ha come obiettivo quello di prevedere i volumi di traffico risultanti dal processo di scelta dei percorsi avvenuti nella rete di trasporto.
Nell'analisi dei modelli ed algoritmi di assegnazione, la congestione del traffico gioca un ruolo fondamentale. Cosi, il risultato di volumi di traffico sempre crescenti produce un abbassamento della velocità media sull'arco, con un incremento dolce all'inizio e sempre più accentuato man mano che le interazioni fra i veicoli e le code sono più frequenti e il flusso osservato diventa nullo. Nell'analisi delle prestazione del sistema ed in particolare del funzionamento dell'arco, queste sono modellate mediante funzioni di deflusso o di costo che descrivono il tempo di spostamento in funzione del volumi di traffico nell'arco. Per tenere conto della congestione queste funzioni sono tipicamente non lineari, positive e crescente in funzione del flusso.

2.1.1. Condizioni di equilibrio di Wardrop

Wardrop (1952) riconosce che le strade scelte dagli utenti sono quelle che riconoscono come più corte (minime) in quelle condizioni di traffico, quindi gli utenti minimizzano i loro spostamenti individuali. sono Nonostante siano stati individuati molti altri fattori che influenzano la scelta del percorso dell'utente oltre il tempo di spostamento, questa situazione definisce l'equilibrio ottimo dell'utente. La situazione ottimale dell'utente è caratterizzata dal fatto che tutti i percorsi attualmente utilizzati fra un origine ed una destinazione hanno lo stesso valore di tempo medio di spostamento. Basta pensare a due percorsi effettivamente utilizzati che hanno tempi diversi. In questo caso gli utenti del percorso

più lungo hanno un incentivo a cambiare al percorso più breve, in questo caso la configurazione dei flussi non definisce un flusso ottimo dell'utente. Il primo in utilizzare il termine di equilibrio fu l'economista F.H Knight (1924). L'ipotesi per la validità di questo primo principio sono che ogni utente abbia un completa conoscenza della rete e quindi di tutti i percorsi a disposizione e delle loro caratteristiche e che i flussi nella rete siano abbastanza stabili nel tempo da considerare l'esperienza di ciascun utente ancora valida.
Le scelte degli utenti possono essere influenzate per ottenere una utilizzazione ottimale, più efficiente, della rete, per esempio minimizzando il tempo totale di spostamento. Il risultato di questa operazione è la configurazione di flussi data dalle scelte dei percorsi nota come ottimo di sistema. L'ottimo di sistema è caratterizzata dal fatto che tutti i percorsi utilizzati fra un origine ed una destinazione hanno lo stesso tempo di spostamento o costo marginale. Infatti, se i costi marginali fra due percorsi fra una coppia OD fossero diversi, sarebbe possibile spostare una frazione del flusso dal percorso con maggiori costi marginali a quello con minori costo abbassando cosi il tempo totale di spostamento.
Generalmente i due problemi non coincidono in quanto l'equilibrio dell'utente non minimizza il tempo totale di spostamento sulla rete. Solo nel caso in cui non c'è congestione nella totalità della rete i due problemi forniscono lo stesso risultato.
Ci sono essenzialmente due vie per ottenere un flusso soluzione dell'ottimo di sistema. Il primo è quando i percorsi sono imposti agli utenti (ottimo di sistema involontario). Ci sono diversi esempi di sistemi di trasporto dove ci sono organi di controllo centralizzati che sono al di sopra delle decisioni presse dagli utenti. Per esempio un sistema di logistica industriale che minimizza il costo totale di distribuzione o massimizzi il profitto.
La seconda alternativa, interessante per lo sviluppo del lavoro di tesi, è cercare di persuadere gli utenti a scegliere i percorsi efficientemente aggiungendo dei costi (tolls) pari ai loro contributi al costo totale. L'ottimo di sistema volontario è più noto come 'congestion pricing' di cui si è lungamente parlato nel capitolo 1.
Date le funzioni che descrivono le relazioni fra i volumi di traffico, i costi dello spostamento e la domanda di trasporto, il traffico può essere assegnato ad una rete di trasporto secondo un insieme di regole o principi. Il principio di eguaglianza dei tempi viene chiamato assegnazione

descrittiva e il principio che minimizza il costo tale rientra nell'assegnazione normativa.
I due principi comportamentali descritti precedentemente sono attribuiti a J.G. Wardrop (1952) e nel seguito saranno richiamate come le condizioni di Wardrop.
Il primo principio di Wardrop è stato definito in questi termini:
"il tempo di spostamento in tutti i percorsi attualmente utilizzati sono iguali, e minori di quelli che avrebbero gli utenti che scegliessero un percorso vuoto o non utilizzato"
Il secondo principio di Wardrop dice che il tempo medio è un minimo.
Le nozioni di ottimo dell'utente e di sistema fu avanzato da Dafermos (1968).
Il problema dell'assegnazione del traffico può essere anche vista come un problema basato sulla teoria dei giochi. Da questo punto di vista Wardrop definisce l'equilibrio dell'utente : "il primo criterio è quasi probabilmente quello che accade in pratuca, da quando si assume che ci sia equilibrio, il traffico tenderà ad stabilizzarsi in una situazione in cui nessun conducente può ridurre il suo tempo di spostamento scegliendo un altro persorso" (Wardrop, 1952).

2.1.1.1. Il caso della domanda fissa

La formulazione matematica delle condizioni dell'equilibrio dell'utente richiedono di considerare una configurazione fattibile di flussi fra una arbitraria coppia OD (p,q). Sia c_{pqr} il costo dello spostamento dall'origine p alla destinazione q scegliendo il percorso r, e l il numero di percorsi fra la coppia p-q con flussi non negativi. In questo caso la configurazione dei flussi in equilibrio dell'utente se e solo se:

$$c_{pq1} = c_{pq2} = \cdots = c_{pql} \qquad (1)$$

E i percorsi inutilizzati fra la coppia OD $l+1$ cammini hanno tempi di viaggio almeno grandi quanto quello dei percorsi utilizzati.
Sia R_{pq} l'insieme dei percorsi senza cicli della coppia $p-q \in$C, h_{pqr} il flusso della strada r, π_{pq} il tempo di viaggio del cammino minimo da p a q, e dato un flusso $h = (h_{pqr})_{r \epsilon R_{pq,(p,q)\epsilon C}}$, l'equilibrio dell'utente di Wardrop può essere scritto come segue:

$$h_{pqr} > 0 \Longrightarrow c_{pqr} = \pi_{pq}, \forall r \subset R_{pq} \tag{2}$$

$$h_{pqr} = 0 \Longrightarrow c_{pqr} \geqq \pi_{pq}, \forall r \subset R_{pq} \tag{3}$$

Per tutte le coppie $(p - q) \in C$. Se si includono anche le condizioni di fattibilità

$$h_{pqr}(c_{pqr} - \pi_{pq}) = 0, \forall r \in R_{pq}, \forall (p, q) \in C \tag{4}$$

$$c_{pqr} - \pi_{pq} \geq 0, \forall \in R_{pq}, \forall (p, q) \in C \tag{5}$$

$$\sum_{r \in R_{pq}} h_{pqr} = d_{pq}, \forall (p, q) \in C \tag{6}$$

$$h_{pqr} \geq 0, \forall r \in R_{pq}, \forall (p, q) \in C \tag{7}$$

$$\pi_{pq} \geq 0, \forall (p, q) \in C \tag{8}$$

Dove (4) e (5) esprimono le condizioni di Wardrop (2) (3) che soddisfano la fattibilità del problema rispetto alla domanda fissa, (7) e (8) assicurano la non negatività dei flussi dei percorsi e i corrispondenti tempi di viaggio.

2.1.1.2. Il caso della domanda variabile

Molto spesso il problema dell'assegnazione del traffico è formulato come un problema con domanda variabile o elastica dove gli spostamenti fra le coppie OD sono modellati come funzioni del tempo di viaggio fra l'origine e la destinazione. E ipotizzato in questo caso che gli utenti abbiano a disposizione delle alternative valide e che questi siano motivati da condizioni economiche nelle sue scelte. Il costo minimo è una misura dei benefici percepiti dagli utenti di una coppia OD e gli incentivi per fare un viaggio decrescono con il crescere della disutilità.
Come la funzione di domanda influenza il numero di spostamenti e la loro distribuzione fra le destinazioni, il modello di domanda elastica può essere visto come un modello combinato di generazione, distribuzione e assegnazione. Nel caso della domanda elastica, l'interpretazione è più semplice del caso della domanda fissa. Se pensiamo al problema trasporti

stico dal punto di vista economico, la domanda OD corrisponde ai potenziali viaggiatori che dipendono dalla funzione di domanda. L'offerta rappresenta la rete stessa i cui prezzi corrispondo ai tempi. La condizione di equilibrio è raggiunta solo quando il numero di spostamenti fra le origini e le destinazioni uguagliano la domanda data dal prezzo di mercato.
L'estensione delle condizioni di equilibrio dell'utente al caso della domanda elastica richiede che la domanda di trasporto sia una funzione dei costi minimi di percorso π.

$$d_{pq} = g_{pq}(\pi), \forall (p,q) \in C$$

In questo caso le condizioni di Wardrop possono essere scritte come segue:

$$h_{pqr} > 0 \Longrightarrow c_{pqr} = \pi_{pq}, \forall r \subset R_{pq} \tag{9}$$

$$h_{pqr} = 0 \Longrightarrow c_{pqr} \geqq \pi_{pq}, \forall r \in R_{pq} \tag{10}$$

$$d_{pq} > 0 \Longrightarrow d_{pq} = g_{pq}(\pi) \tag{11}$$

$$d_{pq} = 0 \Longrightarrow g_{pq}(\pi) \leq 0 \tag{12}$$

Per tutte le coppie $(p-q) \in C$
Le condizioni (9)-(10) corrispondono alle condizioni della domanda fissa (2), mentre le condizioni (11)-(12) vincolano che la domanda di trasporto di ciascuna coppia OD sia uguale al valore della funzione di domanda del percorso minimo, e che la domanda è zero se lo spostamento è troppo elevato per indurre qualsiasi flusso su quella coppia OD. Si assume che la domanda g_{pq} sia non negativa in $\mathbb{R}_+$ per tutte le coppie$(p-q) \in C$. Aggiungendo le condizioni di fattibilità per il flusso h e la domanda d, le condizioni per un equilibrio dell'utente con domande elastica sono:

$$h_{pqr}(c_{pqr} - \pi_{pq}) = 0, \forall r \in R_{pq}, \forall (p,q) \in C, \tag{13}$$

$$(c_{pqr} - \pi_{pq}) \geq 0, \forall r \in R_{pq}, \forall (p,q) \in C, \tag{14}$$

$$\sum_{r \in R} h_{pqr} = g_{pq}(\pi), \tag{15}$$

$$h_{pqr} \geq 0, \forall r \in R_{pq}, \forall (p,q) \in C \tag{16}$$

$$\pi_{pq} \geq 0, \forall (p,q) \in C \tag{17}$$

Il problema è cosi equivalente al (4)-(8) con l'eccezione che la domanda è data dalla funzione di domanda g al cammino minimo.
Questa formulazione è la formulazione classica del problema di assegnazione dove il costo di un percorso è definito come la somma dei singoli costi di ciascun arco appartenente al percorso (costi di viaggio additivi) e il costo in un arco è considerato indipendente del costo negli altri archi della rete (costi separabili).

2.2. Formalizzazione matematica dell'equilibrio dell'utente

La funzione obiettivo dei programmi matematici sono di solito definite in funzione del flussi totali dell'arco. Il percorso, il flusso sull'arco e i relativi costi sono legati come segue. Il flusso di arco $f_{pq} = f_{apq}$, dato un flusso di cammino h, è dato da:

$$f_{apq} =^{def} \sum_{a \in A} \delta_{pqra} h_{pqr}, \forall (p,q) \in C, \forall a \in A \tag{18}$$

dove

$$\delta_{pqra} = \begin{cases} 1 & \text{se } (r \in R)\text{utilizza arco a,} \\ 0 & altrimenti, \end{cases} \forall a \in A, \forall r \in R, \forall (p,q) \in C \tag{19}$$

Si può introdurre la relazione della matrice di incidenza arco-percorso, $\Delta^T = \delta_{pqra}$, per la rete G. Il flusso totale della rete è di conseguenza:

$$f_a = \sum_{(p,q)} f_{apq}, \forall a \in A, \tag{20}$$

O in forma matriciale sintetizzando (18)-(20)

$$\mathrm{f} = \Delta \mathrm{h} \tag{21}$$

Nella condizioni di costi del percorso additivi, i costi d'arco sono in relazione con i costi di percorso:

$$c_{pq}(\mathrm{h}) = \sum_{a \in A} \delta_{pqra} t_a(f_a), \forall r \in R_{pq}, \forall (p,q) \in C, \tag{22}$$

o in forma compatta

$$c(\mathrm{h}) = \Delta^T t(\mathrm{f}) \tag{23}$$

2.2.1.1. Domanda Fissa

Il problema di ottimizzazione corrispondente alle condizioni di Wardrop (4)-(8), se assumono un certo numero di proprietà della rete e delle funzioni associate.

1. La rete è fortemente connessa, al meno esiste un percorso per ogni coppia $(p,q) \in C(|R_{pq}| \geq 1)$
2. La domanda d_{pq} è non negativa per ognuna coppia $(p,q) \in C$
3. Le funzioni di costo $t_a : \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}_{++}$ è positiva e continua per ogni $a \in A$

Le condizioni di Wardrop possono essere scritte in forma di problema di ottimizzazione come segue, che risulta essere equivalente alle condizioni di equilibrio

$$\min \mathrm{T}(\mathrm{f}) = \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} t_a(s) ds, \tag{24}$$

Tale che

$$\sum_{r \in R_{pq}} h_{pqr} = d_{pq}, \forall (p,q) \in C, \tag{25}$$

$$h_{pqr} \geq 0, \forall r \in R_{pq}, \forall (p,q) \in c, \tag{26}$$

$$\sum_{(p,q)\in C} \sum_{r\in R_{pq}} \delta_{apqr} h_{pqr} = f_a \tag{27}$$

Il problema di ottimo (24)-(27) è stato formulato da Dafermos (1968) e è conosciuto con la formulazione arco-percorso. Le condizioni di ottimo di primo ordine di questo problema è equivalente alle condizioni di equilibrio di Wardrop.

2.2.1.2. Equilibrio dell'utente a livello di arco (network representations or link-node)

La rappresentazione a livello di percorso del problema dell'equilibrio dell'utente non è l'unica possibile. La rete G può essere rappresentata da un insieme di nodi N, corrispondenti alle intersezioni e alle zone di origine e destinazione, e da un insieme di archi A, corrispondenti alle strade che collegano le intersezioni. In questo caso ridefiniamo la variabile del flusso d'arco f_{ij} come il flusso dell'arco unidirezionale dal nodo i al nodo j. Allo stesso modo si può definire il vettore dei flussi di ogni componente $k \in C$ come $f_k = (f_{i,j,k})$. Assumendo una domanda fissa, una soluzione fattibile della componente k è un vettore f_k che soddisfi:

$$\sum_{j\in(W_i)} f_{ijk} - \sum_{j\in V_i} f_{jik} = d_{ik}, \forall i \in N \tag{28}$$

$$f_{jik} \geq 0, \forall (i,j) \in A \tag{29}$$

dove

$$ik = \begin{cases} d_k & \text{se nodo i l'origine di componente k ,} \\ -d_k & \text{se nodo i la destinazione di componente k, } \forall i \in N \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \tag{30}$$

definisce la domanda del vettore d_k per la componente k.

$$W_i = [j|(i,j) \in A], \tag{31}$$

$$V_i = [j|(j,i) \in A], \tag{32}$$

Definisce l'insieme di archi che iniziano e finiscono nel nodo i.
Anche in questo caso è possibile adoperare una scrittura compatta introducendo la matrice di incidenza nodo-arco $A = (a_{ib})$ con

$$a_{ib} = \begin{cases} 1 & \text{se nodo i l'origine dell'arco b ,} \\ -1 & \text{se nodo i la destinazione dell'arco b,} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \forall b \in A, \forall i \in N \tag{33}$$

Utilizzando la scrittura compatta, per ciascuna coppia OD il problema è definito come segue:

$$Af_k = d_k, \forall k, \tag{34}$$

$$f_k \geq 0, \forall a \in A \tag{35}$$

E il flusso di arco totali sono dati da:

$$f_a = \sum_{k \in C} f_{ak}, \forall a \in A \tag{36}$$

Il sistema (34)-(35) è una alternativa al sistema (24)-(27) per la rappresentazione del vettori di flussi soluzioni dell'equilibrio dell'utente. Il problema di assegnazione in questo caso è riferito a una formulazione arco-nodo. I due problemi possono non essere equivalenti in quanto ogni percorso e flusso di ciclo ha un'unica configurazione di flussi d'arco non nulla. Contrariamente ciascuna configurazione di flusso non negativa può essere rappresentata da un percorso e il corrispettivo flusso ciclico, che non necessariamente è unico. Da quando il flusso di ciclo non è incluso nella formulazione arco-percorso, si può concludete che

$$F^r \subset F^n \tag{37}$$

E la differenza fra i due insieme corrisponde al flusso di ciclo che è incluso in F^n.
Il fatto che i due insieme di soluzioni fattibili non siano uguali non implica che usando la formulazione arco-percorso o arco-nodo risultino diversi equilibri, se i costi sono positivi, nessun utente sceglierà viaggiare facendo cicli e in questo caso, come dimostrato in capitolo 3, l'equilibrio coincide. Inoltre, si dimostra come le condizioni di ottimo della formulazione arco-nodo sono equivalenti alle condizioni dell'equilibrio dell'utente.

2.2.1.3. Il caso della domanda elastica

In questo caso consideriamo che ciascuna funzione di domanda g_{pq} è non negativa in $\mathbb{R}_+$ e strettamente decrescente nel camino minimo:

$$\pi^1_{pq} > g_{pq}(\pi^2_{pq}), \forall(\pi^1_{pq}, \pi^2_{pq}) \geq 0 \tag{38}$$

Qualora $d_{pq} > 0$.
Le proprietà della rete di trasporto sono:

1. La rete è fortemente connessa,
2. La funzione di domanda $g_{pq:}\mathbb{R}_+ \longrightarrow \mathbb{R}_+$è non negativa, continua e decrescente per ognuna coppia $(p, q) \in C$
3. Le funzioni di costo $t_a : \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}_{++}$ è positiva e continua per ogni $a \in A$

Il problema dell'equilibrio dell'utente con domanda variabile può essere stabilito come segue:

$$\min \mathrm{T(f)} = \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} t_a(s)ds - \sum_{(p,q) \in C} \int_0^{d_{pq}} g^{-1}_{pq}(s)ds, \tag{39}$$

Tale che:

$$\sum_{r \in R_{pq}} h_{pqr} = d_{pq}, \forall(p, q) \in C, \tag{40}$$

$$h_{pqr} \geq 0, \forall (p,q) \in C \tag{41}$$

$$\sum_{(p,q)\in C} \sum_{r\in R_{pq}} \delta_{apqr} h_{pqr} = f_a, \forall a \in A \tag{42}$$

$$d_{pq} \geq 0, (p,q) \in C \tag{43}$$

Il problema di assegnazione con domanda variabile fu formulato la prima volta da Beckmann (1956) usando la formulazione arco-nodo, e le condizioni necessarie di ottimo in programmi non lineari da Kuhn e Tucker (1951).

2.2.1.4. Equilibrio del traffico e 'network games'

Charnes e Cooper (1958) descrivono l'equilibrio dell'utente come un equilibrio di Nash non-cooperativo (1951) in cui i giocatori sono definite dalle coppie OD, competendo fra di loro per minimizzare i tempi di viaggio dei rispettivi flussi. Dafermos (1971,1968) da una prima formalizzazione delle relazioni fra l'equilibrio di Nash e le condizioni di equilibrio dell'utente.
Un gioco 'non cooperativo' è formalmente dato da un insieme di funzioni $\varphi_i : \prod_{i=1}^{N} X_i \longrightarrow \Re$ definito nello spazio $X = \prod_{i=1}^{N} X_i$, e assunto convesso $X_i, i \in (1, \cdots, N)$. In questo caso un punto x^* è un equilibrio di Nash (non cooperativo9 se e solo se per ciascun $i \in (1, \cdots, N)$,

$$\varphi(x^*_{i_-}, x^*_i, x^*_{i_+}) = \min_{x_i \in X_i} \varphi(x^*_{i_-}, x^*_i, x^*_{i_+}), \tag{44}$$

Cioè se tutte le strategie sono ottime rispetto alle individuali funzioni di penalità, basate sulle strategie di ciascun giocatore.
Lavori posteriori (Rosenthal (1973) e Devarajan (1981)) considerano un equilibrio di Nash equivalente all'equilibrio di Wardrop per il caso della domanda fissa. In questo caso il gioco è applicabile con funzioni di osto separabili e funzioni di penalità pari a alla somma dell'integrale dei costi di spostamento sugli arco usati da una coppia OD,

$$\varphi_{pq}(f) = \sum_{a\in A} \int_0^{f_a} t_a(s) ds, \tag{45}$$

2.3. Modello di equilibrio generale e definizioni alternative di equilibrio

Nel caso di costi separabili, ci sono diverse definizioni di equilibrio equivalenti. Nel caso di strutture di costi diverse, queste condizioni di equilibrio possono divergere.
Siano r e s due diversi percorsi in una coppia $(p, q) \in C$, dove $h_{pqr} > 0$. Sia D_{rs} un vettore delle stesse dimensioni di h, pieno di 0 in ogni posizione eccetto quelli corrispondenti alle posizioni r e s, dove gli elementi sono 1 e -1.
In questo caso possiamo definire diversi equilibri:

1. Equilibrio di Wardrop. Il vettore h è un equilibrio di Wardrop se e solo se:

$$c_{pqr}(h) \leq c_{pqs}(h)$$

Il flusso è un equilibrio di Wardrop se per ogni conducente, il costo di ogni alternativa è almeno uguale al costo del percorso scelto.

2. Ottimo dell'utente (Dafermos, 1969): il vettore h è l'ottimo dell'utente se e solo se

$$c_{pqr}(h) \leq c_{pqs}(h + \epsilon D_{rs}), \forall \epsilon [0, h_{pqr}]$$

Il flusso è ottimo dell'utente se qualunque utente che cambia ad un'altra alternativa esperimenterà un costo almeno tanto grande quanto quello della vecchia alternativa.

3. Equilibrato: il vettore h è in equilibrio se e solo se

$$c_{pqr}(h + \epsilon D_{rs}) \leq c_{pqs}(h + \epsilon D_{rs}), \forall \epsilon [0, h_{pqr}]$$

Il flusso è in equilibrio se un conducente che cambia a un percorso alternativo esperimenta un costo che almeno uguale a quello precedente.
L'equilibrio può essere espresso come diversi problemi di traffico: come disuguaglianze variazionali problemi complementari non lineari (NLP) e problemi di punto fisso.

2.3.1.1. Problema alle disuguaglianze variazionali (VIP)

Sia $X \subseteq \mathbb{R}^n$ un insieme non vuoto, chiuso e convesso, e $F : X \longrightarrow \mathbb{R}^n$ una funzione continua in X. Il problema alle disuguaglianze variazionali è trovare un $x^* \in X$ tale che:

$$F(x^*)^T(x - x^*) \geq 0, \forall x \in X \tag{46}$$

Una soluzione al problema alle disuguaglianze variazionali esiste se :

1. l'insieme X è delimitato,
2. F è strettamente monotona,

Nel caso della domanda fissa e con l'ipotesi delle seguenti caratteristiche della rete:

1. La rete è fortemente connessa,
2. la domanda d_{pq} è non negativa per ciascuna coppia $(p, q) \in C$,
3. il costo del percorso $c_{pqr} : \mathbb{R}_+^{|R|} \longrightarrow \mathbb{R}_{++}$ è positiva e continua per ogni $r \in R_{pq}$ e $(p, q) \in C$,
4. se i costi del percorso sono additivi, quindi le funzioni di costo $t_a : \mathbb{R}_+^{|A|} \longrightarrow \mathbb{R}_{++}$ è positiva e continua per ogni $a \in A$.

In questo caso le condizioni di Wardrop nel caso di domanda fissa sono equivalenti al problema variazionale di trovare un $h^* \in H$ tale che

$$c(h^*)^T(h - h^*) \geq 0, \forall h \in H \tag{47}$$

E se si assume che i costi del percorso sono additivi allora le condizioni di Wardrop nel caso della domanda fissa sono allora equivalente al problema variazionale di trovare $f^* \in F^*$ tale che

$$t(f^*)^T(f - f^*) \geq 0, \forall f \in F \tag{48}$$

Queste formulazioni sono state proposte per la prima volta da Smith (840). Il flusso h* che risolve il problema (47) è soluzione se e solo se risolve il programma lineare

$$\min_{h \in H} c(h^*)^T h$$

Nel caso della domanda elastica, è necessario introdurre una matrice di incidenza, $\Gamma^T = (\gamma_{pqr})$ definita da:

$$\gamma_{pqra} = \begin{cases} 1 & \text{se percorso } (r \in R)\text{collega (p,q)}, \\ 0 & altrimenti, \end{cases} \forall r \in R, \forall (p,q) \in C \quad (49)$$

In questo caso le condizioni di Wardrop possono essere scritte in forma compatta come segue:

$$h^T(c - \Gamma\pi) = 0 \quad (50)$$

$$c - \Gamma\pi \geq 0 \quad (51)$$

$$\Gamma^T h - g(\pi) = 0 \quad (52)$$

$$h \geq 0 \quad (53)$$

$$\pi \geq 0 \quad (54)$$

Le condizioni di Wardrop con domanda elastica sono equivalenti al problema alle diseguaglianza variazionali di trovare $(h^*, \pi^*) \in \mathbb{R}_+^{|R|+|C|}$ tale che

$$\begin{bmatrix} c(h^*) - \Gamma\pi^* \\ \Gamma^T h^* - g(\pi) \end{bmatrix}^T \left(\begin{pmatrix} h \\ \pi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h^* \\ \pi^* \end{pmatrix} \right) \geq 0, \forall (h, \pi) \in \mathbb{R}_+^{|R|+|C|} \quad (55)$$

Se si assume che g è invertibile allora la domanda delle condizioni di Wardrop con domanda elastica è equivalente al problema delle disuguaglianze variazionali, quindi cercare $(h^*, d^*) \in H_d$ tale che

$$c(h^*)^T(h - h^*) - g_{-1}(d^*)^T(d - d^*) \geq 0 \quad \forall (h, d) \in H_d \quad (56)$$

La formulazione (38) è dato da Fisk e Boyce (1983), Florian (1979) e Dafermos (1982).

2.3.1.2. Problema Complementare non lineare

Sia $F : \mathbb{R}^n_+ \longrightarrow \mathbb{R}^n$ continua. Un problema complementare non lineare è trovare un vettore $x^* \in \mathbb{R}^n$ tale che

$$F(x^*)^T x* = 0, \tag{57}$$

$$F(x^*) \geq, \tag{58}$$

$$x^* \geq 0 \tag{59}$$

Il problema complementare non lineare è equivalente al problema alle disuguaglianze variazionali definite nello spazio $x = \mathbb{R}^n_+$.

2.4. Approcci analitici per lo studio integrato dei sistemi di trasporto

2.4.1. 'Emission pricing'

Nei modelli di equilibrio descritti precedentemente si è presentato un modello dove gli utenti considerano il costo del percorso come il criterio principale di scelta e secondo il quale cercano di ottimizzare il loro spostamento. Quindi i modelli finora determinano i percorsi di minimo costo secondo certe condizioni e vincoli di equilibrio.
Recentemente sono stati introdotti altri modelli di ottimizzazione dell'utente che prendono in considerazioni altri criteri per la risoluzione diversi dal costo di percorso. Nel contesto della protezione ambientale, un criterio naturale, che va a sommarsi al costo dello spostamento e quello di minimizzare le emissioni generate. Un tale criterio è stato proposto in precedenza da Tzeng e Chen (1993) però in un modello di ottimo di sistema dove gli utenti erano indirizzati verso i percorsi in modo che i costi e le emissioni fossero minime.
Nagurney introduce per primo il termine di 'emission pricing' che può essere semplicemente definito come la tariffa che l'utente deve pagare per garantire una rete ambientalmente sostenibile, e cioè, che soddisfi i livelli standard di qualità dell'aria e tale che la distribuzione dei flussi nella rete sia in equilibrio.

Nagurney definisce diversi modelli di sostenibilità. Nel più semplice di questi modelli, la funzione obiettivo è identica a quella del problema classico di assegnazione presentate in precedenza. I vincoli rimangono gli stessi, con l'aggiunta di un vincolo che serve a includere i limiti della qualità dell'aria.

$$\min \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} t_a(s) ds, \tag{60}$$

$$\sum_{r \in R} h_{pqr} = d_{pq}, \forall (p,q) \in C \tag{61}$$

$$\sum_{a \in A} f_a \sum_{(p,q) \in C} \sum_{r \in R} h_{pqr} \delta_{apqr} \leq \bar{Q} \tag{62}$$

$$h_{pqr} \geq 0, \forall r \in R_{pq}, \forall (p,q) \in c, \tag{63}$$

Le funzioni di costo sono crescenti in funzione del flusso e la funzione obiettivo come definita in (60) è convesso e i vincoli, lineari, sono pure convessi. In questo caso le condizioni di ottimo di Kuhn-Tucker possono stabilirsi come segue: $x^* \in \mathbb{R}_+^N$ è un soluzione ottima se si soddisfa la domanda di trasporto e il seguente sistema di equazione e disequazioni. Per ogni coppia OD $(p,q) \in C$ e ogni percorso $r \in \mathbb{R}$:

$$\bar{c}_{pqr}(h^*, \tau^*) = c_{pqr}(h^*) + \tau^* \sum_{(p,q) \in C} h_{pq} \delta_{pqra} = \begin{cases} = \gamma_{pq} & \text{se h}^* > 0, \\ \geq \gamma_{pq} & \text{se h}^* = 0, \end{cases} \tag{64}$$

Dove τ^* è il moltiplicatore langrangiano associato al vincoli di qualità dell'aria, che può essere interpretato come il costo marginale dell'abbattimento delle emissioni.
In aggiunta, si stabilisce che:

$$\bar{Q} - \sum_{a \in A} f_a \sum_{(p,q) \in C} h_{pqr} \delta_{apq} \begin{cases} = 1 & \text{se} \tau^* > 0, \\ \geq 0 & \text{se} \tau^* = 0, \end{cases} \tag{65}$$

In questo caso $\bar{C}_{pqr}$ nell'equazione (64) è il costo generalizzato associato allo spostamento nel percorso r dopo l'introduzione di un toll nel percorso pari a $\tau^* \sum_{(p,q)\in C} h_{pq}\delta_{pqra}$. In questo caso la tariffa è calcolata in modo che maggiore è il fattore di emissione su un percorso utilizzato e maggiore è il costo che devono pagare gli utenti per utilizzarlo.
Questo modello propone delle politiche tariffarie che coincidono con le condizioni di equilibrio fornisce un costo, assunto pari per tutti gli utenti della rete e pari a τ^*.Secondo quanto esposto in precedenza, ci sono due possibili politiche tariffarie d'applicare tale che siano soddisfatte le condizioni di equilibrio.

1. A livello di arco:

La politica basata sull'introduzioni di tariffe a livello di arco, dato da $t_a = \tau^* f_a, \forall a \in A$, dove τ^* è il costo marginale in equilibrio dell'abbattimento è t_a è la tariffa sull'arco, garantisce che il sistema di trasporto è sostenibile.

2. A livello di percorso:

La politica basata sulla tariffazione a livello di percorso, data da $t_p = \tau^* \sum_{a\in A} f_a\delta_{ar}, \forall r \in R_{pq}$ che garantisce che la rete sarà sostenibile.

2.4.2. 'Emission permits'

Un modello proposto per la soluzione dei problemi di inquinamento è quello delle autorizzazioni e permessi. In letteratura si mostra come le autorizzazioni possono alleviare il problema ambientale (o rispetto degli standard di legge) fissando per una quantità di inquinamento ammissibile il numero totale di permessi.
Montgomery (1972) mostra come i permessi possono riuscire a fare rientrare i valori di qualità dell'aria nei limiti standard. Inoltre il sistema può cogliere la dimensione spaziale del problema se integrati modelli di concentrazione e dispersione degli inquinanti.
Il modello 'emission permits' proposto da Nagurney (2001) risolve l'equilibrio dell'utente. Secondo questa formulazione, l'utente di un percorso è soggetto al pagamento di un costo dovuto alle emissioni generate oltre al costo legato propriamente allo spostamento. La tariffa da

pagare per l'utilizzo di un percorso è pari alla somma del costo marginale legato all'abbattimento delle emissioni per il fattore di emissione in ciascun arco del percorso. Le condizioni di equilibrio del problema consistono in un sistema di equazione e disequazioni da rispettare nei flussi di cammino, nei costi marginali di abbattimento delle emissioni, i permessi e i prezzi dei permessi. Nel punto di equilibrio, un utente in un qualunque arco della rete, è soggetto a pagare il vero costo della loro emissione al percorrere il cammino scelto.
Il modello come è definito da Nagurney considera nel caso più semplice un unico inquinante e un singolo ricettore.
Sia una rete $G = [N, A]$ composta da un insieme di nodi N e di archi A, dove a sono gli archi e r i percorsi fra una coppia generica tale che $(p, q) \in C$. C è l'insieme delle coppie OD. Il flusso di un arco è f_ae il costo associato con l'attraversamento di quell'arco è c_a. Le condizioni di conservazione di flusso devono essere soddisfate dai flussi sulla rete

$$\sum_{r \in R_{pq}} h_{pqr} = d_{pq}, \forall (p, q) \in C \tag{66}$$

$$f_a = \sum_{k \in C} f_{ak}, \forall a \in A \tag{67}$$

Sia K l'insieme di soluzioni fattibili tale che:

$$K \equiv \{f, \ni x \geq 0, \textstyle\sum_{r \in R_{pq}} h_{pqr} = d_{pq}, \forall (p, q) \in C, f_a = \sum_{k \in C} f_{ak}, \forall a \in A\}$$

Sia l_a il numero di licenze o permessi in un generico arco a della rete che permette l'emissioni fino a una certa di inquinante, e l_a^0 la prima allocazione di licenze, assunta non negativa. Sia e_a il fattore di emissione associato al link $a \in A$.
Sia ρ il prezzo della licenza nella rete e τ_a il costo marginale dell'abbattimento dell'arco a.
Gli utenti del percorso $(p, q) \in C$ è in questo caso soggetto non solo ai costi propri dello spostamento, ma anche al pagamento dei costi delle emissioni generate. In questo casi il costo legato all'attraversamento di un arco è dato da $c_a(f) + f_A \tau_a$ e di conseguenza il costo generalizzato nel percorso $(p, q) \in C$, chiamato $\bar{C}_p(f, \tau)$, è dato da:

$$\bar{C}_p(f,\tau) = C_(f) + \sum_{a\in A} f_a \tau_{a\delta apq} \tag{68}$$

Di conseguenza le nuove condizioni di equilibrio in presenza di un sistema di permessi è dato da queste relazioni:

$$\bar{c}_{pqr}(f^*,\tau^*) = c_{pqr}(f^*) + \sum_{(a)\in A} \tau^* e_a \delta_{pqra} = \begin{cases} = \gamma_{pq} & \text{se} \quad h^*_{pqr} > 0, \\ \geq \gamma_{pq} & \text{se} \quad h^*_{pqr} = 0, \end{cases} \tag{69}$$

Dove τ_a^* è il costo marginale di abbattimento delle emissioni in condizioni di equilibrio nell'arco a.
Le condizioni di equilibrio (69) assicurano che l'utente che percorre un cammino della rete fra un coppia OD sia soggetto al pagamento del vero costo delle sue emissioni. La tariffa di un percorso scelto della rete è quindi pari alla somma di tutti gli archi che fanno parte del percorso del costo marginale per l'abbattimento delle emissione per il fattore di emissione legato all'arco.
Per ogni link $a \in A$, il costo marginale in condizioni di equilibrio deve soddisfare il seguente sistema:

$$e_a f_a^* = \begin{cases} = l_a^* & \text{se} \quad \tau_a^* > 0, \\ \leq l_a^* & \text{se} \quad \tau_a^* = 0, \end{cases} \tag{70}$$

Se il costo marginale τ_a^* è positivo in condizioni di equilibrio per un arco a, allora le emissioni in quell'arco è allora pari precisamente al permesso di inquinamento sostenuto da quel arco. Se il numero di licenze supera le emissioni di un link, allora, in equilibrio, il costo marginale dell'abbattimento è zero.
Per ogni $a \in A$ la seguente condizioni deve essere verificata:

$$\tau_a^* = \begin{cases} = \rho^*, & \text{se} \quad l_a^* > 0, \\ \leq \rho^* & \text{se} \quad l_a^* = 0, \end{cases} \tag{71}$$

Quindi, in equilibrio, un numero positivo di licenze comporta che il costo marginale deva essere uguale al prezzo della licenza in un arco. Nonostante, se il prezzo delle licenze supera il costo marginale di

abbattimento, allora il numero di licenze per quel particolare arco sarà nullo.
Per ultimo, il prezzo di equilibrio, ρ^*, di una licenza deve soddisfare la seguente condizione di equilibrio:

$$\sum_{a \in A} (l_a^0 - l_a^*) \begin{cases} = 0, & \text{se } \rho^* > 0, \\ \geq & \text{se } \rho^* = 0, \end{cases} \tag{72}$$

2.5. Programmazione bi-livello

La programmazione bi-livello fra parte della famiglia dei modelli di ottimizzazione gerarchica dove ci sono due funzioni di minimizzazione a due livelli: il livello superiore e il livello inferiore. Il modello cerca una soluzione che massimizza o minimizza il livello superiore mentre simultaneamente viene ottimizzato il livello inferiore. Questa tipologia di modelli sono appropriati per lo studio dei problemi asimmetrici che hanno un leader che integra, nella funzione obiettivo e nei vincoli, la reazione ottimale di un razionale utente del livello inferiore, 'follower', nelle sue decisioni all'interno del processo di ottimizzazione.
La formulazione di un problema bi-livello può essere espressa come segue:

$$\begin{aligned} \min_{x,y} \quad & F(x,y) \\ \text{s.t.} \quad & G(x,y) \leq 0, \\ & \min_{y} \quad f(x,y), \\ & \text{s.t.} \quad g(x,y) \leq 0, \end{aligned} \tag{73}$$

dove $x \in \mathbb{R}^n$ è la variabile del livello superiore e $y \in \mathbb{R}^n$ è la variabile del livello inferiore. Le funzioni F e f sono le funzioni obiettivo del livello superiore e del livello inferiore rispettivamente. Allo stesso modo, le funzioni G e g sono i vincoli rispettivi del livello superiore e del livello inferiore.
La forma rilassata associata al problema (73) è:

$$\begin{aligned} \min_{x,y} \quad & F(x,y) \\ \text{s.t.} \quad & G(x,y) \leq 0, \\ & g(x,y) \leq 0 \end{aligned} \tag{74}$$

E il valore ottimale è il limite inferiore del valore ottimale del problema (73) e la corrispondente regione dove sono contenute le soluzioni fattibili può essere definito come segue:

$$\Omega = \{ \ (x,y) \in \mathbb{R}^{n_1}\mathbb{R}^{n_2} : x \in X, \quad G(x,y) \leq 0 \quad \text{e} \quad g(x,y) \leq 0\}$$

Per un dato vettore $\bar{x} \in X$ l'insieme di soluzioni fattibili del livello inferiore è definito da:

$$\Omega(\bar{x}) = \{ \ (y) \in \mathbb{R}^{n_2} : g(\bar{x},y) \leq 0\}$$

mentre l'insieme delle reazione del livello inferiore è:

$$R(\bar{x}) = \{ \ y \in \mathbb{R}^{n_2} : y \in \text{argmin}\{ \ f(\bar{x},\hat{y}) : \hat{y} \in \Omega(\bar{x})\} \ \}$$

Ogni $y \in R(\bar{x})$ è una risposta razionale.
La struttura del modello bi-livello è appropriato per la risoluzione di un variato numero di problemi reali definiti da relazione di tipo gerarchico fra due livelli decisionali. Fra i campi dove questa tipologia di problemi trova delle applicazioni c'è l'area gestionale (allocazione di risorse, regolazioni ambientali, politiche ambientali ed energetiche, gestione di merce pericolose,..), nell'area ingegneristiche (progetto di rete ottimale, ..), nell'area chimica, ambiente e tecniche ottimali di controllo. In tutti questi casi il livello superiore rappresenta il decisore che stabilisce le politiche che influiscono sulle decisioni presse dal sistema (utenti, mercato,..). La reazione del sistema rappresenta il livello inferiore del sistema presso in considerazione.
Il modello proposto in questo lavoro può essere anche rappresentato da una struttura a due livelli. Il modello è concepito per fornire indicazioni di massima sull'applicazione a livello strategica di politiche o interventi per il miglioramento dal punto di vista ambientale del funzionamento della rete. Nel nostro caso il gestore, l'amministrazione o il responsabile della rete, determinano le politiche tariffarie, le misure di controllo del flusso, politiche per raggiungere alcuni obiettivo incluso la minimizzazione della

congestione o delle emissioni complessive su tutta la rete. Qualunque sia l'intervento e le conseguenze in termini di costo sulla rete, gli utenti continueranno a massimizzare la propria funzione di utilità nella scelta del loro percorso. Questa è la principale premessa per l'utilizzo di una tale struttura per modellizzare la rete di trasporto sostenibile. Più precisamente il decisore sceglie una strategia $x \subseteq \mathbb{R}^n$ e ciascun 'follower' i ha una strategia $Y_i(x) \subseteq \mathbb{R}^{m_i}$ corrispondete a ciascun $x \subseteq \mathbb{R}^n$. Gli insiemi $Y_i(x)$ sono ipotizzati chiusi e convessi. Ogni 'follower' i ha anche una funzione di costo che dipende di entrambi le strategie del leader e di tutti i followers, che può essere espressa

$$\theta_i(x, \cdot) : \prod_{j=1}^{M} \mathbb{R}^{m_j} \longrightarrow \mathbb{R} \tag{75}$$

dove M è il numero di followers. Si assume anche che per i valori fissi di $x \in X$ e $y_j (j \neq i)$ la funzione θ_j è convessa e continua differenziabile in $y_i \in Y_i(x)$.

Nonostante l'ampio ventaglio di possibili applicazione dei modelli gerarchici o multilivello, sono scarse le applicazioni a casi reali. La principale ragione è la difficoltà nell'applicazione dei modelli di risoluzione a larga scala. I problemi bi-livello sono dei classici problemi NP-hard. In letteratura troviamo tecniche per la sua risoluzione: implicit enumeration, cutting planes or meta-heuristics. Molti ricercatori propongono diverse condizioni di ottimo per i problemi bi-livello. Molte di queste condizioni sono utilizzate in vari metodi ed algoritmi resolutivi. Fra i metodi proposti ci sono metodi discendenti, funzioni di penalità e metodi 'trust region'.

2.6. Programmi Matematici con vincoli di equilibrio (MPEC)

Nella risoluzione del problema in studio il problema a due livelli o bi-livello è stato studiato considerando il sistema come un problema MPEC (Mathematical Programs with Equilibrium Constraints). Attualmente le relazioni fra le due classi di problemi sono cosi forti da essere a volte scambiate da alcuni autori.

Un problema MPEC può essere visto come un problema bi-livello dove il problema inferiore consiste in sistema di diseguaglianze variazionali o nel

nostro caso a un NCP (Non Complementary Problem) o MCP (Mixed Complementary Problem). Data una funzione F: $\mathrm{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$, il vettore $x^* \in X$ è soluzione del problema VI (F,X) (diseguaglianze variazionali)

$$F(x^*)^T(x - x^*) \geq 0, \forall x \in X \tag{76}$$

La formulazione generale di un problema MPEC è la seguente:

$$\begin{aligned} \min_{x,y} \quad & F(x,y) \\ \text{s.t.} \quad & (x,y) \in Z \quad \text{e} \quad y \in S(x) \end{aligned} \tag{77}$$

dove $Z \subseteq \mathbb{R}^{n_1+n_2}$ è un insieme chiuso non vuoto e $S(x)$ è l'insieme delle soluzioni del sistema VI.

$$y \in S(x) \longleftrightarrow y \in C(x) \quad e \quad (v-y)^T F(x,y) \geq 0 \quad \forall v \in C(x) \tag{78}$$

definito nel insieme chiuso e convesso $C(x) \subset \mathbb{R}^{n_2}$. Come nel caso del problema bi-livello i termini livello superiore e inferiore sono designate x e y rispettivamente.
Le relazioni fra il problema bi-livello e un MPEC possono essere illustrate prendendo un considerazione una funzione $\psi(x,\cdot)$ che è il gradiente della funzione continue e differenziabile $f : \mathbb{R}^{n_1+n_2}\mathbb{R}$

$$\psi(x,y) = \Delta_y f(x,y) \tag{79}$$

Quindi, per ogni x fisso, il VI (76) caratterizza l'insieme di condizioni del problema di ottimizzazione.

$$\begin{aligned} \min_{y} \quad & f(x,y) \\ \text{s.t.} \quad & y \in C(x) \end{aligned} \tag{80}$$

Se in più, l'insieme C(x) è della forma:

$$C(x) = \{\ y : g(x,y) \leq 0\} \tag{81}$$

Allora il problema (79) non è altro che il livello inferiore del sistema (73). Questo caso dimostra che il problema MPEC può essere formulato come

un programma bi-livello rimpiazzando il problema di livello inferiore alle disuguaglianze variazionali per un problema di ottimizzazione. Alternativamente, si potrebbe minimizzare la somma dei termini di complementary slackness associate con la formulazione KKT delle diseguaglianze variazionali, rispettando le condizione dettate dai vincoli del problema inferiore.

3. Modello di ottimizzazione delle emissioni su rete

In questo capitolo sarà sviluppato il modello che permette l'introduzione di un costo additivo su un insieme di archi predefiniti della rete con l'obiettivo di minimizzare l'emissioni globali sulla rete, soddisfano le condizioni di equilibrio dell'utente. Il modello è definito nella forma di un problema di ottimizzazione bi-livello di cui saranno trattati ciascuna delle sue componenti. In primo luogo si svolgerà uno studio di come è stato risolto il problema di assegnazione e il relativo algoritmo di risoluzione. Si testerà la validità dell'approccio dimostrando l'equivalenza fra diverse formulazioni dell'equilibrio dell'utente. Posteriormente si presenterà un modello di 'emission permits' nel quale si ottimizzerà l'equilibrio dell'utente introducendo vincoli di tipo ambientali tipo il consumo e i limite di emissione su un insieme di archi nella rete. Finalmente saranno presentati e risolti i modelli per la minimizzazione delle emissioni globali sulla rete e di allocazioni di capacità che soddisfano le condizioni di equilibrio dell'utente.

3.1. Modelli di stima delle emissioni di trasporto: le funzioni di emissioni.

In questo capitolo sono illustrate le funzioni di emissioni che sono state utilizzate come funzione obiettivo del problema superiore del modello BLP di ottimizzazione delle emissioni su una rete di trasporto. Per il trasporto su strada, vista l' importanza che riveste sempre maggiormente nella vita quotidiana si sono fatti studi sempre più accurati, e si sono raccolte molte informazioni, che ci hanno permesso di poter sviluppare delle metodologie di calcolo molto precise per la valutazione degli inquinanti.
Le fonti principali di inquinamento per gli autoveicoli sono le emissioni da tubo di scarico e gli idrocarburi prodotti da evaporazione del combustibile.
Nel calcolo degli inquinanti è importante inoltre è la temperatura alla quale sta lavorando il motore, infatti vengono considerati principalmente due casi: motore a freddo, e motore a caldo.

Questo ci porta a dire che le emissioni totali prodotte da un autoveicolo saranno date da:

$$E_{totali} = E^{i,j}_{freddo} + E^{i,j}_{caldo} + E^{i,j}_{evaporative}$$

Essendo i l'inquinante considerato e j la classe di veicolo.:
$E_{totali} =$ emissioni totali
$E_{freddo} =$ emissioni a freddo
$E_{caldo} =$ emissioni a caldo
$E_{evaporative} =$ emissioni evaporative solo VOC

3.1.1. Emissioni a caldo

Le emissioni a Caldo, espresse (in g/km, riferite ad un veicolo nuovo), sono definite confrontando ed elaborando dati da fonti differenti (valori sperimentali su cicli di guida reali o normalizzati, limiti imposti dalle Direttive Europee, informazioni dai costruttori, istituti di ricerca, università, ecc.) dove possibile (autovetture con motore ad accensione comandata, autobus, motocicli, ciclomotori), i dati utilizzati fanno riferimento a studi nazionali su cicli di guida reali, per garantire una maggiore omogeneità del parco veicoli e delle condizioni di guida con quelli effettivamente considerati nelle applicazioni del codice;

3.1.2. Emissioni a freddo

Le emissioni a freddo sono calcolate integrando il fattore di emissione a freddo istantaneo su uno spostamento di lunghezza prefissata d, per opportuni valori della velocità media e della temperatura ambiente:

$$(E_{freddo})_{i,j} = \int (E_{freddo})_{i,j} dx$$

ed $(E_{freddo})_{i,j} = a_{ij} \exp(-x/t_{i,j})$.

3.1.3. Emissione a freddo istantanea

Emissione a freddo istantanea [g/km] è espresso mediante una funzione esponenziale decrescente della distanza percorsa x [km], con a_{ij} il fattore di emissione istantaneo all'avviamento del motore e t_{ij} correlato alla lunghezza percorsa nel transitorio a freddo; nel caso delle autovetture ad accensione comandata catalizzate, i valori di a_{ij}e t_{ij} sono stati definiti sulla base di dati sperimentali a freddo sulla prima ripetizione del ciclo ECE15 o parti di esso, con riferimento a due livelli di temperatura ambiente (0 e 20 °C) ed a tre valori di velocità media (10, 20 e 40 km/h).
Per i motocicli ed i ciclomotori, è attualmente in via di definizione la procedura per il calcolo delle emissioni a freddo.
Le emissioni a caldo ed a freddo, $(E_{caldo})_{i,j}$ e $(E_{freddo})_{i,j}$ in un intervallo di tempo prefissato per una classe di veicoli j selezionata, caratterizzata da un numero di veicoli N_{ij} e da una distanza percorsa M_j (corrispondente, ad esempio, alla percorrenza urbana media nell'intervallo di tempo considerato), sono quindi calcolate attraverso i seguenti prodotti.

$$(E_{caldo})_{i,j} = (E_{caldo-medio})_{i,j} N_j M_j$$
$$(E_{freddo})_{i,j} = (E_{freddo-medio})_{i,j} N_j M_j$$

E' quindi possibile ottenere l'emissione totale della classe di veicoli:

$$(E_{totale})_{i,j} = (E_{caldo})_{i,j} + (E_{freddo})_{i,j}$$

che, sommata ai contributi delle altre classi selezionate per l'applicazione considerata, permette quindi di valutare l'emissione totale:

$$(E_{totale})_i = \sum_j (E_{totale})_{i,j}$$

3.1.4. Emissioni Evaporative

Sono quelle emissioni che si hanno
1) Quando viene aperto il serbatoio per il rifornimento,
2) A causa dell' escursione termica tra giorno e notte,
3) In qualsiasi caso in cui il combustibile può essere rilasciato nell' aria,
4) quando veicolo viene arrestato.

Questi fattori sono una funzione della temperatura circostante, e della volatilità del combustibile.
Questi principi con delle eccezioni si applicano a tutte le sostanze inquinanti, ma classi diverse di veicoli si comportano in modo diverso, e le relazioni tra le emissioni variano per ogni sostanza inquinante.
Per questa ragione una stima da traffico disomogeneo, deve essere fatta come una sommatoria delle singole emissioni delle singole classi omogenee, e deve essere considerato anche il caso di strade con tipo di traffico diverso.
Questo deve essere considerato per ogni singola sostanza inquinante.
Vediamo ora i metodi di calcolo che useremo per la valutazione degli inquinanti e li riportiamo in una nuova tabella, dove verrà anche indicato il tipo di contributo, caldo, freddo, evaporativo. Vedi Tabella 0.

Sostanza inquinante	Livello	Metodo di calcolo	Contributi
CO2	1	Metodo standard	caldo, freddo
CO	1	Metodo standard	caldo, freddo
VOC	1	Metodo standard	caldo, freddo, evap
NOX	1	Metodo standard	caldo, freddo
PM	1	Metodo standard	caldo, freddo
Consumo di combustibile	1	CO2, CO, VOC, PM	caldo, freddo,evap
SO2	1	Dal consumo di combustibile	caldo, freddo,evap
Pb	1	Dal consumo di combustibile	caldo, freddo ,evap
N2O	2	Metodio standard	caldo, freddo
CH4	2	Dalla relazione VOC = NMVOC +	caldo, freddo
NMVOC	2		caldo, freddo, evap
Specie di VOC	2	Dalle emissioni di VOC e composizione del combustibile	caldo, freddo, evap
Taglia PM	3	Dalle emissioni di PM e le distribuzioni di taglia	caldo, freddo
NH3	3	Metodo standard	caldo, freddo

H2S	3	Metodo standard	caldo, freddo
NO2	3	Metodo standard	caldo, freddo
HM	3	Metodo standard	caldo, freddo

Tabella 6: Metodi di calcolo utilizzati per la stima delle emissioni

3.1.5. Emissioni a caldo

Le emissioni a caldo sono quelle prodotte quando il motore ed i dispositivi che controllano l' inquinamento sono alla loro temperatura di regime.
Queste si possono calcolare se si conosce il tempo di funzionamento e la categoria di appartenenza del veicolo, noti questi due parametri si può usare la formula

$$E_{caldo} = e \quad \text{x} \quad m \qquad (82)$$

dove
E_{caldo} è l' emissione per unità di massa per unita di tempo espressa in (t /a);
e è il fattore di emissione a caldo;
m è per ogni categoria la distanza espressa in (Km /a);
m si può calcolare usando la formula

$$m = n \quad \text{x} \quad l \qquad (83)$$

dove
n numero dei veicoli per ogni categoria
l è la distanza percorsa dal veicolo nel tempo considerato.
È ovvio che il calcolo deve essere applicato per ogni categoria di veicolo. Ma siccome i fattori di emissione sono diversi a seconda del veicolo e a seconda di quale strada si percorre, (urbano, sub-urbano, autostrada), questo perché ogni strada ha velocità media diversa, possiamo vedere allora che per poter applicare la formula abbiamo bisogno delle seguenti informazioni aggiuntive

- Il numero di veicoli per ogni categoria
- La percorrenza annuale per ogni tipo di veicolo

- Il tipo di strada che è stato percorso espresso in percentuale per i vari tipi di strade
- Velocità media per ogni tipo di strada
- Il fattore di emissione ed la relazione che ha lo stesso con la velocità

Possiamo quindi correlare **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e (83) formule prendendo in considerazione le categorie

$$E_k = \sum_{i=1}^{i=categorie} (n_i \quad \text{x} \quad l_i) \quad \text{x} \sum_{j=1}^{j=tipodistrada} p_{i,j} \quad \text{x} \quad e_{i,j,k} \qquad (84)$$

dove
k = inquinante,
i = numero delle categorie di veicolo,
j = numero dei tipi di strada,
n_i= numero di veicoli categoria i,
$p_{i,j}$= percentuale della distanza annuale percorsa per ogni tipo di strada per il tipo di veicolo,
$e_{i,j,k}$= è il fattore di emissione della sostanza inquinante 'k' corrispondente alla velocità media per il tipo di strada.

3.1.5.1. Autoveicoli e veicoli da trasporto leggero

Molti studi si sono fatti in diversi paesi, e il numero di dati che sono stati raccolti sono stati analizzati, e sono state elaborate delle formule che descrivono l' andamento degli inquinanti in funzione della velocità per le autovetture ed i veicoli da trasporto leggero.
Ma visti gli elevati costi per la sperimentazione, non si sono verificati i risultati ottenuti per tutti i vari tipi di motori, e per gli ultimi modelli si sono stabiliti dei coefficienti di riduzione dei risultati precedenti.
Si sono fatte delle tabelle[2] che indicano per il tipo di veicolo, il range di velocità, e la correlazione con la velocità del tipo di emissione.

[2] Si specifica che l' R^2per il CO_2 non si riporta in quanto il CO_2 si determina in funzione del consumo del carburante.

Vehicle class	Cylinder capacity	Speed range	CO emission factor (g/km)	R2
PRE ECE	All categories	10-100	281V-0.630	0.924
	All categories	100-130	0.112V + 4.32	-
ECE 15-00/01	All categories	10-50	313V-0.760	0.898
	All categories	50-130	27.22 - 0.406V + $0.0032V^2$	0.158
ECE 15-02	All categories	10-60	300V-0.797	0.747
	All categories	60-130	26.260 - 0.440V + $0.0026V^2$	0.102
ECE 15-03	All categories	10-20	161.36 - 45.62 ln(V)	0.790
	All categories	20-130	37.92 - 0.680V + $0.00377V^2$	0.247
ECE 15-04	All categories	10-60	260.788V-0.910	0.825
	All categories	60-130	14.653 - 0.220V + $0.001163V^2$	0.613
Improved conventional	CC < 1.4 l	10-130	14.577 - 0.294V + $0.002478V^2$	0.781
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	8.273 - 0.151V + $0.000957V^2$	0.767
Open loop	CC < 1.4 l	10-130	17.882 - 0.377V + $0.002825V^2$	0.656
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	9.446 - 0.230V + $0.002029V^2$	0.719
EURO I	CC < 1.4 l	10-130	9.846 - 0.2867V + $0.0022V^2$	0.133
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	9.617 - 0.245V + $0.001729V^2$	0.145
	CC > 2.0 l	10-130	12.826 - 0.2955V + $0.00177V^2$	0.109

Tabella 7: Dipendenza dalla velocità delle emissioni di CO per autoveicoli a

Vehicle class	Cylinder capacity	Speed range	VOC emission factor (g/km)	R2
PRE ECE	All categories	10-100	30.34V-0.693	0.980

	All categories	100-130	1.247	-
ECE 15-00/01	All categories	10-50	24.99V-0.704	0.901
	All categories	50-130	4.85V-0.318	0.095
ECE 15-02/03	All categories	10-60	25.75V-0.714	0.895
	All categories	60-130	$1.95 - 0.019V + 0.00009V^2$	0.198
ECE 15-04	All categories	10-60	19.079V-0.693	0.838
	All categories	60-130	$2.608 - 0.037V + 0.000179V^2$	0.341
Improved conventional	CC < 1.4 l	10-130	$2.189 - 0.034V + 0.000201V^2$	0.766
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.999 - 0.034V + 0.000214V^2$	0.447
Open Loop	CC < 1.4 l	10-130	$2.185 - 0.0423V + 0.000256V^2$	0.636
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$0.808 - 0.016V + 0.000099V^2$	0.49
EURO I	CC < 1.4 l	10-130	$0.628 - 0.01377V + 8.52E-05V^2$	0.207
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$0.4494 - 0.00888V + 5.21E-05V^2$	0.197
	CC > 2.0 l	10-130	$0.5086 - 0.00723V + 3.3E-05V^2$	0.043

Tabella 8: Dipendenza delle emissioni VOC dalla velocità per autoveicoli a benzina

Vehicle class	Cylinder capacity	Speed range	NOX emission factor (g/km)	R2
PRE ECE ECE 15-00/01	CC < 1.4 l	10-130	$1.173 + 0.0225V - 0.00014V^2$	0.916
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.360 + 0.0217V - 0.00004V^2$	0.960
	CC > 2.0 l	10-130	$1.5 + 0.03V + 0.0001V^2$	0.972
ECE 15-02	CC < 1.4 l	10-130	$1.479 - 0.0037V + 0.00018V^2$	0.711
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.663 - 0.0038V + 0.00020V^2$	0.839
	CC > 2.0 l	10-130	$1.87 - 0.0039V + 0.00022V^2$	-
ECE 15-03	CC < 1.4 l	10-130	$1.616 - 0.0084V + 0.00025V^2$	0.844
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	1.29 e 0.0099V	0.798
	CC > 2.0 l	10-130	$2.784 - 0.0112V + 0.000294V^2$	0.577
ECE 15-04	CC < 1.4 l	10-130	$1.432 + 0.003V + 0.000097V^2$	0.669
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.484 + 0.013V + 0.000074V^2$	0.722
	CC > 2.0 l	10-130	$2.427 - 0.014V + 0.000266V^2$	0.803

Improved conventional	CC < 1.4 l	10-130	-0.926 + 0.719 ln(V)	0.883
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	1.387 + 0.0014V + 0.000247V^2	0.876
Open Loop	CC < 1.4 l	10-130	-0.921 + 0.616 ln(V)	0.791
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	-0.761 + 0.515 ln(V)	0.495
EURO I	CC < 1.4 l	10-130	0.5595 - 0.01047V + 1.08E-04V^2	0.122
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	0.526 - 0.0085V + 8.54E-05V^2	0.077
	CC > 2.0 l	10-130	0.666 - 0.009V + 7.55E-05V^2	0.014

Tabella 9: Dipendenza delle emissioni di NOx dalla velocità per veicoli a benzina

Vehicle class	**Cylinder capacity**	**Speed range**	**CO2 emission factor (g/km)**	**R2**
PRE ECE	CC < 1.4 l	10-130	768 + 3.13V - 199ln(V)	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	1005 + 4.15V - 263ln(V)	-
	CC > 2.0 l	10-130	1498 + 8.21V - 0.0133V^2 - 421ln(V)	-
ECE 15-00/01	CC < 1.4 l	10-130	173 - 2.52V + 0.0182V^2 + 1930/V	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	1065 + 4.00V - 284 ln(V)	-
	CC > 2.0 l	10-130	835 + 3.71V + 2297/V - 229ln(V)	-
ECE 15-02	CC < 1.4 l	10-130	345 + 0.0106V2 + 1275/V - 68.6ln(V)	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	835 + 3.93V + 986/V - 231ln(V)	-
	CC > 2.0 l	10-130	879 + 4.32V + 2298/V - 244ln(V)	-
ECE 15-03	CC < 1.4 l	10-130	664 + 2.09V + 0.00449V^2 - 167ln(V)	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	1074 + 5.49V - 0.00461^{2}V - 305ln(V)	-
	CC > 2.0 l	10-130	957 + 4.51V + 1832/V - 264ln(V)	-
ECE 15-04	CC < 1.4 l	10-130	614 + 2.56V - 157ln(V)	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	264 + 0.0103V2 + 2049/V - 49.8ln(V)	-
	CC > 2.0 l	10-130	1173 + 4.83V - 315ln(V)	-
Improved conventional	CC < 1.4 l	10-130	226 - 3.91V + 0.0368V^2	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	333 - 6.11V + 0.0518V^2	-
Open Loop	CC < 1.4 l	10-130	238 - 3.67V + 0.0319V^2	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	331 - 5.88V + 0.0499V^2	-
EURO I	CC < 1.4 l	5-130	157 - 2.07V + 0.0172V2 + 1835/V	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	5-130	231 - 3.62V + 0.0263V2 + 2526/V	-

	CC > 2.0 l	5-130	294 - 5.50V + 0.0393V2 + 3513/V	-

Tabella 10: Dipendenza delle emissioni di CO2 dalla velocità per autoveicoli a benzina

Pollutant	Cylinder capacity	Speed range	Emission factor (g/km)	R2
CO	All categories	10-130	5.413V-0.574	0.745
NOX	CC < 2.0l	10-130	$0.918 - 0.014V + 0.000101V^2$	0.949
	CC > 2.0l	10-130	$1.331 - 0.018V + 0.000133V^2$	0.927
VOC	All categories	10-130	4.61V-0.937	0.794
PM	All categories	10-130	$0.45 - 0.0086V + 0.000058V^2$	0.439
CO2	All categories	10-130	374 - 6.58V + 0.0442V2 - 30.3/V	-

Tabella 11: Variazione dei vari inquinanti per veicoli diesel < 2.5 t.

Pollutant	Cylinder capacity	Speed range	Emission factor (g/km)	R2
CO	All categories	10-120	$1.4497 - 0.03385V + 2.1E-04V^2$	0.550
NOX	All categories	10-120	$1.4335 - 0.026V + 1.785E-04V^2$	0.262
VOC	All categories	10-130	$0.1978 - 0.003925V + 2.24E-05V^2$	0.342
PM	All categories	10-130	$0.1804 - 0.004415V + 3.33E-05V^2$	0.294
CO2	All categories	10-130	286 - 4.07V + 0.0271V2	-

Tabella 12: Dipendenza dei vari inquinanti per veicoli disel che soddisfano la direttiva EURO 1

Pollutant	Cylinder capacity	Speed range	Emission factor (g/km)	R2
CO	All categories	10-130	$12.523 - 0.418V + 0.0039V^2$	0.893
NOX	All categories	10-130	$0.77V^{0.285}$	0.598
VOC	All categories	10-130	26.3V-0.865	0.967
CO2	All categories	10-130	$283 - 4.15V + 0.0291V^2$	-

Tabella 13: Dipendenza dei fattori di emissione per autoveicoli alimentati a GPL < 2.5 t

Pollutant	Cylinder capacity	Speed range	Emission factor (g/km)	R2
CO	All categories	10-130	$0.00110V^2 - 0.1165V + 4.2098$	n/a
NOX	All categories	10-130	$0.00004V^2 - 0.0063V + 0.5278$	n/a
VOC	All categories	10-130	$0.00010V^2 - 0.0166V + 0.7431$	n/a
CO2	All categories	10-130	$0.0208V^2 - 2.70V + 228$	n/a

Tabella 14: Dipendenza dei fattori di emissione per veicoli alimentati a GPL < 2.5 t. che soddisfano la direttiva EURO 1

Pollutant	Vehicle class	Speed range	Emission factor (g/km)	R2
CO	Uncontrolled	5-110	$0.01104V^2 - 1.5132V + 57.789$	0.732
	EURO I	5-120	$0.0037V^2 - 0.5215V + 19.127$	0.394
NOX	Uncontrolled	5-110	$0.0179V + 1.9547$	0.159
	EURO I	5-120	$7.55E\text{-}05V^2 - 0.009V + 0.666$	0.014
VOC	Uncontrolled	5-110	$0.000677V^2 - 0.1170V + 5.4734$	0.771
	EURO I	5-120	$5.77E\text{-}05V^2 - 0.01047V + 0.5462$	0.358
CO2	Uncontrolled	5-110	$0.0541V^2 - 8.4326V + 514.5$	0.787
	EURO I	5-120	$0.0621V^2 - 9.8381V + 601.2$	0.723

Tabella 15: Dipendenza dalla velocità dei fattori di emissione per i veicoli alimentati a benzina < 3.5 t.

Pollutant	Vehicle class	Speed range	Emission factor (g/km)	R2
CO	Uncontrolled	10-110	$0.00020V^2 - 0.0256V + 1.8281$	0.136
	EURO I	10-110	$0.000223V^2 - 0.026V + 1.076$	0.301
NOX	Uncontrolled	10-110	$0.000816V^2 - 0.1189V + 5.1234$	0.402

	EURO I	10-110	$0.000241V^2 - 0.03181V + 2.0247$	0.072
VOC	Uncontrolled	10-110	$0.000066V^2 - 0.0113V + 0.6024$	0.141
	EURO I	10-110	$0.0000175V^2 - 0.00284V + 0.2162$	0.037
PM	Uncontrolled	10-110	$0.0000125V^2 - 0.000577V + 0.2880$	0.023
	EURO I	10-110	$0.000045V^2 - 0.004885V + 0.1932$	0.224
CO2	Uncontrolled	10-110	$0.066V^2 - 8.2756V + 464.4$	0.486
	EURO I	10-110	$0.0617V^2 - 7.8227V + 429.51$	0.422

Tabella 16: Dipendenza dei fattori di emissione per veicoli diesel < 3.5 t.

Per quanto riguarda i motori di nuova concezione ovvero EURO 2-3-4, non si è proceduto a determinare delle equazioni che dessero la dipendenza dei fattori di emissione dalla velocità ma si proceduto ad assegnare dei coefficienti di riduzione delle emissione che devono essere rispettati.

gasoline	**cold excess emission**			**hot emission factor**		
reduction rates (%)	**CO**	**HC**	**NOx**	**CO**	**HC**	**NOx**
from EURO 1 to EURO 2	30	30	50	10	30	50
from EURO 2 to EURO 3	20	40	40	0	30	40
from EURO 3 to EURO 4	40	40	40	30	30	30
cumulative reduction rates (%) from EURO 1	**CO**	**HC**	**NOx**	**CO**	**HC**	**NOx**
to EURO 2	30	30	50	10	30	50
to EURO 3	44	58	70	10	51	70
to EURO 4	66	75	82	37	66	79

Tabella 17: Coefficienti di riduzione in % per i veicoli EURO 2, EURO3 e EURO4

3.1.5.2. Fattori di emissione per i veicoli pesanti

Per quanto riguarda invece i veicoli Pesanti, si hanno hanno a disposizione soltanto pochi dati, la compilazione completa è quella presentata nel Workbook sulle emissioni da trasporto su strada. Il Workbook offre fattori di emissione per tutti i tipi di veicolo, inclusi gli autocarri pesanti ed autobus, per una discreta varietà di modelli. Altre caratteristiche che sono state prese in considerazione sono, la pendenza della strada e per i veicoli pesanti anche lo stato del carico del veicolo. I veicoli pesanti sono suddivisi ulteriormente in un numero di classi a seconda del loro peso, i fattori di emissione sono stati misurati facendo prove sul banco. I tipi di motori che sono stati usati per le prove sono stati dedotti dalla flotta della Repubblica Federale Tedesca, in modo da ottenere un campione rappresentativo della flotta. Ogni motore era identificato dal tipo di veicolo nel quale veniva usato.
Furono stabilite 4 categorie

1) Autocarro,
2) Veicolo articolato,
3) Bus extra urbani,
4) Autobus urbani,

Ogni categoria era ulteriormente divisa secondo la massa , tipo, anno di modello, le prove sono state fatte al banco (usando il 3-mode, US transient, and TÜV-FIGE Cycles). Le velocità di prova furono registrate in funzione del tempo per 25 veicoli commerciali durante la normale percorrenza sui seguenti tipi di strada.

- Autostrada,
- Strada statale a 2 carreggiate,
- Strada extra urbana,
- Strada urbana,
- Strade urbane a lunga percorrenza,
- Strade urbane a breve percorrenza,

Su ogni tipo di strada il traffico fu suddiviso in traffico a:

- Scorrimento veloce,
- Lievemente congestionato,
- Mediamente congestionato,

- Molto congestionato,

Le strade furono suddivise anche in 7 gradienti di pendenza, e 2 fattori di carico per classe di pendenza (10% e 90%) dalla combinazione di questi fattori furono calcolate le emissioni per una serie di veicoli industriali a seconda del tipo,ed di traffico identificato. I fattori di emissione dal Workbook furono comparati con quelli ottenuti dalle prove sul banco, e con 2 modelli di emissioni, sviluppati dall'Università tecnica di Graz, il confronto i ogni caso mostrò un livello accettabile di accordo, tenendo presente che ognuno degli insiemi di dati è basato su misurazioni limitate e su esemplari diversi di motori e veicoli, seguendo procedure sperimentali diverse. Questo ha permesso di avere una rappresentazione accurata dei modelli, ed i fattori del Workbook sono usati come la base per la derivazione della velocità media per le funzioni di emissione relative. Il Workbook offre fattori di emissione discreti per ognuno dei set di guida identificati, che dipendono dalla velocità media del veicolo.

$$\epsilon = \mathrm{K} + av + bv^2 + cv^3 + \frac{d}{v} + \frac{e}{v^2} + \frac{f}{v^3} \qquad (85)$$

Dove
ϵ = è la percentuale di emissione in g/Km per un veicolo considerato sopra in una strada con una determinata pendenza con il suo fattore di carico.
K = costante
a- *f* = coefficienti
v= velocità media del veicolo in Km/h

Furono stabilite 4 classi di veicolo in funzione del peso (3.5 a 7.5 tonnellate, da 7.5 a 16 tonnellate, da 16 a 32 tonnellate e 32 a 40 tonnellate), autobus urbani e bus extra urbani. Le sostanze inquinanti considerate sono:

- Monossido di carbonio
- Acido carbonico,
- Idrocarburi
- Ossidi di Azoto NOx
- Particolato

I coefficienti per queste sostanze sono riportati nelle tavole A1 – A4 per i veicoli trasporto pesante

	K	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
CO	1.50	-0.0595	0.00119	-6.16E-6	58.8	0	0
CO2	110	0	0	0.000375	8702	0	0
VOC	0.186	0	0	-2.97E-7	61.5	0	0
NOX	0.508	0	0	3.87E-6	92.5	-77.3	0
PM	0.0506	0	0	1.22E-7	12.5	0	-21.1

Tabella 18: Coefficienti per i fattori di emissione per i veicoli da trasporto con peso lordo compreso tra 3.5 – 7.5 tonnellate

	K	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
CO	3.08	-0.0135	0	0	-37.7	1560	-5736
CO2	871	-16.0	0.143	0	0	32031	0
VOC	1.37	0	-8.10E-5	0	0	870	-3282
NOX	2.59	0	-0.000665	8.56E-6	140	0	0
PM	0.0541	0.00151	0	0	17.1	0	0

Tabella 19: Coefficienti per i fattori di emissione per i veicoli da trasporto con peso lordo compreso tra 7.5 – 16 tonnellate

	K	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
CO	1.53	0	0	0	60.6	117	0
CO2	765	-7.04	0	0.000632	8334	0	0
VOC	0.207	0	0	0	58.3	0	0
NOX	9.45	-0.107	0	7.55E-6	132	0	0
PM	0.184	0	0	1.72E-7	15.2	0	0

Tabella 20: Coefficienti per i fattori di emissione per i veicoli da trasporto con peso lordo compreso tra 16– 32 tonnellate

	K	**a**	**b**	**c**	**d**	**e**	**f**
CO	0.349	0.0101	0	0	79.6	0	0
CO2	1576	-17.6	0	0.00117	0	36067	0
VOC	0.254	0	0	0	53.9	0	0

NOX	5.27	0	0	0	343	-552	0
PM	0.246	0	0	0	18.2	0	0

Tabella 21: Coefficienti per i fattori di emissione per i veicoli da trasporto con peso lordo compreso tra 32– 40 tonnellate.

Le tabelle 22, 23 e 24 invece rappresentano i coefficienti per gli autobus urbani, extra urbani ed i veicoli con peso lordo superiore a 40 tonnellate

	K	***a***	***b***	***c***	***d***	***e***	***f***
CO	1.64	0	0	0	132	0	0
CO2	679	0	0	-0.00268	9635	0	0
VOC	0.0778	0	0	0	41.2	0	184
NOX	16.3	-0.173	0	0	111	0	0
PM	0.0694	0	0.000366	-8.71E-6	13.9	0	0

Tabella 22: Coefficienti di emissione per autobus urbani

	K	***a***	***b***	***c***	***d***	***e***	***f***
CO	0.930	0	-4.00E-5	0	99.2	0	0
CO2	523	0	-0.0487	0.000527	12501	0	0
VOC	0.632	-0.00402	0	0	59.3	0	254
NOX	6.12	0	-0.000651	7.23E-6	181	0	0
PM	0.193	0	0	0	15.6	0	29.6

Tabella 23: Coefficienti di emissione per bus extra urbani

Weight class	**Weight correction factor (applicable to functions for HGVs 32 - 40 t)**		
	NOX	**PM**	**CO2**
40 - 50 t	1.18	1.12	1.17
50 - 60 t	1.41	1.24	1.35

Tabella 24: Coefficienti di emissione per veicoli peso lordo > di 40 tonnellate

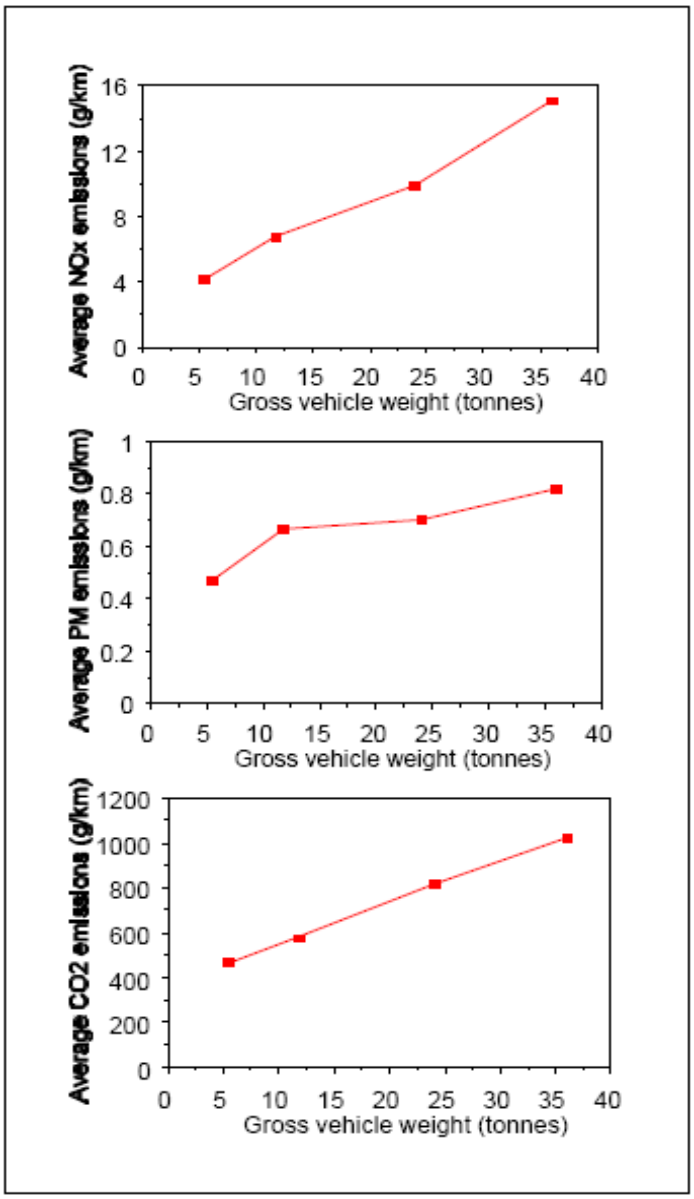

Figura 25: medie dei fattori di emissione in funzione della velocità con il peso lordo del veicolo

Per veicoli di peso lordo > di 40 tonnellate non è stato possibile fornire funzioni di emissione perché non ci sono dati sufficienti, comunque le emissioni di CO ed HC non mostrano una grande dipendenza dal peso, così le funzioni trovate per i veicoli con peso compreso tra 32 – 40

Tonnellate possono essere usate anche per i veicoli con peso maggiore. Mentre le emissioni di NOx, e le emissioni di CO_2 , ed in parte le emissioni di PM, sono più dipendenti dal peso del veicolo. La determinazione degli inquinanti fu fatta su classi di veicolo, e per una velocità compresa tra 10 e 90 Km/h ad intervalli di 10 Km/h e poi una media dei valori ottenuti. Questo valore medio fu preso per considerare una percentuale di emissione tipica per ogni sostanza inquinante in relazione al peso del veicolo.
In una tabella furono riportate le medie e il peso del veicolo. Questa procedura dimostrò una ragionevole relazione sistematica tra peso lordo e percentuale di emissioni media e fece notare come l'estrapolazione a pesi maggiori poteva essere accettabile.
In figura 25 si riporta le medie dei fattori di emissione in funzione della velocità con il peso lordo del veicolo
Per valutare le emissioni per veicoli di peso a pieno carico superiori a 40 tonnellate si possono utilizzare le formula per quelli con peso inferiore a 40 tonnellate e moltiplicare per un coefficiente di correzione.

3.2. Risoluzione del problema di assegnazione

3.2.1. Caso della domanda fissa

Nella risoluzione dei problemi che saranno sviluppati nei prossimi capitoli è stato risolto il problema considerando la formulazione arco-nodo in modo di evitare l'enumerazione esplicita o implicita dei percorsi sulla rete. Per semplicità associamo che ogni nodo sia origine e destinazione dello spostamento. Il modello in questione è stato presentato in capitolo Il modello è stato presentato sommariamente in capitolo 2.1.2.1. La formulazione adottata per la risoluzione è stata quella NCP (Non Linear Complementary). Il problema presenta due variabili nella formulazione, il flusso f_{ij} e il costo t_{ij}. Le variabili $f = \{f^1, f^2, \cdots, f^k\}$ rappresentano il flusso di ogni componente $k \in C$ sulla rete e con f_{ij}^k il flusso della corrente k sull'arco da i a j. Le variabili $t = \{t^1, t^2, \cdots, t^k\}$ sono composte da t_{ik} che sono i tempi minimi della componente $k \in C$ dal nodo i. Assegnando d_{ik} la domanda al nodo i della componente $k \in C$, c_{ij} i costi totali dell'arco i-j e usando come simbolo $\perp$ per rappresentare condizione di complementarietà, le condizioni di equilibrio

possono essre scritte come un problema NCP. Il problema presenta due vincoli, la conservazione dei flussi di ogni componente $k \in C$ nel nodo i

$$\sum_{j \in (W_i)} f_{ijk} - \sum_{j \in V_i} f_{jik} = d_{ik}, \forall i \in N \tag{86}$$

E la non negatività dei flussi della componente $k \in C$ lungo l'arco i-j

$$c_{ij} \left(\sum_{l=1}^{k} f_{ijl} \right) + t_{jk} \geq t_{ik} \perp f_{ijk} \geq 0 \tag{87}$$

Dove

$$f_a = \sum_{l=1}^{k} f_{ak} \tag{88}$$

La espressione (86) può essere scritta anche tramite la matrice di incidenza arco-nodo A.

$$Af^k = d^k \tag{89}$$

I vincoli (86) e (87) assicurano che i tempi siano minimizzati e le condizioni di Wardrop soddisfate.
La definizione del modello con i vincoli (86) e (87) definisce un modello MCP (Mixed Complementary Model) e può essere risolto tramite algoritmi standard di programmazione non lineare (per esempio il solver PATH).
Per dimostrare la valenza sono stati definiti i problemi di ottimizzazioni e verificare che forniscono la stessa soluzione all'equilibrio. Le condizioni di equilibrio di primo ordine del problema non lineare sono espresse da con le funzioni di costi integrabili c_a, dove l'integrale di c_a è C_a dalle condizioni di equilibrio (86) e (87):

$$\begin{aligned} &\min_x \sum_{a \in A} C_a \sum_{l=1}^{k} f_{ijl} \\ &\text{st} \quad Af^k = d^k, f^k \geq 0 \forall k \in C \end{aligned} \tag{90}$$

Le condizioni di primo ordine possono sono date da:

$$
\begin{aligned}
& c_a(f_a) - v_a = 0 && \forall a \in A \\
& -A^T t_k + v \geq 0 \perp f_k \geq 0, && \forall k \in C \\
& A f_k = d_k && \forall k \in C \\
& f_a = \sum_{l=1}^{k} f_a^k
\end{aligned}
\tag{91}
$$

Le condizioni del problema (92) sono equivalenti al problema MCP previamente descritto in quanto sostituendo la prima e la quarta relazione ritroviamo (86) e (87).
E possibile anche a partire di queste relazioni ricavare il problema non lineare di secondo ordine in quanto se si assume che la prima relazione del sistema (91) sia invertibile, in moda da poter definire

$$
f_a = h_a(v_a) \tag{92}
$$

con h_a integrabile e pari a H_a, allora il problema di secondo ordine DNLP è il seguente:

$$
\begin{aligned}
& \max_{T,v} \sum_{l=1}^{k} (d^k)^T t^k - \sum_{a \in A} H_a(v_a) \\
& \text{st} \quad -A^T t^k + v \geq 0 \quad \forall k \in C
\end{aligned}
\tag{93}
$$

I modelli di equilibrio sono stati programmati in ambiente GAMS e risolti tramite i solver PATH per la risoluzione di tipo problema MCP. Per i due problemi non lineare sono stati risolti mediante i solver CONOPT, MINOS e PATHNLP per valutare la velocità di convergenza. In tutti i casi il modello complementare MCP e i modelli non lineare hanno fornito gli stessi risultati. Nel caso dei modelli on lineari, tutti i tre solver forniscono gap fra i due modelli uguale a zero, solo che il solver CONOPT ha un tempo di calcolo leggermente superiore.

3.2.2. Caso della domanda elastica

Quanto riportato nel capitolo 3.2 riguarda il caso della domanda costante d_i^k. Questa ipotesi può essere non sempre avverata in quanto è logico pensare che la modifica del sistema dell'offerta possa fare variare la

domanda, di conseguenza abbiamo una domanda variabile con i costi t. Assumendo, come proposta da Ferris (1998) una domanda variabile, con questa forma funzionale

$$d_i^k = \bar{d}_{ik} \frac{\exp(-\rho(t_i^k)}{exp(-\rho t_i^k) + exp(-\rho \bar{t}_i^k)} \tag{94}$$

dove ρ e $\bar{d}_i^k$ sono delle costante del problema e $\bar{t}_i^k$ rappresenta il tempo dell'alternativa di trasporto e assunta costante.
In questo caso l'equilibrio (91) non cambio se non che si aggiunge il vettore d^k che cambia con i valori di t^k. Cosi le condizioni di equilibrio che risultano sono

$$\begin{aligned}
& c_a(f_a) - v_a = 0 && \forall a \in A \\
& -A^T t_k + v \geq 0 \perp f_k \geq 0, \forall k \in C \\
& A f_k = d_k && \forall k \in C \\
& f_a = \sum_{l=1}^{k} f_a^k, \\
& d_i^k = \bar{d}_{ik} \frac{\exp(-\rho(t_i^k)}{exp(-\rho t_i^k) + exp(-\rho \bar{t}_i^k)} && \forall i \in N, \forall k \in C
\end{aligned} \tag{95}$$

E possibile ricavare come nel caso precedente anche le condizioni di equilibrio di primo ordine e secondo ordine in quanto la funzione dei costi è integrabile.

3.2.3. Solver Path

In questa sezione si presenta l'algoritmo di risoluzione utilizzato nel caso del problema MCP. Per ulteriori chiarimenti si rimanda la lettura dell'articolo di Dirkse (1995). C'e stata negli ultimi anni una intensa ricerca sugli algoritmi capaci di risolvere problemi complementari di tipo MCP o più in generale NCP. La gran parte di algoritmi attualmente esistenti sono basati su analisi 'smooth' e sistemi di equazioni

$$\min\{z_i, F_i(z_i)\} = 0 \quad i = 1, \cdots, n \tag{96}$$

e

$$z_i + F_i(z_i) - \sqrt{z_i^2 + F_i^2} = 0, \quad i = 1, \cdots, n \tag{97}$$

Il codice utilizzato, PATH solver, è attualmente uno dei più diffusi ed è orientato per applicazioni su larga scala utilizza la tecnologia delle matrice sparse per la sua implementazione. La logica del codice è l'applicazione del metodo di Newton per la risoluzione di problemi quadratici non lineari. L'idea basica è l'approssimazione del sistema di equazioni non lineari intorno a un punto x^k, risolvere il sistema approssimato per trovare il punto di Newton, x^N, aggiornare l'iterazione $x^{k+1} = x^N$, e ripetere la procedura fino che non si trova una soluzione del sistema non lineare.

$$L_k(x) = F(x_+^k) + \Delta F(x_+^k)(x_+ - x^k) + x - x_+ \quad \forall x^k \in R^n \tag{98}$$

Il punto x_N^k si trova generando un percorso p^k, parametrizzato da una variabile t che varia tra 0 e 1 tale che $p^k(0) = x^k$ e $p^k(1) = x_N^k$. I valori intermedi dei valori di p soddisfanno:

$$L_k(p^k(t)) = (1-t)F - +(x^k) \tag{99}$$

Questo metodo funziona estremamente bene nei punti vicini alla soluzione, però può fallire se il punto iniziale è troppo lontano. Per garantire il corretto avanzamento del metodo, il codice incorpora una ricerca lineare fra il punto x^k e x^Nper la ricerca della direzione discendente di una funzione 'merit' che restringe la lunghezza del passo e allarga il dominio di convergenza.

Il solver realizza questa operazione riformulando il problema complementare. Per identificare la direzione , si usa il mappa normale definito da:

$$F(\pi(x)) + x - \pi(x)) \tag{100}$$

Associato al problema MCP, dove $\pi(x)$ rappresenta la proiezione di x nel piano normale euclidiano. A ogni iterazione, un sistema complementare lineare (LCP) è risolto utilizzando il metodo di Lemske (1965).

3.3. Gestione della congestione: problemi dei pedaggi e risoluzione del problema BLP dei pedaggi ottimali

Le strategie di road pricing sono state utilizzate come spiegato in capitolo 1 come strumento per combattere il fenomeno della congestione e degli impatti negativi dei sistemi di trasporto. In questo caso si usa introdurre dei pedaggi per ridurre la congestione. Uno dei principali target è alleviare la congestione e si trova in letteratura un ampio numero di schemi e modelli per il trattamento del problema. Marcotte et al (2002) forniscono un indagine dei modelli BLP applicati al problema dei 'toll'. Labbe et al.(1998)e Brotocorne et al (2001), propongono anche diversi modelli e formulazione del problema.
Il problema dell'introduzione di un sistema di toll all'interno di una rete stradale riguarda la massimizzazione del profitto dovuto agli incassi posti in alcuni archi. Tenendo in conto che l'utente cercherà di minimizzare i suoi costi di spostamenti, un sistema ottimo di toll non deve essere troppo alto da indurre gli utenti a non usare gli archi a pedaggio ma ne anche troppo bassi da non generare profitti. Una volta posti i pedaggi, gli utenti cercheranno di reagire a questi costi selezionando o scegliendo i suoi percorsi tale che i loro costi, quelli percepiti dagli utenti, più i pedaggi siano minimizzati.
Sia A l'insieme degli archi della rete, $\bar{A}$ l'insieme di archi che sono a pagamento, e T_a la tariffa per l'attraversamento del nodo a. In questo caso se l'obiettivo del gestore della rete è massimizzare i suoi profitti allora il problema potrebbe risolversi cosi:

$$\begin{aligned} \max_{T,x} \sum_{a \in \bar{A}} \quad & T_a f_a \\ \text{s.t.} \quad & l_A \leq T_a \leq u_a, \end{aligned}$$

dove T_a e f_a sono il pedaggio e il flusso dell'arco a rispettivamente, l_a e u_a sono il milite inferiore e superiore del prezzo del pedaggio.
Come ampiamente spiegato in capitolo 2, il comportamento dell'utente risulta essere in equilibrio dove tutti gli utenti sono assegnati ai cammini minimi rispettando i livelli di congestione attuale.

$$
\begin{aligned}
&\min_f \sum_{a\in A}\int_0^{f_a} t_a(s)ds + \sum_{(a)\in\bar{A}} T_a f_a,\\
&\text{s.t.} \quad \sum_{r\in R_{pq}} h_{pqr} = d_{pq}, \forall (p,q)\in C,\\
&\qquad \sum_{(p,q)\in C}\sum_{r\in R_{pq}} \delta_{apqr} h_{pqr} = f_a, \forall a\in A,\\
&\qquad h_{pqr}\geq 0, \forall (p,q)\in C, \forall r\in R_{p,q}
\end{aligned}
\tag{101}
$$

La funzione obiettivo è la soma dei pedaggi T_a ($a \in A$) e altri costi (durata, lunghezza, etc), aggregata nella misura t_a per ogni arco. I vincoli del sistema sono la conservazione della domanda per una data coppia $(p,q) \in C$, la somma dei flussi h_{pqr} di tutti i percorsi r che collegano p a q pari alla domanda fra p a q e non negatività dei flussi.

$$
\begin{aligned}
&\max_{T,f} \sum_{a\in\bar{A}} \quad T_a f_a\\
&\quad \text{s.t.} \quad l_A \leq T_a \leq u_a, \forall a\in\bar{A}\\
&\qquad \min_f \sum_{a\in A}\int_0^{f_a} t_a(s)ds + \sum_{(a)\in\bar{A}} T_a f_a,\\
&\qquad \text{s.t.} \quad \sum_{r\in R_{pq}} h_{pqr} = d_{pq}, \forall (p,q)\in C,\\
&\qquad\qquad \sum_{(p,q)\in C}\sum_{r\in R_{pq}} \delta_{apqr} h_{pqr} = f_a, \forall a\in A,\\
&\qquad\qquad h_{pqr}\geq 0, \forall (p,q)\in C, \forall r\in R_{p,q}
\end{aligned}
\tag{102}
$$

Si osserva che un problema di ottimizzazione dei pedaggi, il livello superiore ha come funzione obiettivo quello di massimizzare i ricavi dati dall'introduzione del sistema e dove il sistema di livello inferiore riflette le decisioni del utente razionali in condizioni di equilibrio. La gerarchia risulta dal fatto che il problema relativo al comportamento degli utenti fa parte dei vincoli del gestore.

Il problema inferiore è il problema dell'assegnazione di traffico visto nel capitolo 3.1 e concerne la scelta dei percorsi fra gli origini e le destinazioni attraverso gli archi a disposizione sui quali è associata un funzione di costo. Il problema del problema inferiore ammette diverse

formulazione per cui potrebbe anche essere formulato come un problema VI o NCP.
La formulazione utilizzata nel problema (102) è relativa alla formulazione arco-percorso. E possibile pure scrivere il problema adottando una formulazione di tipo arco-nodo come nel problema (103).
La rete G può essere rappresentata da un insieme di nodi N, corrispondenti alle intersezioni e alle zone di origine e destinazione, e da un insieme di archi A, corrispondenti alle strade che collegano le intersezioni. In questo caso ridefiniamo la variabile del flusso d'arco f_{ij} come il flusso dell'arco unidirezionale dal nodo i al nodo j. Allo stesso modo si può definire il vettore dei flussi di ogni componente $k \in C$ come $f_k = (f_{i,j,k})$. Assumendo in questo caso che la domanda di trasporto fra gli origini e le destinazione è fissa.

$$
\begin{aligned}
&\max_{T,f} \sum_{a \in \bar{A}} \quad T_a f_a \\
&\quad \text{s.t.} \quad T_a \leq T_a^{MAX} \\
&\qquad\quad T_a \geq 0 \\
&\qquad\quad T_a = 0 \\
&\qquad\quad \min_f \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} t_a(s)ds + \sum_{(a) \in \bar{A}} T_a f_a, \\
&\qquad\quad \text{s.t.} \quad \sum_{j \in (W_i)} f_{ijk} - \sum_{j \in V_i} f_{jik} = d_{ik}, \forall i \in N, \\
&\qquad\qquad\quad \sum_{(p,q) \in C} \sum_{r \in R_{pq}} \delta_{apqr} h_{pqr} = f_a, \\
&\qquad\qquad\quad f_{jik} \geq 0, \forall (i,j) \in A
\end{aligned}
\tag{103}
$$

3.4. Environmental Equilibrium Assignement

In questo capitolo si propongono due modelli dove si dimostra la valenza dell'utilizzo dei programmi matematici per lo studio dei sistemi di trasporto sostenibile per la valutazione delle strategie e politiche di trasporto per la minimizzazione dell'emissione sulle reti di trasporto. L'approccio vede la modifica del modello appena descritto mediante

l'introduzione delle funzione di emissione nella funzione obiettivo del problema di livello superiore. In questo modo si riescono a gestire i due principali indicatori della sostenibilità: il livello di congestione e le emissioni totali. Per il calcolo delle emissioni sono utilizzate le relazioni presentate nel capitolo 3.1 che esprimono le relazioni fra le emissioni e la velocità. Sono stati considerati per il caso in studio gli inquinanti CO, CO2 e NOx.
Dall'altra parte ci sono molti studi che provano come ci sia una relazione diretta fra la velocità del veicolo e il flusso in un arco. Akcelik (2003-2004) presenta una estensiva rassegna di studi in questa area.

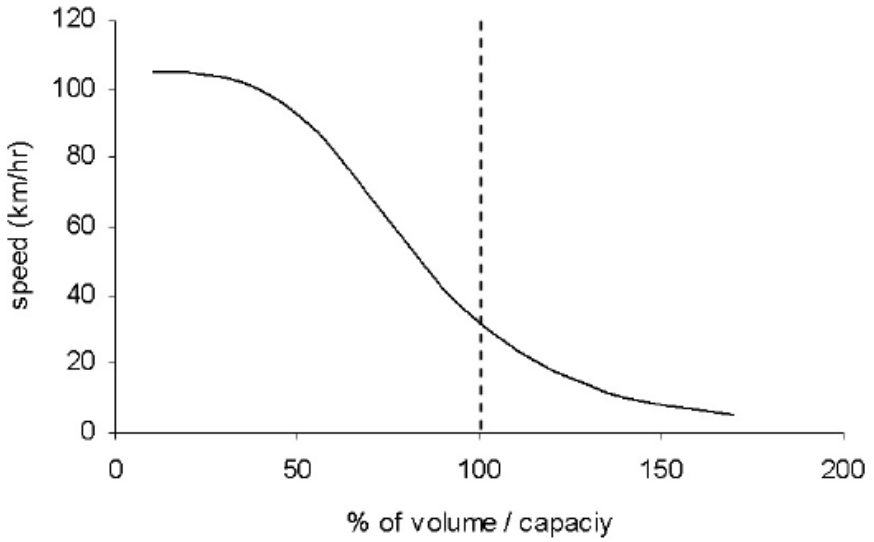

Figura 26:velocità media di un veicolo in funzione del rapporto f/C

Come si osserva nella figura la velocità media rimane quasi costante finché la capacità è vicina al 70%. Dopo una repentina diminuzione della velocità la capacità raggiunge i suoi livelli di progetto. Dopo la velocità continua a decrescere molto lentamente per flussi crescenti. Combinando le funzione di emissioni di velocità e flusso del traffico e emissioni e velocità del flusso permettono esprimere l'emissioni totali dell'arco in funzione del flusso sull'arco. L'andamento di queste relazioni mostrano come dopo che il flusso ha raggiunto la capacità, le emissioni totali crescono esponenzialmente. Questo è un risultato atteso in quanto a capacità raggiunta e a livelli di congestione elevati, i veicoli non possono

attraversare l'arco senza fermarsi e quindi avviene il fenomeno del 'stop and go', decrescendo la velocità media e aumentando le emissioni totali.

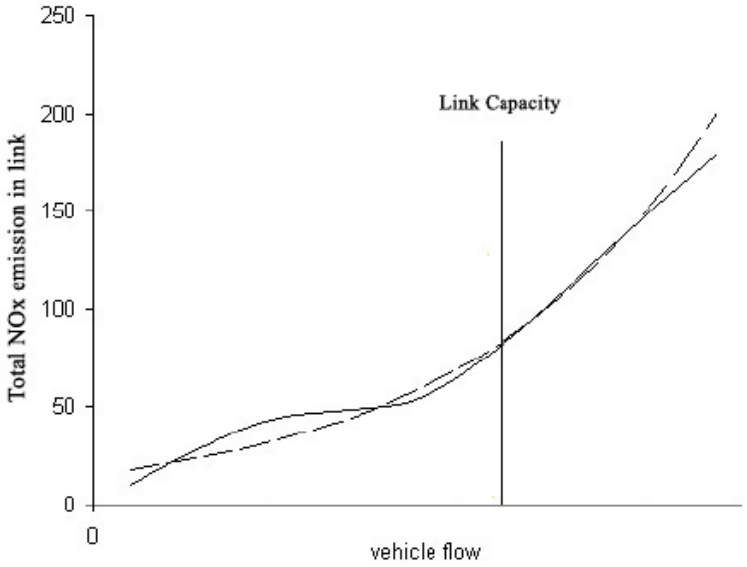

Figura 27: Emissioni totali in una arco in relazione al flusso di traffico

L'uso delle funzioni di tipo $E_a^p = f(f_A)$ assicura la struttura convessa della funzione il quale agevola la risoluzione del problema.
La formulazione del problema si ottiene definendo la funzione obiettivo del problema superiore del sistema (103) come il minimo della somma totale delle missioni sugli archi invece di massimizzare il profitto. Usando la notazione già nota dei problemi introdotti nei precedenti paragrafi il modello EEA può essere espresso dal sistema (104), dove P è l'insieme degli inquinanti. Il livello superiore rappresenta la funzione obiettivo del decisore che desidera minimizzare l'emissione totale sulla rete tenendo in conto la risposta degli utenti nella scelta dei loro percorsi e agendo su questa scelta tramite l'introduzione di un pedaggio su un insieme di archi $a \in \bar{A}$ che riescono a incidere sulle scelte degli utenti. Rispetto al classico problema dei pedaggi del 3.4 i ricavi saranno inferiori come sarà presentato nel capitolo 4 però saranno minimizzati gli impatti. Il livello inferiore è il problema dell'assegnazione del traffico che riflette le decisioni degli utenti sulla rete mediante la minimizzazione della funzione obiettivo dei costi totali di spostamento. I vicoli del sistema saranno la solita conservazione della domanda e dei flussi.

$$
\begin{aligned}
\max_{T,f} \sum_{a\in A}\sum_{p\in P} \quad & E_a^p(f_a) \\
\text{s.t.} \quad & T_a \le T_a^{MAX} \qquad \forall a \in \bar{A} \\
& T_a \ge 0 \qquad \forall a \in \bar{A} \\
& T_a = 0 \qquad \forall a \in A - \bar{A} \\
& \min_f \sum_{a\in A} \int_0^{f_a} t_a(s)ds + \sum_{(a)\in\bar{A}} T_a f_a, \\
\text{s.t.} \quad & \sum_{j\in(W_i)} f_{ijk} - \sum_{j\in V_i} f_{jik} = d_{ik}, \forall i \in N, \\
& \sum_{(p,q)\in C} \sum_{r\in R_{pq}} \delta_{apqr} h_{pqr} = f_a, \\
& f_{jik} \ge 0, \forall (i,j) \in A
\end{aligned}
\tag{104}
$$

3.5. Estensione del modello

Il modello appena presentato può essere modificato per tenere conto di altre politiche di trasporto orientate a ottenere reti di trasporto sostenibili. Fra le possibili politiche di trasporto che possono essere valutate per migliorare la compatibilità ambientale e anche per provare la valenza dell'approccio sono state la tariffazione dell'ingresso di un zona centrale della rete e l'allocazione ottimale di un quantitativo di capacità all'interno della rete.

3.5.1. Zone pricing

Nel caso di problemi di congestione in una particolare zona della rete, invece di applicare un pedaggio per un insieme di archi, può essere interessante valutare un schema di pedaggio. In altre parole si può prevedere, previa l'identificazione della zona in studio, di tariffare l'attraversamento di tutti gli archi in entrata o in uscita di una zona particolarmente congestionata. Un esempio di una possibile tariffazione di una zona è mostrata in figura e sarà descritta in dettaglio nel capitolo 4.
Per introdurre il 'zone pricing' nel modello EEA basta applicare i vincoli della formulazione (87) nei soli archi in ingresso alla zona.

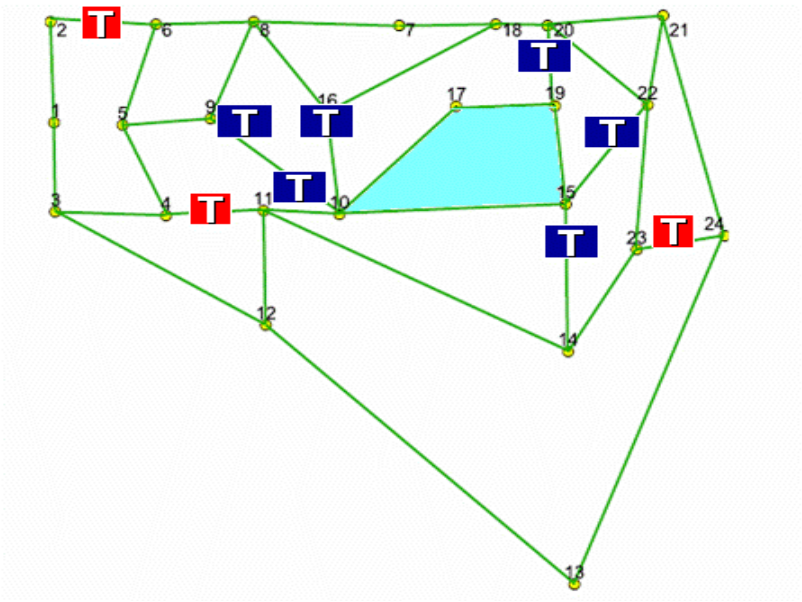

Figura 28: Un esempio possibile di introduzione di una politica di zone pricing

3.5.2. Miglioramento della capacità.

Una strategia che può essere adottata al posto o in concomitanza dell'introduzione di pedaggi è l'aumento di capacità di alcuni determinati archi che portano al progetto di allocazione di capacità sulla rete. Questo problema riguarda il problema trasportistico di introdurre nuovi archi o migliorare quelli esistenti in modo di raggiungere un obiettivo specifico. Nel nostro caso si è utilizzato la stessa formulazione del problema modificando adeguatamente la funzione obiettivo in modo di allocare ottimamente la capacità in modo di minimizzare le emissioni totali sulla rete. Il problema dell'estensione di capacità di archi esistenti può essere cosi risolta tramite la risoluzione del problema continuo. Diverso è il caso in cui si decidesse di introdurre nuovi link in quanto il problema discreto è di complicata risoluzione.
Ci sono alcuni costi associati ai miglioramenti della capacità degli archi che devono essere conteggiati. Definito il capitale di investimento e la funzione dei costi operativi $K(EC)$ che si assume abbia una forma di questi tipo:

$$K(EC) = \sum_{a \in A} k_a EC_a^2 \tag{105}$$

dove EC_a è il miglioramento della dell'arco a e k_a sono i costi associati al miglioramento della capacità a. Questa funzione convessa è incorporato nel modello come un vincolo di budget. Dall'altra parte gli aumenti di capacità affetteranno anche le funzioni di emissioni in funzione del flusso e i costi di attraversamento dell'arco. Cosi la forma della curva BPR sarà:

$$c_a(f_a, EC_a) = \alpha_a + \beta_a \left(\frac{f_a}{C_a + EC_a} \right)^4 \tag{106}$$

dove α_a è l costo a flusso libero nell'arco a, f_a è il flusso di traffico nell'arco, β_a è il parametro dell'arco a, e C_a è la capacità di progetto dell'arco. I parametri sono di solito determinati analizzando i dati tabellari del HCM. (30)
Introducendo questi elementi nel nostro modello si ottiene la seguente espressione funzionale:

$$\begin{aligned}
\max_{T,f} \sum_{a \in A} \sum_{p \in P} \quad & E_a^p(f_a, EC_a) \\
\text{s.t.} \quad & \sum_{a \in A} k_a EC_a^2 \leq B \\
& EC_a \leq C_a^{max}, \quad \forall a \in \bar{A} \\
& EC_a \geq 0, \qquad \forall a \in \bar{A} \\
& \min_f \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} t_a(s) ds \\
\text{s.t.} \quad & \sum_{j \in (W_i)} f_{ijk} - \sum_{j \in V_i} f_{jik} = d_{ik}, \forall i \in N, \\
& \sum_{(p,q) \in C} \sum_{r \in R_{pq}} \delta_{apqr} h_{pqr} = f_a, \\
& f_{jik} \geq 0, \forall (i,j) \in A
\end{aligned} \tag{107}$$

dove UC_a è il massimo miglioramento ammissibile dell'arco a, e B il budget economico allocato per gli interventi infrastrutturali.
Come si dimostrerà nel capitolo 4 il modello di allocazione ottimale può essere utilizzato per alleviare la congestione di una zona particolarmente affetta dal fenomeno di congestione o che si vuole proteggere dagli impatti dei sistemi di trasporto.

3.6. Risoluzione del problema bi-livello mediante l'applicazione di algoritmi MPEC

Un programma matematico con vincoli di equilibrio (MPEC) può essere formulato quando si cercano dio ottimizzare funzione obiettivo tale che siano soddisfatti dei vincoli di equilibrio. I vincoli di equilibrio sono generalmente espressi in forma di diseguaglianza variazionale o in forma complementare. Come si è visto nel capitolo 2.6, questi vincoli possono essere implicitamente definiti come problema di secondo livello all'interno di una struttura di ottimizzazione definendo cosi un problema di tipo bi-livello.
Un MPEC si può definire come un problema vincolato non lineare dove tutti i vincoli sono definite nei termini di una soluzione di un problema di secondo livello. La parte più delicata nella formulazione di un problema MPEC è la definizione del sistema di equilibrio. Come visto in precedenza questo può essere espresso tramite diverse formulazioni equivalenti. Per esempio come un problema di minimizzazione, di disuguaglianze variazionali o come un problema complementare. Per coerenza a quanto fatto durante la ricerca, si spiegherà brevemente i passaggi per la definizione e risoluzione di un MPEC con la definizione del sistema di equilibrio tramite un Mixed Complementary Problem o MCP (Rutherford, 2002) (Dirkse, 1994). Il problema MCP è definito da una funzione non lineare $F : B \longrightarrow \mathbb{R}^n$ dove per B si intende l'insieme $B := [l, u]$ a cui appartiene la soluzione $y \in R^n$, e l e u sono il limite inferiore e superiore definiti come $l \in (R \cup \{\infty\})^n$ e $u \in (R \cup \{\infty\})^n$. La variabile $y \in R^n$ risolve il sistema MCP (F, B) definiti in questi termini:

$$
\begin{aligned}
F_i(y) = 0 \quad &\text{and} \quad l_i \leq y_i \leq u_i \\
F_i(y) \geq 0 \quad &\text{and} \quad y_i = l_i \\
F_i(y) \leq 0 \quad &\text{and} \quad y_i = u_i
\end{aligned}
$$

Il problema del MCP tale e come è risolto può essere formulato udel modo seguente. Siano $x \in X \subseteq \mathbb{R}^n$ e $y \in Y \subseteq \mathbb{R}^m$ le due variabili del nostro problema e sia $\theta : \mathbb{R}^{m+n} \longrightarrow \mathbb{R}$ la funzione obiettivo che si intende ottimizzare secondo due tipi di vincoli. Il primo tipo di vincolo richiede la fattibilità delle variabili (x, y) e sono definiti dalle funzioni $h : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^k$, $g : \mathbb{R}^{m+n} \longrightarrow \mathbb{R}^p$ e dall'insieme X. I vincoli di equilibrio sono definita dall'insieme Y e dalla funzione $F : \mathbb{R}^{m+n} \longrightarrow \mathbb{R}^m$. Queste condizioni permettono di costruire la struttura del problema MPEC:

$$
\begin{aligned}
&\min \theta(x, y) \\
&\qquad \text{s.t} \qquad h(x) \in H \\
&\qquad\qquad\quad\; x \in X \\
&\qquad\qquad\quad\; g(x, y) \in G \\
&\qquad \text{s.t} \qquad y \quad \text{risolve MCP}(F(x, \cdot), Y)
\end{aligned}
\tag{108}
$$

La risoluzione del modello combina componenti di problemi non lineari (NLP) e complementari (MCP). Queste permette nella programmazione passare abbastanza agevolmente da un problema MPC a un MPEC.
Matematicamente, il vincolo di equilibrio è definito dalla associazione della variabile di stato y e delle equazioni. Questo si realizza molto agevolmente nel codice includendo le equazioni in funzione della variabile y nella lista di variabile del modello. In questo aspetto, il codice è compilato in modo analogo a quanto fatto nel caso di un MCP.
Fra le tecniche risolutive c'è la possibilità di interfacciarsi con Matlab per lo scambio di files tramite l'utilizzo della libre MPECIO (Dirkse, 1997). In questo caso l'interfacci progettata da Dirkse è capace di interpretare i file di ingresso e di uscita, calcolare funzioni e gradienti di un problema MPEC e scrivere la soluzione.
La seconda opzione per la risoluzione del problema è l'utilizzo del solver GAMS/NLPEC sviluppato da Michael Ferris (Ferris, 1998).
In questo caso il problema MPEC è risolto tramite la riformulazione del problema una sequenza di problemi di tipo NLP e parametrizzati da un scalare μ e risolti tramite noti solver di problemi NLP.

Informazioni più dettagliate sulla riformulazione del problema, l'utilizzo di variabili di slackness ausiliari e la possibilità di scegliere fra diversi tipi di riformulazioni sono dettagliati nel manuale del software GAMS.

4. Applicazioni e risultati dei modelli proposti

I modelli proposti in capitolo 3 in forma di problemi di ottimizzazioni e problemi matematici con vincoli di equilibrio (MPEC) saranno risolti e commentati lungo questo capitolo. La soluzione di questi problemi ha richiesto l'utilizzo di programmi dedicati e solver di uso commerciale. Ci sono delle procedure come la risoluzione del problema MCP che sono state programmate in Matlab con algoritmi noti per valutare la bontà della soluzione fornita dal software. Come anticipato nel capitolo 3.2 e 3.7 i solver utilizzati i sono stati GAMS/PATH per la risoluzione del problema di assegnazione in forma complementare, GAMS/MINOS e GAMS/PATHNLP per la soluzione del problema non lineare e finalmente GAMS/NLPEC per la risoluzione del problema matematico con vincoli di equilibrio. Il solver NLPEC risolve il problema MPEC tramite la riformulazione dei vincoli complementare in un problema non lineare (NLP) la cui sequenza di problemi è risolta tramite i solver NLP previamente menzionati. GAMS/NLPEC è un efficace strumento per la risoluzione di MPEC e fornisce, data la sua architettura molto flessibile, diversi strategie di formulazione.

4.1. Caratteristiche della rete di test

I modelli proposti sono stati applicati alla rete Sioux Falls dalla quale si era in possesso di tutti i dati di input necessari. La rete Sioux Falls è una rete molto utilizzata per i test di piccola-media dimensione ed è costituita da 24 nodi e 76 archi per un totale di 576 coppie OD con funzione di costo asimmetriche. In primo luogo è stato risolto il problema dell'assegnazione e testata la validità dei risultati forniti in quanto per il resto degli esperimenti questo problema ha rappresentato il problema de livello inferiore del nostro sistema.
A continuazione si presentano i risultati del problema di assegnazione risolto con la formulazione MCP e coincidente con il problema di ottimizzazione di primo (PNLP) e di secondo ordine DNLP).

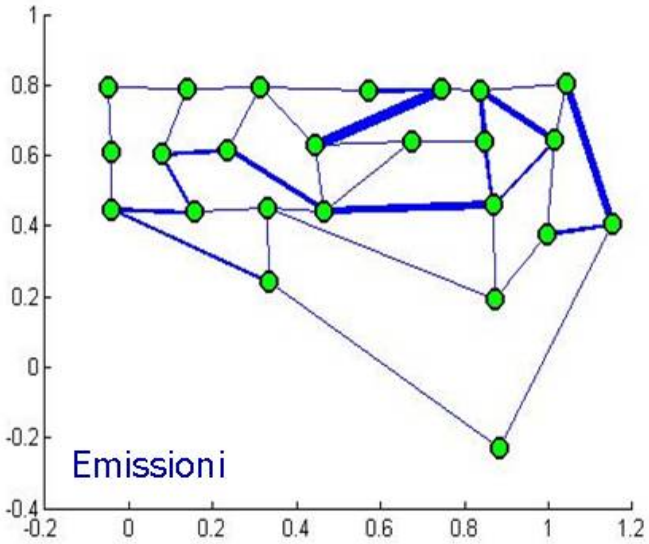

Figura 29: Esempio degli output del modello integrato in MATLAB/GAMS

4.2. Problema di massimo ricavo dei pedaggi

La risoluzione del problema dei massimo ricavo dei pedaggi è stata risolto tramite il solver PATH/NLPEC. In questo caso sono state calcolate le emissioni totali dalla rete, anche se per ora, in questo caso, non sono state considerate nel modello.

Sono stati considerati in questo caso tre scenario possibili:

1. Lo scenario T0 dove si è considerata la rete senza pedaggi
2. Lo scenario T1 dove sono stati considerati 3 pedaggi negli archi più congestionati
3. Lo scenario T2 dove si è previsto di limitare l'accesso nella zona centrale della rete.

In seguito si presentano i tre schemi:

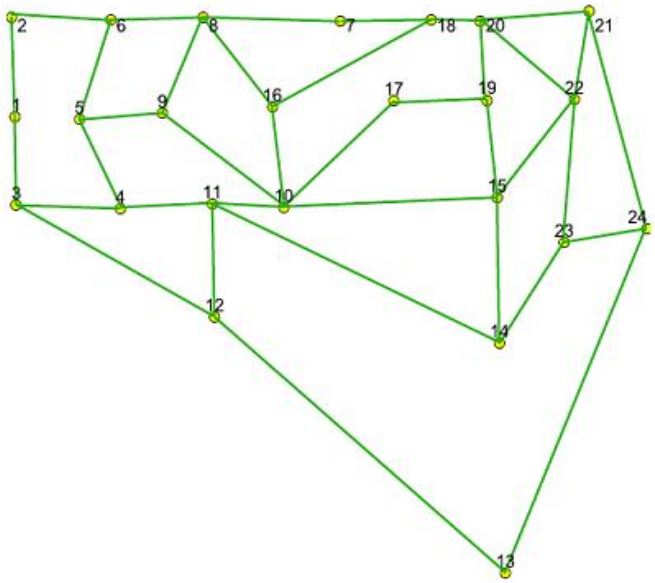

Figura 30: Scenario TO senza pedaggi

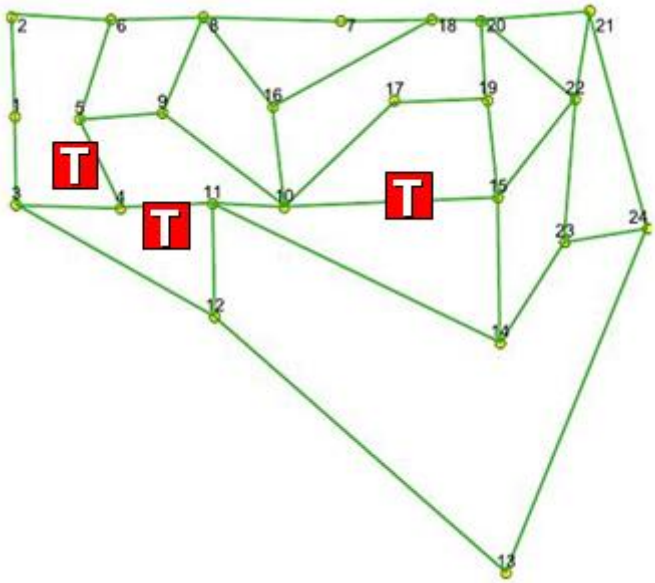

Figura 31: Scenario T1 con tre pedaggi

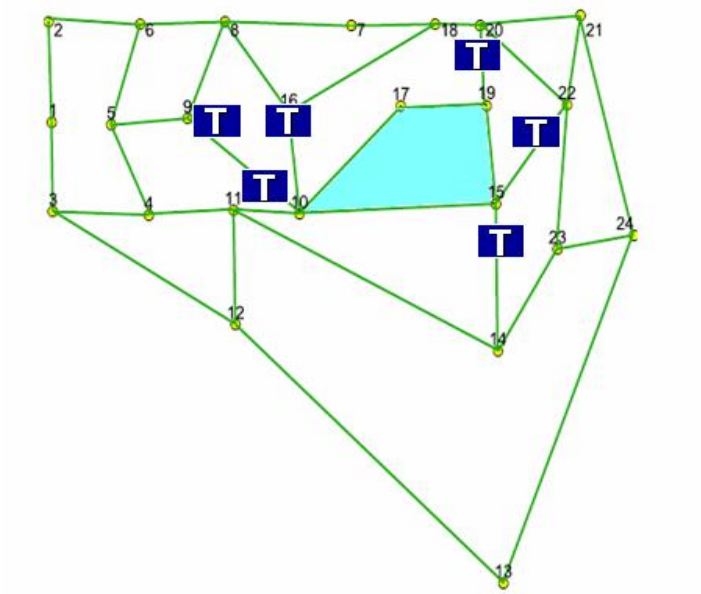

Figura 32: Scenario T2 con restrizione degli accessi alla zona centrale della rete

In figura 33 e 34 sono rappresentate le soluzioni di equilibrio dell'utente soluzione del problema MCP in termini dei flussi veicolari e delle emissioni nel caso dello scenario T0.

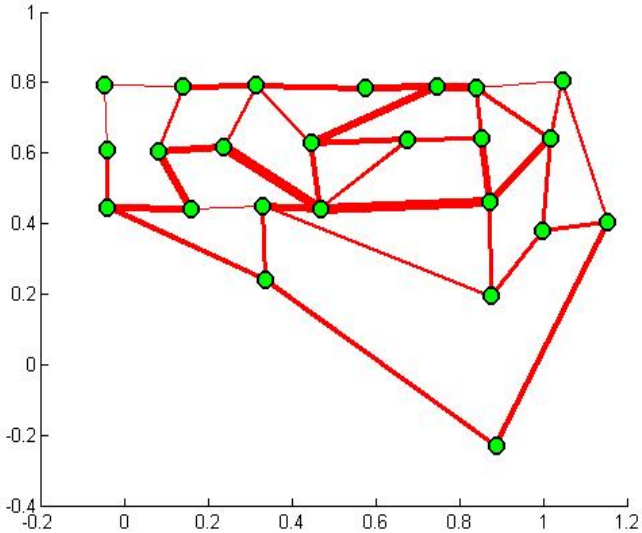

Figura 33: Flusso nello scenario T0

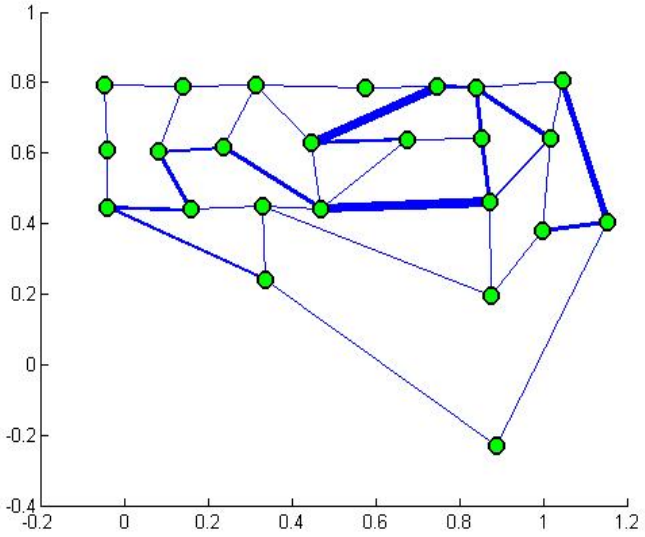

Figura 34: Emissione nello scenarioT0

Nel caso dello scenario T1 è stato introdotto un pedaggio nei tre archi della (4,5), (4-11) e (10-15) mostrati in figura 31. Il livello superiore del modello è rappresentato dalla funzione obiettivo che massimizza i ricavi. L'utente in questo caso realizza le scelte in funzione delle funzioni costi, e dei pedaggi se questi fanno parte del suo percorso. E chiaro che il modello presenta dei limiti in quanto se l'arco con pedaggio appartiene al suo cammino minimo l'utente lo sceglierà a prescindere se inquina o se causa congestione. Nel caso dell'applicazione del modello con 3 pedaggi, scenario T1, i risultati non sono troppo diversi dello scenario T0. Questo risultato era atteso in quanto il numero di pedaggi sembra ancora non sufficiente per alleviare la congestione. Risulta interessante da questi primi calcoli sullo scenario T0 che debbano essere aumentati il numero di pedaggi. Dall'altra parte si osserva che i limiti superiore ed inferiore dei pedaggi, decisi dal gestore della rete, e tipici della formulazione MCP incidono sulla distribuzione della domanda.

Dal punto di vista delle emissioni, queste peggiorano con l'introduzione del pedaggio dovuto al allungamento delle percorrenze che incidono sul quantitativo totale delle emissioni sulla rete. Questo risultato era del tutto atteso non essendoci ancora presente la funzione obiettivo riguardante le emissioni nel modello. I risultati globali dei due scenari sono riassunti in tabella 25.

	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
F.O.	10063	8953	7218
Ricavi	0		
Emissioni Totali	8066	8720	8796
Variazione (%)		-8%	-9%

Tabella 25: Risultati del problema di massimo ricavo

La risoluzione dello scenario T1 ha portato al calcolo ottimale dei pedaggi che massimizzano i ricavo sono risultati essere fra 0.73 e 0.79 come mostrato in tabella:

	Limite inferiore	Tariffa	Limite superiore
(4, 6)	0.38	0.73	0.99
(4, 11)	0.50	0.77	0.99
(10,15)	0.34	0.79	0.99

Tabella 26: Tariffe ottimali scenario T1

Nello scenario T2 invece sono stati tariffati tutti gli archi in accesso alla zona delimitata dentro gli archi (10,17), (19,15), (15,10) e (17,19). La funzione obiettivo, la somma del prodotto del costo per il flusso di tutti gli archi, migliora leggermente e le emissioni aumentano rispetto allo scenario T0.

	Limite inferiore	Tariffa	Limite superiore
(11, 10)	0.38	0.422	0.45
(14, 15)	0.34	0.366	0.38
(9, 10)	0.34	0.378	0.45
(16, 10)	0.50	0.53	0.38
(20, 19)	0.38	0.42	0.45
(22, 15)	0.5	0.53	0.38

Tabella 27: Tariffe ottimali scenario T2

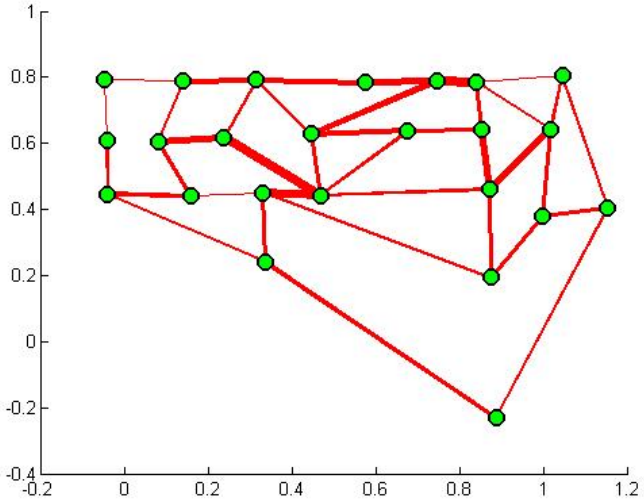

Figura 35: Flusso nello scenario T1

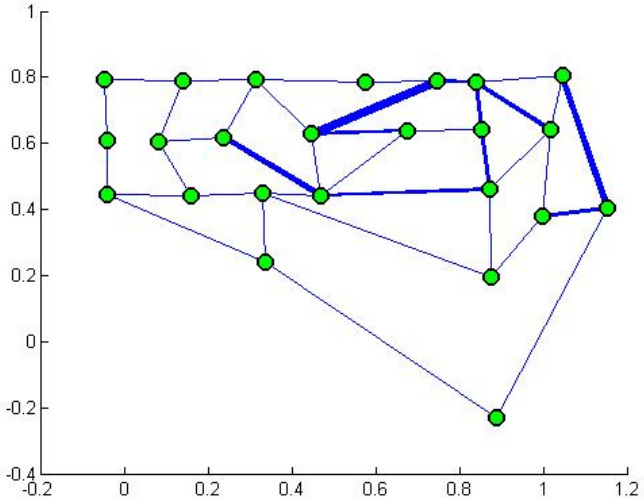

Figura 36: Emissione nello scenario T1

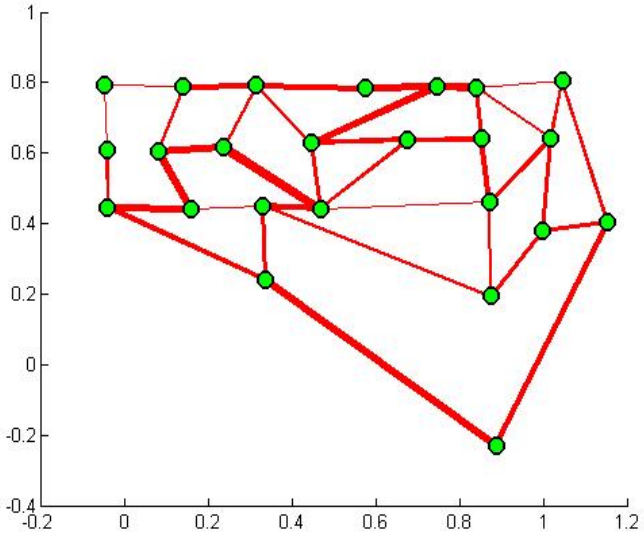

Figura 37: Flusso nello scenario T2

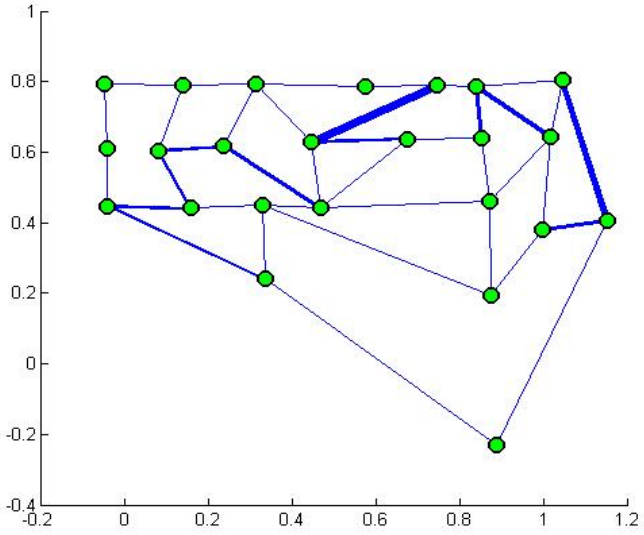

Figura 38: Emissione nello scenario T2

4.3. Applicazione del modello de assegnazione ambientale EEA (Environmental Equilibrium Assignement)

Dopo la risoluzione del problema di massimo ricavo, si è applicato il modello di minimizzazione delle emissioni totale sulla rete con gli stessi pedaggi dello scenario T1 e T2. Cosi abbiamo definito 2 nuovi scenari:

1. Lo scenario S1 dove sono stati considerati 3 pedaggi negli archi più congestionati
2. Lo scenario S2 dove si è previsto di limitare l'accesso nella zona centrale della rete

I flussi e l'emissioni totali degli S1 e S2 sono mostrate nelle figure e nelle tabelle seguenti.

	Scenario 0	Scenario T1	Scenario T2	Scenario S1	Scenario S2
F.O.	10063	8953	7218	9949	9998
Ricavi	0	18433	37468	13361	27415
Emissioni Totali	8066	8720	8796	7734	6800
Variazione (%)		-8	-9	-4.12	-15.6

Tabella 28: Risultati del problema di massimo ricavo e minima emissione

Si osserva dai risultati come l'introduzione della nuova funzione obiettivo di minima emissione con 3 pedaggi già comporta dei benefici a livelli di emissione totale. Nel caso dello scenario S1 le tariffe ottimale trovate sono in tabella 26 e nelle seguenti figure:

	Limite inferiore	Tariffa	Limite superiore
(4, 6)	0.38	0.544	0.99
(4, 11)	0.50	0.612	0.99
(10,15)	0.34	0.520	0.99

Tabella 29: Tariffe ottimali scenario S1

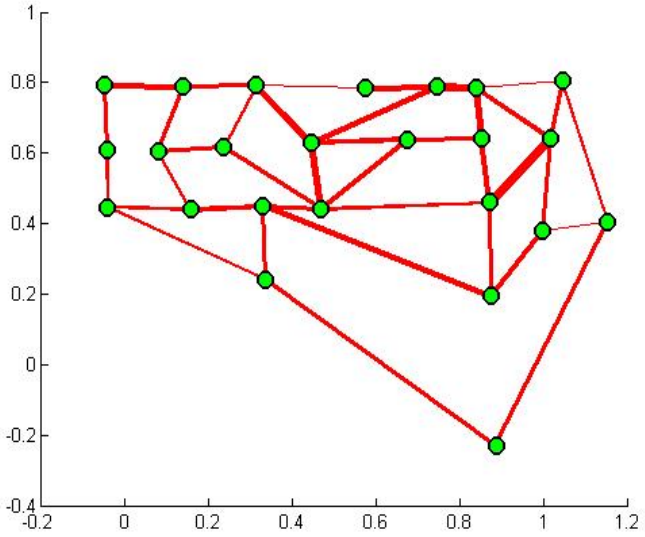

Figura 39: Flussi di traffico nello scenario S1

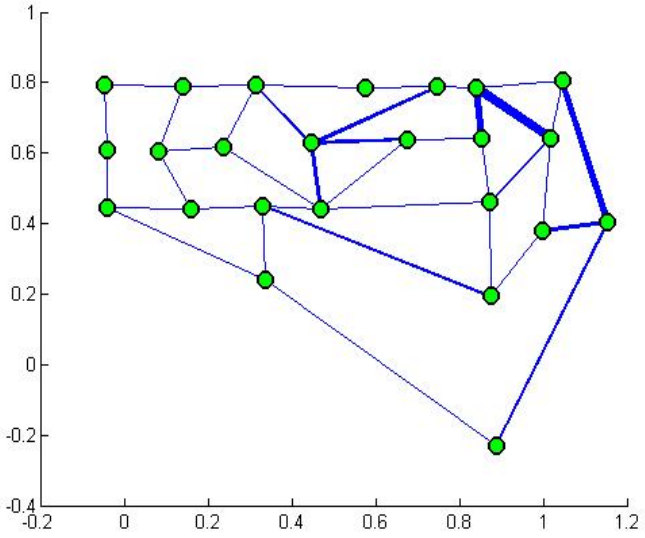

Figura 40: Emissioni nello scenario S1

Lo scenario S2 intende evitare la concentrazioni di emissioni in una zona che può essere l'obiettivo di una politica di trasporti invece di minimizzare il totale delle emissioni. In questo modo per alleviare la

congestione al tempo che si minimizzano le emissioni si è ipotizzato di introdurre un pedaggio in tutti gli archi in ingresso alla zona (10,17), (19,15), (15,10) e (17,19). Se osserva come la congestione e le emissioni si spostino dalle zone a pedaggio verso zone vicine secondo le funzioni di costo. Come si osserva in tabella 28 si passa da una emissione totale di 8066 nel caso di massimo ricavo a una emissione di 6800, con una riduzione del 15.69% ottenute dall'applicazione della politica.

	Limite inferiore	Tariffa	Limite superiore
(11, 10)	0.38	0.295	0.45
(14, 15)	0.34	0.207	0.38
(9, 10)	0.34	0.282	0.45
(16, 10)	0.50	0.301	0.38
(20, 19)	0.38	0.338	0.45
(22, 15)	0.5	0.298	0.38

Tabella 30: Tariffe ottimali nello scenario S2

I flussi di traffico e le emissioni sono mostrate in figura 41 e 42.

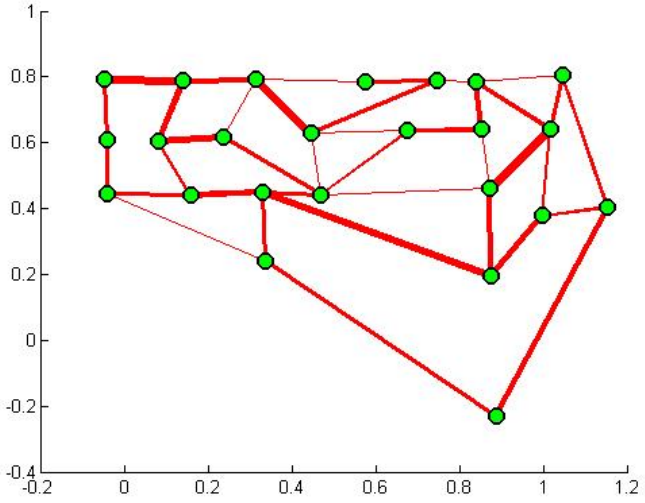

Figura 41: Flussi di traffico nello scenario S2

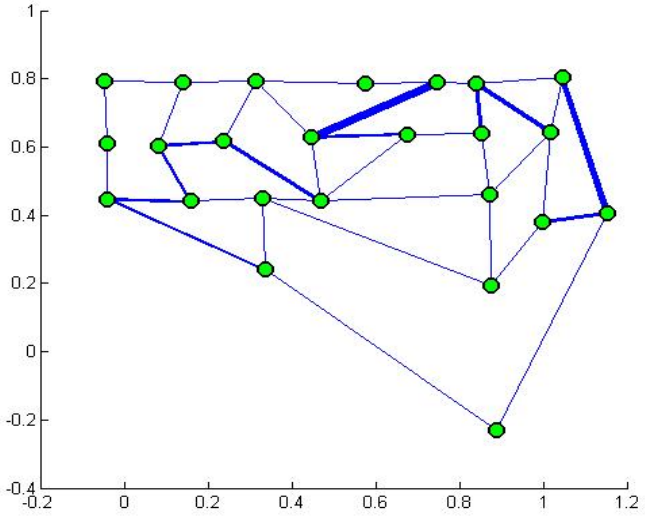

Figura 42: Emissioni nello scenario S2

4.4. Problema del miglioramento di capacità sulla rete

Come spiegato in capitolo 3.6 una altro problema che si può porre è quello dell'allocazione ottimale di miglioramenti in termini di capacità che rientra nel campo della progettazione di rete. La formulazione del problema continuo è rappresentata nel sistema (107). Fra gli archi della rete si è scelto un insieme composto da (6,8), (8,6), (10,16), (10,17), (13,24), (16,10), (17,10) e (24,13). Le emissioni totali sono ridotte di un 20% rispetto al problema di massimo ricavo presso come caso di riferimento, pari a 6450. I risultati dell'applicazione sono presentati nella seguente tabella prendendo una capacità massima pari a 10.000 unità.
Per il calcolo delle variabile del problema si è fatto uso di precedente studi (Guldman et al, 1996) e Viton (1983) che hanno stimato il costo di costruzione e manutenzione di infrastrutture stradali. Si arriva a determinare che la costruzione di una corsia in più fornisca una capacità extra di 100 veicoli/ora nel caso di una autostrada e di 600 veicoli/ora per una strada urbana. Essendo A l'insieme degli archi stradali, E l'insieme di Arco autostradali, il costo totale k_a è pari a:

$$k_a = \frac{1}{365.24}\left(\sum_{i\in E}\frac{175.468}{1000}L_i z_i + \sum_{i\in E}\frac{140.374}{600}L_i z_i\right)$$

dove k_a è il costo in unità di tempo, L_i è la lunghezza dell'arco e z_i è il flusso in veicoli/ora

	Capacità	Miglioramento
(6,8)	4.800	0
(8,6)	4.800	1.560
(10,16)	4.800	2.260
(10,17)	5.000	1.92
(13,24)	5.000	2.158
(16,10)	4.800	1.251
(17,10)	5.000	1.548
(24,13)	5.000	1221

Tabella 31: Miglioramento di capacità

4.5. Risultati numerici e analisi

I risultati numerici dei modelli previamente descritti sono riportati in tabella. I flussi e le emissioni totali sono riportate per ogni arco in allegato. Si osserva come le variazioni di flusso fra i diversi scenari siano molto modeste e solo leggere variazioni si ottengo con l'introduzione dei pedaggi. Si osserva come i miglioramenti di emissioni che si ottengono negli scenari proposti siano dovuti alla diminuzione di lunghezza del percorso scelto, in quanto gran parte del guadagno si ottiene perché molti utenti usano 2 archi invece dei 3 utilizzati nel caso di riferimento.

	Scenario 0	Scenario T1	Scenario T2	Scenario S1	Scenario S2	Scenario EC
F.O.	10063	8953	7218	9949	9998	8462
Ricavi	0	18433	37468	13361	27415	-
Emissioni Totali	8066	8720	8796	7734	6800	6450
Variazione (%)		-8	-9	-4.12	-15.6	20%

Tabella 32: Sintesi dei risultati degli scenari

La principale differenza fra i diversi modelli la troviamo nelle emissioni totali. Come descritto, il modello di minimizzazione da dei risultati leggermente migliori che la sola introduzione dei pedaggi con il criterio di massimizzare il ritorno in tutti gli scenari. A dimostrazione che in realtà il pedaggio è variabile troviamo come queste minore emissioni si tradugono in un aumento degli introiti. I migliori risultati si trovano nel caso del miglioramento di capacità. Questo era un risultato atteso in quanto l'introduzione di una capacità extra provoca una diminuzione della congestione e di conseguenza anche delle emissioni.

5. Conclusioni e futuri sviluppi

In questa ricerca è stato proposto un contributo metodologico per la valutazione strategica delle possibili politiche di gestione del traffico veicolare che possono essere usate per contenere la congestione e le emissioni dei sistemi di trasporto in ambiti urbani. Il contributo ha condotto alla formulazione di un problema che accoppia i due sistemi, sistemi di trasporto ed ambiente, e propone un metodo di risoluzione di larga applicazione. L'approccio proposto è un modello strutturato in due livelli che sfrutta tecniche di programmazione matematiche che stanno avendo in questi momenti un considerevole sviluppo.
Una ricerca sugli indicatori e le strategie a disposizione dei pianificatori è stata realizzata con l'obiettivo di ottenere delle indicazioni di come misurare la sostenibilità e gli impatti ambientali dei sistemi di trasporto e i possibili interventi capaci di ridurre la congestione e i suoi effetti sulla qualità dell'aria. In particolare si è approfondito gli interventi di congestion pricing e le sue applicazioni nella città di Londra.
La ricerca sui modelli di traffico si è basata sulla vasta letteratura esistente sulla formulazione e la risoluzione del problema di assegnazione all'equilibrio del traffico. Diverse formulazione equivalenti sono state studiate e valutate in modo di verificare l'unicità e l'esistenza della soluzione di equilibrio e scegliere quella più appropriata per la formulazione del problema bi-livello e la sua risoluzione. Il problema dell'assegnazione nelle condizioni di equilibrio dell'utente è stato risolto nel caso della domanda fissa e di domanda elastica su una rete di piccole medie dimensioni. I risultati e gli algoritmi esaminati sono stati poi di grande utilità per la formulazione e la risoluzione dei modelli bi-livelli proposti.
Nel problema bi-livelli sono state introdotte le relazioni analitiche esatte fra le emissioni e il flusso veicolare in modo di tenere conto anche dell'effetto della congestione sulla qualità dell'aria.
Fra le diverse politiche che sono state esaminate si è fatto particolarmente attenzione alla strategie del congestion pricing. La strategia consiste in introdurre dei pedaggi in un insieme di archi della rete. Il modello già molto studiato in letteratura si presta molto bene ad essere formulato tramite un modello bi-livello. La tariffa applicata ai diversi pedaggi è

variabile e il calcolo ottimale di questi pedaggi dipenderà dalla funzione obiettivo applicata nel problema di livello superiore. Nel nostro caso è stato risolto primo il caso in cui si desidera massimizzare il ricavo dei pedaggi. Poi si è risolto per un piccolo numero di archi ed è risultato poco efficiente per la risoluzione del problema della congestione e con nulli effetti sulle emissioni. Diverse prove hanno evidenziato che per la rete considerata ci vogliono almeno otto archi per avere effetti tangibili sulla congestione. Per ultimo si è utilizzato questo modello per lo studio di un'altra strategia quale quella di restringere l'accesso ad una zona centrale della rete o particolarmente congestionata. In questo caso si è osservato come la congestione si sposta dalla zona tariffata a gli archi vicini. Nonostante questo effetto di rete si ottengono dei valori degli indicatori leggermente migliori.

A questo punto si è proposto un modello che nel livello superiore presenta una funzione obiettivo che minimizza le emissioni totali e nel livello inferiore risolve il problema di equilibrio dell'utente di modo che l'insieme dei flussi di arco, soluzione del problema di minimizzazione dei costi totale degli spostamenti, soddisfino le condizioni di equilibrio dell'utente. In questo caso il modo di fare sentire il peso delle emissioni sugli utenti è l'introduzioni di uno schema di pedaggi. Il modello proposto si è rilevato essere un corretto approccio per la determinazione ottimale dei pedaggi di una rete sostenibile. Analogamente a quanto svolto per il problema di riferimento, è stato studiato uno schema di tariffe per la restrizione degli accessi ad una zona centrale. Il risultato ha portato a una variazione delle tariffe dei pedaggi e una diminuzione delle emissioni totali rispetto al problema del massimo ricavo dei pedaggi.

Un ultimo modello è stato proposto per sostenere la validità dell'approccio. Il problema studiato è l'allocazione ottimale ambientalmente compatibile di quantitativo extra di capacità su un insieme di archi della rete. I risultati ottenuti sono coerenti e come atteso danno migliori risultati dal punto di vista della congestione e dell'inquinamento. In questo caso altri sviluppi sono necessari in quanto non si è tenuto conto della possibile domanda indotta creata dal miglioramento della mobilità dopo l'incremento di offerta. Ulteriori sviluppi saranno portati a termini su questo ultimo modello utilizzando la risoluzione del problema di livello inferiore con domanda elastica..

Quest'ultimo obiettivo era dimostrare la generalizzazione del problema come approccio. Infatti la flessibilità dei modelli proposti fa pensare che

possano essere applicati in altre aree di ricerca e applicati ad altri problemi nell'ambito dei trasporti non relazionati con questa ricerca.
Questi primi risultati incoraggiano a continuare a lavorare sui modelli proposti migliorando ogni aspetto modellistico. La funzione obiettivo di livello superiore sembra essere troppo semplice rispetto al problema del calcolo delle emissioni. Si sta approfondendo su metodologie più evolute che riescono a tenere conto anche dei cicli cinematici nel calcolo delle emissioni. E dimostrato come le accelerazioni e le fasi di stop and go influiscano nel totale delle emissioni per veicolo. E stato dimostrato che il calcolo tramite la velocità media possa commettere errori fino al 80%.
Un secondo elemento sul quale si pensa di lavorare è nella risoluzione del problema di assegnazione. Si pensa di adottare nuovi schemi come la risoluzione dell'insieme dei percorsi, enumerando tutti i percorsi o calcolarli soltanto quando serve. L'ideale sarebbe accoppiare un modello di emissione con un modello del traffico di tipo dinamico, perché la natura del fenomeno lo richiede.
Per future ricerche si è pensato di estendere i modelli ad altri modi di trasporto. In questo caso è necessario un lavoro non indifferente per includere nel modello le funzioni di emissioni di tutti i modi di trasporto considerati e tutte le categorie di veicoli. Oltre al solo indicatore ambientale delle emissione si può pensare anche a includere altri indicatori propri della mobilità sostenibile. Per ultimo bisogna applicare i modelli considerando la domanda elastica per tenere conto della dinamicità del fenomeno.

6. Bibliografia

[1] Aashiani H. and Magnanti T. Equilibria in a congested transportation network, SIAM journal on Algebraic and Dicrete Methods 2, pp. 213-226. 1981.

[2] Akcelik, R, Flow and bunching relationships for uninterrupted flows, 25th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2003), 2003.

[3] Akcelik, R, Speed-flow models for uninterrupted traffic facilities, Technical report, http://www.aatrafic.com. 2004.

[4] Aldershot: Ashgate. Emmerink. R.H.M., P. Nijkamp, P. Rietveld and KW. Axhausen (1994) "The Economics of motorist information systems revisited", Transport Reviews, 14(4):363-388.

[5] Arnott, R. and A. Yan (2000) "The two-mode problem: Second-best pricing and capacity", Boston College: Working paper.

[6] Arnott, R. and M. Kraus (1998) "When are anonymous congestion charges consistent with marginal cost pricing?" Journal of Public Economics, 67:45-64.

[7] Arnott, R., A. de Palma and R. Lindsey (1993) "A structural model of peak-period congestion: A traffic bottleneck with elastic demand", American Economic Review, 83(1):161-179.

[8] Arnott, R., A. de Palma and R. Lindsey (1998) "Recent developments in the bottleneck model". in: K.l. Button and E.T. Verhoef, eds., Road pricing, traffic congestion and the environment: Issues of efficiency and Social feasibility. Cheltenham: Edward Elgar.

[9] Arnott, R., K. Arrow, A.B. Atkinson and l.H. Dreze, eds. (1994) Public economics: Selected papers by William Vickrey. Cambridge: Cambridge University Press. Arnott, R., A. de Palma and R.

[10] Beckman M., Mcguire C.B, and Winsten C.B, Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven, CT, 1956.

[11] Beckmann, M., CB. McGuire and CB. Winsten (1956) Studies in the economics of transportation. New Haven: Yale University Press.

[12] Beiruti, A.R. and Al~Omishy, H.K. (1985) Traffic Atmospheric Diffusion Model, Atmospheric Environment 19, 1519-1524

[13] Ben-Akiva, M., A de Palma and 1. Kaysi (1991) "Dynamic network models and driver information systems", Transportation

Research A, 25(5):251-266. Bohm, P. (1987) "Second best", in J. Eatwell,

[14] Benson, P.E. (J 982) Modifications to the Gaussian Vertical Dispersion Parameter, z' Near Roadways. Atmospheric Environmenl16, 1399-1405.

[15] Black, J.A., Paez, A., and Suthanaya, P.A., Sustainable urban transportation performance indicators and some analytical approaches, Journal of Urban Planningand Development, 2002.

[16] Bovenberg, AL. and L.H. Goulder (1996) "Optimal environmental taxation in the presence of other taxes: A general equilibrium analysis", American Economic Review: Papers and Proceedings, 86:985-1000.

[17] Boyce, D.E. (1980) A Framework for Constructing Network Equilibrium Models of Urban Location, Transportation Science 14, 77-96.

[18] Braess, D. (1968) "Uber ein Paradoxen des Verkehrsplanung", Unternehmenforschung, 12:258-268.

[19] Braid, RM. (1996) "Peak-load pricing of a transportation route with an unpriced substitute", Journal of Urban Economics, 40:179-197.

[20] Brooke, A., Kendrick, D. and Meeraus, A. (1992) GAMS: A User's Guide (Release 2.25), The Scientific Press.

[21] Brooke. A., Kendrick, D. and Meeraus, A. (19&8) GAMS: A User's Guide, The ScientifIc Press.

[22] Brotocorne, L., Labbe, M., and Marcotte, P., A bilevel model for toll optimization on a multicommodity transportation network, Transportation Science, 35, 2001

[23] Button and E.T Verhoef, eds., Road pricing, traffic congestion and the environment: Issues or efficiency and social feasibility. Cheltenham: Edward Elgar.

[24] Calder, K.L. (1973) On Estimating Air Pollution Concentrations from a Highway in an Oblique Wind, Atmospheric Environment 7, 863-868.

[25] Carey, M. and A. Srinivasan (1993) "Externalities, average and marginal costs, and tolls on congested networks with time-varying flows", Operations Research, 41(1):217-23l.

[26] Catoni, S. and S. Pallottino (1991) "Traffic equilibrium paradoxes", Transportation Science, 25:240-244. Chander,

[27] Chan, Y. (1976) A Method to Simplify Network Representation in Transportation Planning Transportation Research 10,179-191.
[28] Chariton Kouridis, Leonidas Ntziachristos and Zissis Samaras, Samaras COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport, Report EEA, ETC/AEM, 2000
[29] Charnes A. and Cooper W., External priciples for simulating traffic flow in a network, Proceedings of the National Academy od Sciences of the United States of America, 44 (1958), pp 201-204.
[30] Charnes A. and Cooper W., Non linear network flows and convex programming over incidence matrices, Naval research logistics Quarterly, 5, (1958), pp 231-240.
[31] Cheltenham: Edward Elgar. Henderson, J. V (1992) "Peak shifting and cost-benefit miscalculations", Regional Science and Urban Economics, 22:103-121.
[32] Chen, M. and Alfa, A.S. (1991) A Network Design Algorithm Using a Stochastic Incremental Traffic Assignment Approach, Transportation Science 25, 215-224.
[33] Chock., D.P. (J 978) A Simple Line-Source Model for Dispersion near Roadways, Atmospheric Environment 12, 287-297.
[34] Colson, B., Marcotte, P., and Savard, G., Bilevel programming: A survey, 40R A Quarterly Journal of Operations Research, 3, 87-107, 2005.
[35] Coulson, N.B. and Engle, R.F. (1987) Transportation Costs and The Rent Gradient, Journal a/Urban Economics 21, 287-297. 19
[36] Dabberdt, W.F., Ludwig, F.L. and Johnson, W.B. (1973) Validation and Applications of an Urban Diffusion Model for Vehicular Pollutants, Atmospheric Environment 7, 603-618.
[37] Dafermos S, The general multimodal network equilibrium problem with elastic demand, Networks, 12 (1982), PP 57-72
[38] Dafermos S. C. An extended traffic assignment model with applications to two-way traffic, Transportation Science, 5 (1971), pp 366-389.
[39] Dafermos S.C and Sparrow F.T, The traffic Assignment problem for a general network, Journal of Research Of the National Bureau of Standards, 73B (1969), pp 91-118.
[40] Dafermos, S. (1973) "Toll patterns for multiclass-user transportation networks", Transportation Science, 7:211-223.
[41] Daganzo, CF. (1995) "A Pareto optimum congestion reduction scheme", Transportation Research B, 29(2):139-154.

[42] Daganzo, CF. and Y. Sheffi (1977) "On stochastic models of traffic assignment", Transportation Science, 11:253-274.

[43] Daganzo. CF. and R.C Garcia (2000) "A Pareto improving strategy for the time-dependent morning commute problem", Transportation Science, 34(3):303-31l.

[44] Dantzig, G.B., Maier, S.F., Harvey, R.P., Lansdowne, Z.F. and Robinson, D.W. (1979) Formulating and Solving the Network Design Problem by Decomposition, Transportation Research B 13, 5-17.

[45] Davidson, K.B. (l966) A Flow Travel Relationship For Use in Transportation Planning. Proceedings of the Australian Road Research Board 3, 97-106.

[46] De Borger, B. and S. Proost, eds. (2001) Reforming transport pricing in the European Union. Cheltenham: Edward Elgar.

[47] De Palma, A and R Lindsey (2000) "Private toll roads: Competition under various ownership regimes". Annals of Regional Science, 34(1):13-35. De Vany, A (1976) "Uncertainty, waiting time, and capacity utilization: A stochastic theory of product quality", Journal of Political Economy, 84(3):523-54l.

[48] Deakin, E., Sustainable development and transportation: Strategies. for economic prosperity environmental quality and equity, http://repositories.cdlib.org/iurd/wps/WP-2001-03/, 2001.

[49] DeCorla-Souza, P. (2000) "Making pricing of currently free highway lanes acceptable to the public", Transportation Quarterly, 54(3):1-20. de Palma, A and R Lindsey (1998) "Information and usage of congestible facilities under different pricing regimes", Canadian Journal of Economics, 31(3):666-692.

[50] Deevajaran S. A note on network equilibrium and non cooperative games, Transportation Research, 15B (1981), pp 421-426.

[51] Dirkse S , Robust Solution of Mixed Complementary Problems, PhD thesis, Computer Sciences Department, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, 1994.

[52] Dirkse, S. P. and M. C. Ferris., Thallic modeling and variational inequalities using GAMS. in Toint, P. H. L., Labbe, M., Tanczos, K. and G. Laporte, editor, Operations

[53] Edelson, N.E. (1971) "Congestion tolls under monopoly", American Economic Review. 61(5): 872-882.

[54] El Sanhouri, 1. and D. Bernstein (1994) "Integrating driver information and congestion pricing systems", Transportation Research Record, 1450:44-50.

[55] Elgar. Small, K.A and L.A. Gomez-Ibanez (1999) "Urban transportation", in: P. Cheshire and B.S.
[56] EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 2007
[57] Emmerink, R.H.M. (1998) Information and pricing in road transportation. Berlin: Springer.
[58] Emmerink, R.H.M. and P. Nijkamp eds. (1999) Behal'iouraland networkimpacts ofdril'erinformation systems.
[59] European Commission, TREMOVE, Description of model and baseline version 2.41, http://www.tremove.org/download/TREMOVE 2.41 draft v03mrt2006.pdf, 2006.
[60] Evans, L. and Herman, R. (1978) Automobile Fuel Economy on Fixed Urban Driving Schedules, Transportation Science 12, 137-152.
[61] Fare. R., Grosskopf, S. and Yoon, B.J. (l982) A Theoretical and Empirical Analysis of the Highway Speed-Volume Relationship, Journal o/Urban Economics 12, 115-121.
[62] Feng, L. (l992) Regional Diffusion Model for Estimating Long-Term Average Concentrations of Atmospheric Pollutants, Atmospheric Environment 26, 2733-2735.
[63] Ferris M and Pang J, Engineering and economic applications of complementary problems. Discussion papers in Economics 95-4, Department of Economics, University of Colorado, 1995
[64] Fisk C.S. and Boyce D.E., alternative variational inequality formulations of the network equilibrium-travel choice problem, Transportation Science, 17 (1983), pp. 454-463
[65] Florian M., Asymmetrical variable demand multi-mode traffic equilibrium problems: existence and uniqueness of solutions and a solution algorithm, Pubblication 347, Département d'Informatique e de Recherche Operationelle, Université de Montreal, Montreal, 1979
[66] Florian M., Mathematical programming application in National, Regional and Urban Planning. Mathematical programming 57-81. 1989
[67] Frick, KT., S. Heminger and H. Dittmar (1996) "Bay Bridge congestion-pricing project: Lessons learned to date", Transportation Research Record, 1558:29-38.
[68] Friesz T., Tobin R. A non linear complementary formulation and solution procedure for the general derived demand network equilibrium problem, Journal of regional science, vol. 23, n. 3, 1983

[69] Friesz, T.L. (1985) Transportation Network Equilibrium, Design and Aggregation: Key Development and Research Opportunities, Transportation Research A 19,413-427.

[70] Fwa, T.F. and Ang, B.W. (1992) Estimating Automobile Fuel Consumption in Urban Traffic, Transportation Research Record 1366, 3•10.

[71] GAMS, MPEC Library, http://www.gamsworld.org/mpec/mpeclib/tollmpec.htm. 2002.

[72] Gartner, N.H. (1980) Optimal Traffic Assignment with Elastic Demands: A Review Part I. Analysis Framework, Transportation Science 14, 174-191.

[73] Gartner, N.H., Gershwin, S.B., Little, J.D.C. and Ross, P. (1980) Pilot Study of ComputerBased Urban Traffic Management, Transportation Research B 14, 203-217.

[74] Gendreau, M., Marcotte, P. and Savard, G., A hybrid tabu-ascent algorithm for the linear bilevel programming problem, Journal of Global Optimization, 8, 217-232, 1996.

[75] Glazer, A and E. Niskanen (1992) "Parking fees and congestion", Regional Science and Urban Economics, 22:123-132.

[76] Goffin, Haurie, & Vial 1992. J.-L. Goffin, A. Haurie and J.-P. Vial, Decomposition and non-differentiable optimization with the projective algorithm. Management Science 38 (1992), pp. 284-302.

[77] Gomez-Ibanez, J.A and KA Small (1994) "Road pricing for congestion management: A survey of international practice", in: National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of highway practice 210, TRB. Washington, DC: National Academy Press.

[78] Gomez-Ibanez, JA. and J.R. Meyer (1993) Going private: The international experience with transport privatization. Washington, DC: The Brookings Institution.

[79] Goodwin, PH. (1989) "The rule of three: A possible solution to the political problem of competing objectives for road pricing", Traffic Engineering and Control, 30(10):495-497.

[80] Guensler R., and Sperling D., Congestion pricing and motor vehicle emissions: An initial review, Peak-period fees to relieve traffic congestion, TRB Special Report 242, 2, 356-379, 1994.

[81] Hall, w.R., ed. (1999) Handbook ofTransportation Science. Norwell, MA: Kluwer Academic.

[82] Hansen, P., Jaumard, B., and Savard, G., New branch-and-bound rules for linear bilevel programming, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 13(5), 1194-1217, 1992.

[83] Harker P., Lectures on Computation of Equilibria with Equation-Based Methods. Core Lectures series, universitè Catholique de Louvain

[84] Harker P., Pang J. Finite-dimensional variatonal inequality and non linear complementary problems: a survey of theory, algorithms and applications. Mathematical programming 48, pp. 161-220, 1990

[85] Harker, P. T., and Pang, J., On the existence of optimal solution to mathematical program with equilibrium constraints, Operations Research Letters, 7, 61-64, 1988.

[86] Hau, TD. (1998) "Congestion pricing and road investment", in: KJ. Button and E.T. Verhoef, eds., Road pricing, traffic congestion and the environment: Issues or efficiency and social feasibility.

[87] Haurie A. Carlson D.A., Large-Scale convex optimization methods for air quality policy assessement. Management Science 40, Issu 3, Marzh 2004, pages 385-395

[88] Haurie A., kubler J.,Clappier A. A metamodeling approach for integrated assessment of air quality policies. Environmental Modeling and Assessment, vol 9, pp. 1-12, 2004

[89] Knight. F. (1924) "Some fallacies in the interpretation of social costs", Quarterly Journal of Economics. 38(4):582-606. Laih, C.-II. (1994) "Queuing at a bottleneck with single-and multi-step tolls", Transportation Research A, 28(3):197-208.

[90] Kuhn H.W w Tucker A.W, Non linear programming, in proceedings of the 2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, J. Neyman, ed., University of California Press, Berkeley, CA, 1951, pp 481-492.

[91] Kuhn H.W, Pathfix: an algorithm for computing traffic equilibria, Non linear programming, in Proceedings of 10th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, TX,1977, pp 831-834

[92] Labbe, M., Marcotte, P., and Savard, G., A bilevel model of taxation and its application to optimal highway pricing, Management Science, 44, 1595-1607, 1998.

[93] Lawphongpanich, S., and Hearn, W.D., An MPEC approach to second-best toll pricing, Mathematical Programming, 33-55, 2004.

[94] Lemske C, Bimatrix equilibrium points and mathematical programming, Management Science, 11 (1965), pp. 681-689

[95] Levy-Lambert, H. (1968) "Tarification des services aqualite variable: application aux peages de circulation", Econometrica, 36(3-4):564-574.

[96] Lindsey (1992) "Route choice with heterogeneous drivers and group specific congestion costs", Regional Science and Urban Economics, 22(1):71-102.

[97] Lindsey R, Verhoeff E. Traffic Congestion and Congestion pricing, Chapter 7 of Handbook of Transport Systems and Traffic Control. Ed by K,J Button e D.A. Hensher Vol. 3, pag 77-102.

[98] Lindsey, R. and E.T Verhoef (2000) "Congestion modelling", in: D.A Hensher and K.J. Button, eds., Handbooks in transport I. Tramport modelling. Oxford: Pergamon.

[99] Litman T., Well Measured: Developing Indicators for Comprehensive and Sustainable Transport Planning, Victoria Transport Policy Institute. Feb 2008

[100] Litman, T. and Burwel, D., Issues in sustainable transportation, Victoria Transport Policy Institute, www.vtpLorg/sus_iss.pdf, 2003.

[101] Liu. L.N. and J.E McDonald (1998) "Efficient congestion tolls in the presence of un priced congestion: A peak and off-peak simulation model". Journal of Urban Economics, 44:352-366.

[102] M. Milgate and P.K Newman, eds., The new Palgral'e: A dictionary ofeconomics, Vol. 4. New York: Macmillan.

[103] Marchand, M. (1968) "A note on optimal tolls in an impcrfect environment", Econometrica, 36(3-4). 575-581. May, AD. and D.S. Milne (2000) "Effects of alternative road pricing systems on network performance", Transportation Research A, 34(6):407-436.

[104] Marcotte P., Savard G, Smet F., A bilevel programming approach to the travelling saleman problem. Operational Rsearch, 32, pp. 240-248. 2004

[105] Marcotte, P. and Savard, G., Bilevel programming approach to optimal price setting, Decision and Control in Management Science, 97-117, 2002.

[106] Mayeres, I. and S. Proost (1999) "Marginal tax reform, extcrnalities and income distribution", Centre for Economic Studies. Catholic University Lcuven, working paper.

[107] Mills, D.E. (1981) "Ownership arrangements and congestion-prone facilities", American Economic RevieJ1,; Papers and Proceedings, 71(3):493-502.

[108] Mills, eds., Handbook of regional and urban economics. vol. 3. Amsterdam: North-Bolland.

[109] Mohring, H. (1985) "Profit maximization, cost minimization, and pricing for congestion-prone facilities", Logistics and Transportation Review, 21:27-36.

[110] Nagurney, A. and and Dhanda, K., A variational inequality approach for mar-.. J' ketable pollution permits, Computational Economics, 9, 363-384, 1996.

[111] Nagurney, A., Alternative pollution permit systems for transportation networks based on origin/destination pairs and paths, Transportation Research D, 5, 37-58, 1997.

[112] Nagurney, A., Sustainable Transportation Networks, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, England, 2000.

[113] Nash, J., Equilibrium points in a n-person games, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 36 (1950), pp 48-49

[114] Nijkamp, P. and AS. Rienstra (1995) "Private sector involvement in financing and operating transport infrastructurc",Annals of Regional Science, 29:221-235.

[115] P. and L. Leruth (1989) "The optimal product mix for a monopolist in the presence of congestion effects", International Journal of Industrial Organization, 7:437-449. Chu, X. (1999) "Alternative congestion pricing schedules", Regional Science and Urban Economics, 29:697-722.

[116] Parry, I.WH. and A.M. Bento (1999) "Revenue recycling and the welfare effects of congestion pricing", Resources for the Future. Washington, working paper.

[117] PATH,NLPEC, NLPEC user guide, http://www.gams.com/dd/docs/solvers/nlpec.pdf. 2002.

[118] Patriksson M., The traffic Assignement Problem: Models and Methods. Chapter 2 pag 29-66

[119] Pigou, AC. (1920) Wealth and welJare. Londun: Macmillan.

[120] Research and Decision Aid Methodologies in Traffic and Transportation Management, NATO ASI Series F. Springer-Verlag, 1997.

[121] Richardson, H.W. (1974) "A note un the distributional effects of road pricing", Journal of Transport Economics and Policy, 8:82-85.

[122] Rosenthal R.W, The network equilibrium problem in integers, Networks, 3, (1973), ,pp 53-59.

[123] Rutherdford T, Mixed Complementary problems with GAMS, Lecture Notes for Economy 6433, 2002

[124] Schrank D, and T Lomax (1999) "The 1999 annual mobility report information for urban America", Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas, http:// mobility.tamu.edu.

[125] Sheffi Y. Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. Prentice Hall, 1985.

[126] Shrestha, R., Anandarajah, G., Adhikari, S., Jiang, K., and Songli, Z., Energy and environmentally implications of NOx emission reduction from the transport sector of Beijing: A least cost planning analysis, Transportation Research, Part D, 10, 1-11, 2005.

[127] Small, K.A and J. Yan (2001) "The value of 'value pricing' of roads. Second-best pricing and product differentiation", Jm,rnal of Urban Economics, 49:310-336.

[128] Small, K.A. and J.A Gomez-Ibanez (1998) "Road pricing for congestion management: The transition from theory to policy", in: KJ. Button and E.T. Verhoef, eds., Road pricing, traffic congestion and the environment: Issues ofefficiency and social feasibility. Cheltenham: Edward

[129] Small, KA (1992b) "Using the revenues from cungestion pricing", Transportation, 19(4):359-381.

[130] Small,KA (1992a)"Urbantransportationeconomics". Fundamentals orpure and applied economics. Chur: IIarwoud.

[131] Smith M., 1979. Existence, uniqueness and stability of traffic equilibria. Transportation Research 13, 259-304

[132] Smith, TE., E.A. Eriksson and P.O. Lindberg (1995) "Existence of optimal tolls under conditiuns of stochastic user-equilibria", in: B. Johansson and L.-G. Mattsson, eds., Road pricing: Theory. empirical assessment and policy. Boston: Kluwer Academic.

[133] Tabuchi, T (1993) "Bottleneck congestion and modal split", Journal ofUrban Economics, 34:414-431.

[134] The Center for Sustainable Transportation, Definition and vision of sustainable transportation, htttp:// cst..uwinnipeg.ca/document.s/Definit.iOILVision_E.pdf, 1997.

[135] Transport for London, Central London congestion charging scheme impacts monitoring,

www.tfi.gov.uk/tfi/cclondon/pdfs/impacts-monitoring-reportjanuary-2005.pdf, 2005.

[136] Transportation Research Board, Highway Capacity Manual, 2000. World Comission on Environment and Development, Our common future, Oxford University Press, 1987.

[137] Transportation Research Board, TRB Special Report 251, 1997.

[138] Tzeng G., Chen C., Multiobjective decisionmaking for traffic Assignement. IEEE Transactions on Engineering Management 40, pp. 180-187. 1993

[139] Verhoef, E.T. (1998) "Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands", Free University of Amsterdam, working paper.

[140] Verhoef, E.T. and K.A. Small (1999) "Product differentiation on roads: Second-best congestion pricing with heterogeneity under puhlic and private ownership", Tinbergen Institute, Amsterdam Rotterdam, Discussion Paper TI 99-066/3.

[141] Verhoef, E.T., J. Rouwendal and P. Rietveld (1999) "Congestion caused by speed differences",Journal of Urban Economio, 45:533-556. Vickrey, 'vY.S. (1963) "Pricing in urban and suburban transport", American Economic Review, 53: 452-465.

[142] Verhoef, E.T., P. Nijkamp and P. Rietveld (1996b) "Second-best congestion pricing: The case of an untolled alternative", Journal of Urban Economics, 40(3):279-302.

[143] Verhoef, E.T., P. Nijkamp and P. Rietveld (1997a) "The social feasibility of road pricing: A case study for the Randstad area",Journal of Transport Economics and Policy, 31(3):255-267.

[144] Verhoef, E.T., P. Nijkamp and P. Rietveld (1997b) "Tradeable permits: Their potential in the regulation of road transport externalities", Environment and Planning B: Planning and Design, 24:527-548.

[145] Verhoef, E.T., R.H.M. Emmerink, P. Nijkamp and P. Rietveld (1996a) "Information provision, flat-and fine congestion tolling and the efficiency of road usage", Regional Science and Urban Economics, 26(5):505-530.

[146] Vickrey, 'vY.S. (1969) "Congestion theory and transport investment", American Economic Review (Papers and Proceedings), 59:251-260. Vickrey, 'vY.S. (197/) "Responsive pricing of public utility services", Bell Journal of Economics and Management Science, 2:337-346.

[147] Viton, P.A. (1995) "Private roads",Journal ofUrban Economics, 37(3):260-289.
[148] Walters, A.A. (1961) "The theory and measurement of private and social cost of highway congestion". Econometrica, 29(4):676-697.
[149] Wardrop J, some theorical aspects in road traffic research, Proceeding of the Institute Civil Engineers, Part II, pp 325-378.
[150] Yang H and Bell M., Models and algorithms for road network design: a review and some new developments, transport reviews, vlo. 18, no.3, pp.257-278, 1998
[151] Yang, H. (1999) "Evaluating the benefits of a combined route guidance and road pricing system in a traffic network with recurrent congestion", Transportation, 20:299-321.
[152] Yang, H. and H.-J. Huang (1997) "Analysis of time-varying pricing of a bottleneck with elastic demand using optimal control theory", Transportation Research B, 31(6):425-440.
[153] Yang, H. and H.-J. Huang (1998) "Principle of marginal-cost pricing: How does it work in a general road network?", Transportation Research A, 32(1):45-54.
[154] Zachariadi S, T., Assessing policies towards sustainable transport in Europe: An integrated model, Energy Policy, 33, 1509-1525, 2005.