



Un sistema di supporto alle decisioni per l'analisi dei conflitti derivanti da politiche di pricing

A Decision Support System for Analysing Conflicts Related to Pricing Policies Implementation

Mariano Gallo*, Luca D'Acierno**, Roberta Ciccarelli ***, Bruno Montella **

* Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Sannio
email: gallo@unisannio.it

*** Dottore di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Idraulici, di Trasporto e Territoriali. email: roberta.ciccarelli@unina.it

** Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti dell'Università di Napoli "Federico II" email: luca.dacierno@unina.it

**** Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti dell'Università di Napoli "Federico II" email: bruno.montella@unina.it

Introduzione

Le politiche di pricing sono considerate uno dei più efficaci strumenti per la gestione della domanda di mobilità in ambito urbano. Negli ultimi anni, in diverse città europee (come Londra, Stoccolma o Milano) sono state introdotte misure che impongono il pagamento di un pedaggio per l'accesso a determinate aree al fine di contenere gli elevati livelli di traffico raggiunti. I motivi che spingono alcune amministrazioni pubbliche a ricorrere all'utilizzo di politiche di tariffazione stradale in ambito urbano sono molteplici e vanno dalla riduzione dei fenomeni di congestione al controllo dei livelli di inquinamento acustico ed atmosferico. Le sopra citate strategie consentono di gestire i sistemi di trasporto in maniera più efficiente e sostenibile in quanto permettono di realizzare una ridistribuzione della domanda di mobilità in termini temporali, spaziali e modali rimodulando in particolare il modal split tra trasporto privato e trasporto pubblico. Una delle problematiche principali dell'applicazione delle politiche di pricing è la loro "accettazione" da parte della comunità e/o di sue componenti (commercianti, residenti, pendolari, ecc.) conducendo a conflitti ed opposizioni. E' necessario ed opportuno, pertanto, che le amministrazioni locali si dotino di un sistema di supporto alle decisioni che consenta loro di stabilire in corrispondenza di ciascuna strategia le ricadute in termini di benefici, mancati benefici e costi per ciascuna delle categorie interessate dall'intervento.

Per tale motivo, nella presente nota, si propone un modello per la valutazione delle politiche di pricing che stima tutte le ricadute quantificabili delle strategie proposte, implementando un problema di ottimizzazione dei costi degli utenti del trasporto stradale, dei costi degli utenti del trasporto collettivo e dei costi esterni. In particolare, la valutazione degli effetti sulla riduzione dei costi esterni fornisce argomenti al decisore politico per poter far accettare

In recent years several European cities (such as London, Stockholm and Milan) have introduced pricing policies as a tool for managing transport demand, especially to yield a temporal, spatial and modal redistribution of travel, and particularly rebalance the modal split between private vehicles and mass-transit systems. Indeed, the interaction between user behaviours (whose choices are affected by transportation network performances) and transportation networks (whose performances are depending on the number of travelling users/vehicles) brings the system about a condition, defined in the literature as *User Equilibrium*, which does not correspond to overall utility maximisation and fails to take account of external costs. The discrepancy between the User Equilibrium condition and the efficient use of transportation systems (condition indicated in the literature as *System Equilibrium*) comes from user behaviour in making mobility choices: an additional user, entering a traffic flow, considers a travel cost that does not include the cost increase imposed on the other travellers in the network. In other words, travellers try to maximise their own utility or private benefits instead of considering social welfare. It is shown that efficient transportation system use can be achieved by charging 'efficient tolls' on network links. The optimal situation can be reached by the imposition of a tax (or toll) that will reconcile the private cost and the social cost. These tolls, called Marginal Social Cost Pricing (MSCP) tolls, are equal to negative externalities (such as congestion cost, travel delays, air pollution, accidents) imposed on other travellers by an additional user and are one of the most popular tools for pricing applications. For several reasons (theoretical, political, social acceptability) it is impossible to charge "efficient tolls" (first-best solutions) proposed in the literature; therefore in real networks sub-optimal tolls (second-best solutions) are applied. Moreover, one of the main problems related to pricing policy application is their acceptability among community and/or social categories (such as shopkeepers, residents, commuters, etc.) leading to conflicts and oppositions.

In this paper we analyse the effects on optimal fare design when pricing revenues are wholly or partly used for improving public transport. In particular, we formulate a toll computation model through a multidimensional constrained optimisation problem according to economic theory in a multimodal and multiuser context, where multimodal features are calculated explicitly on the network for each fare configuration. The model is then applied on a trial network (built with heterogeneous values of relative accessibility among different traffic zones) and several second-best strategies are analysed with particular attention to possible effects of road pricing revenue use on social welfare and fare levels.

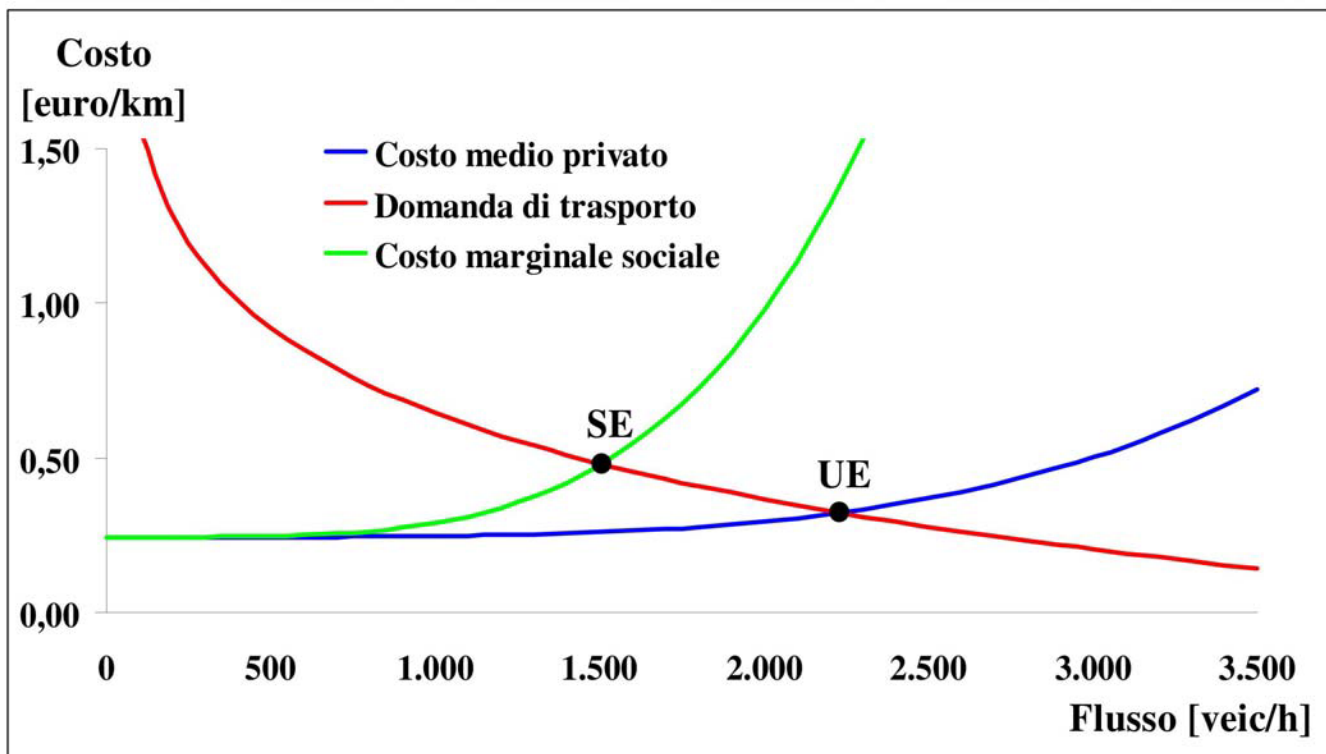


Fig.1 User Equilibrium e System Equilibrium.

alla comunità l'applicazione di politiche sicuramente impopolari per la maggior parte dei cittadini.

La necessità dell'adozione di politiche di gestione della domanda di mobilità deriva dal fatto che i sistemi di trasporto se non coadiuvati da intervento correttivi esterni (quali ad esempio le politiche di pricing) giungono in una configurazione di equilibrio che può condurre ad un'utilizzazione inefficiente delle risorse. Infatti, la naturale interazione tra domanda di mobilità e offerta di trasporto conduce il sistema in una condizione nota in letteratura come *User Equilibrium* (UE). Nel semplice caso di un'unica coppia origine-destinazione collegata da un arco, l'equilibrio dell'utente può essere rappresentato graficamente attraverso l'intersezione tra la funzione di domanda e la funzione di offerta, così come mostrato in Fig. 1. Da un punto di vista economico la condizione di equilibrio dell'utente non è efficiente, essendo l'efficienza definita dalla minimizzazione del costo totale ovvero dalla massimizzazione del surplus dell'utente, rispettivamente nei casi di domanda rigida ed elastica (Beckmann *et al.*, 1956). In letteratura si parla, tipicamente, di *System Optimum* (SO) quando il problema dell'assegnazione delle reti di trasporto è affrontato con approccio deterministico e di *System Equilibrium* (SE) (Gentile *et al.*, 2005) o *Stochastic System Optimum* (SSO) (Stewart, 2007) quando i modelli di scelta utilizzati per simulare il comportamento degli utenti rientrano nella famiglia dei modelli di utilità aleatoria. Come mostrato in Fig. 1, la condizione SE può essere graficamente

rappresentata dall'intersezione della funzione di domanda con la funzione di *costo marginale* (nota in letteratura anche come funzione di costo marginale sociale). Tale funzione non è altro che la somma del costo individuale e del costo imposto agli utenti dell'infrastruttura stradale da un veicolo aggiuntivo che si aggiunge alla corrente.

La discrepanza esistente tra lo User Equilibrium e il System Equilibrium è una diretta conseguenza del comportamento dell'utente nell'effettuare le proprie scelte di mobilità: infatti, un utente aggiuntivo, inserendosi in una corrente veicolare, considera un costo di viaggio che non include l'incremento di costo imposto agli altri utenti presenti nella rete. In altre parole, il generico utente è un massimizzatore naturale della propria utilità piuttosto che del benessere sociale. Si può dimostrare che è possibile ottenere, partendo da una configurazione di tipo UE, un uso più efficiente, in termini economici, di un sistema di trasporto imponendo un pedaggio di efficienza sugli archi della rete. Infatti, è ampiamente noto che la condizione economica ottimale di un sistema può essere ottenuta attraverso l'imposizione di una tassa (pedaggio nel caso delle infrastrutture stradali) che riconcili il costo privato con il costo sociale (Prud'homme e Bocarejo, 2005). I suddetti pedaggi, noti anche come *Marginal Social Cost Pricing Tolls* (MSCPT), non sono altro che la monetizzazione delle esternalità negative (quali costi di congestione, inquinamento acustico e atmosferico, costi degli incidenti) imposti agli utenti di un'infrastruttura stradale da un veicolo aggiuntivo e rappresentano oggi uno dei più

diffusi strumenti nelle applicazioni di road pricing (Yildirim e Hearn, 2005).

Partendo dalla teoria del *Marginal Social Cost* (MSC), numerosi modelli sono stati formulati per progettare le più avanzate strategie di pricing (Yang e Huang, 2004; Hamdouch *et al*; Kuwahara, 2007). Generalmente, in letteratura economica, una condizione in cui i pedaggi su ciascun arco della rete sono uguali ai costi marginali esterni è detta first-best. Tuttavia, non è sempre possibile determinare il prezzo ottimo di un bene a causa delle distorsioni del mercato (Rouwendal e Veroeff, 2006). Pertanto, nei casi reali si considerano soluzioni sub-ottime (*second-best*) che prevedono l'imposizione di pedaggi soltanto su un numero limitato di archi della rete di trasporto. Il problema dei pedaggi di tipo second-best è stato ampiamente affrontato da numerosi autori (Veroeff *et al.*, 1996; Lawphongpanich e Hearn, 2004; Zhang e Ge, 2004; Ekström *et al.*, 2009). Inoltre, i pedaggi di tipo first-best fanno riferimento ad una condizione teorica ideale in cui tutti gli utenti sono ipotizzati omogenei; tuttavia, nei sistemi di trasporto reali esiste una segmentazione dell'utenza, ad esempio rispetto al *Value Of Time* (VOT) che non può essere trascurata. Diversi autori (Arnott e Crauss, 1998; Yang e Zhang, 2008) hanno studiato il problema dei pedaggi anonimi, cioè di pedaggi che siano uguali per tutti gli utenti e prescindono dal valore attribuito al tempo. Infine, esistono numerose ragioni di natura pratica che spingono a considerare soluzioni di tipo second-best: i costi di realizzazione e gestione di un sistema di tariffazione che prevede un pedaggio su ciascun arco della rete possono essere proibiti e possono presentarsi non pochi problemi di accettabilità da parte degli utenti; pertanto, è sempre preferibile partire con progetti di tipo dimostrativo prima di implementare il road pricing su sistemi a larga scala (Verhoef, 2002).

Quando delle strategie di pricing sono applicate in una rete reale, una delle questioni più importanti da risolvere per i decisori politici è rappresentata dall'utilizzo dei ricavi derivanti dalla tariffazione. Generalmente, l'opzione più utilizzata per l'allocatione dei ricavi è quella che prevede investimenti nel trasporto collettivo (Farrel e Saleh, 2005). Questa soluzione è scelta soprattutto quando le politiche di pricing sono introdotte allo scopo di ridurre la congestione, in quanto gli investimenti nel settore dei servizi pubblici permettono di ridurre i problemi di accettabilità. Inoltre, in accordo con quanto sostenuto da Kottenhoff e Brundell Freij (2009), l'uso dei ricavi del pricing per il potenziamento del trasporto pubblico consente di aumentare da una parte l'elasticità degli utenti del sistema stradale (i quali tendono, generalmente, a mantenere la loro scelta modale inalterata) e dall'altra di compensare la riduzione della qualità del servizio sopportata dagli utenti che abbandonano l'auto per utilizzare il mezzi pubblici. Tuttavia, bisogna sottolineare che il potenziamento del trasporto collettivo va realizzato prima

o al più simultaneamente all'implementazione delle politiche di pricing al fine di fronteggiare i conflitti derivanti dai sopra citati problemi di accettabilità. Infatti, quando a Stoccolma è stato avviato il progetto pilota che ha portato all'introduzione del *congestion charging*, l'amministrazione pubblica aveva già provveduto, quattro mesi prima, ad incrementare il servizio di trasporto pubblico offerto ai cittadini del 7% (Eliasson *et al*, 2009). Analogamente, quando a Milano è stato implementato il Sistema Ecopass sono stati predisposti interventi di potenziamento che hanno portato ad un incremento giornaliero del 16% delle corse dei mezzi pubblici di superficie (Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente, 2009).

In Norvegia, invece, i pedaggi in ambito urbano sono stati utilizzati per finanziare la realizzazione di nuove infrastrutture stradali piuttosto che per ridurre i livelli di congestione. Nelle tre più grandi città del paese, Oslo, Bergen e Trondheim, sono stati introdotti sistemi di *cordon pricing*, inizialmente come principale fonte di finanziamento per la costruzione di nuove strade; successivamente si è deciso di investire una parte dei ricavi anche in programmi di potenziamento del sistema di trasporto pubblico (Odeck e Bråthen, 2008). In generale, qualunque sia il motivo che porta all'implementazione di misure di pricing, poiché una parte dei proventi derivanti dalla tariffazione deve andare a coprire i costi di gestione del sistema adottato, la percentuale dei ricavi da traffico che può essere utilizzata per migliorare le prestazioni del trasporto collettivo dipende unicamente dallo schema di riscossione dei pedaggi utilizzato.

Più precisamente, se si considera il sistema *Toll Ring* implementato a Oslo, cioè uno schema di cordon pricing elettronico, i costi di gestione assorbono soltanto il 10% del ricavo totale (Ieromonachou *et al.*, 2007). Invece, se si considera la *Congestion Charging* di Londra, cioè uno schema di area pricing che non prevede un sistema elettronico per la riscossione dei pedaggi, per l'anno finanziario 2007/2008 i costi totali (comprendenti costi di gestione, costi per la pubblicità, costi per i controlli, costi di gestione del traffico, costi per lo staff di Transport for London) sono stati di £131 milioni mentre i ricavi (derivanti dal pagamento del pedaggio e delle multe) sono stati di £268 milioni (Transport For London, 2008), comportando in tal modo un rapporto costi su ricavi del 49%. Naturalmente, un paragone tra il sistema Toll Ring di Oslo e la Congestion Charging di Londra non è fattibile né corretto essendo le finalità degli schemi completamente diverse (finanziare programmi e progetti nel settore dei trasporti, nel primo caso, e ridurre la congestione, nel secondo).

Tuttavia, quello su cui si vuol porre l'attenzione è l'estrema variabilità del ricavo totale netto rispetto al sistema di riscossione dei pedaggi adottato.

Nella successiva analisi verrà esaminato il problema della definizione delle tariffe nell'ipotesi in cui una parte dei ricavi

venga utilizzata per finanziare il trasporto collettivo. Spesso, la definizione dei modelli di calcolo dei pedaggi viene affrontata con approccio multimodale trascurando il problema dell'utilizzo dei ricavi (Gentile *et al.*, 2005) oppure il calcolo delle tariffe viene condotto nel caso semplice di reti omogenee (Huang, 2002; Ferrari, 2005).

Pertanto, verrà formulato un modello di calcolo dei pedaggi attraverso un problema di ottimizzazione vincolata multilivello in contesto multimodale e multiutente con domanda elastica. Tale modello sarà applicato ad una rete test eterogenea (nel senso che le coppie origine-destinazione presentano diversi livelli di accessibilità) al fine di analizzare diverse strategie di tipo second-best (quali il cordon e il parking pricing) e stimare il possibile effetto dell'uso dei ricavi da traffico sul benessere sociale e sul livello tariffario.

Modello di calcolo dei pedaggi ed algoritmi risolutivi

In letteratura (Cascetta, 2009), la struttura topologica di una rete di trasporto può essere modellata attraverso la teoria dei grafi, dove un grafo può essere definito come la coppia ordinata degli insiemi N e L , essendo N l'insieme dei nodi ed L l'insieme degli archi che collegano le coppie di nodi appartenenti ad N . Gli archi di un grafo utilizzato per definire una rete di trasporto rappresentano fasi di uno spostamento, quali la percorrenza di una strada o l'attesa ad una stazione. Analogamente, i nodi di un grafo descrivono il passaggio tra le fasi di uno spostamento, ad esempio l'attraversamento di un'intersezione. Per definire completamente una rete di trasporto è necessario, inoltre, associare a ciascun arco una funzione di impedenza ed un flusso. Le funzioni di impedenza, note anche come funzioni di costo, rappresentano l'insieme di tutte le risorse che vengono impegnate e consumate nell'attraversamento degli archi; il valore del flusso indica il numero medio di utenti o veicoli che, nell'unità di tempo, attraversano l'arco cui il flusso è associato.

In una rete di trasporto, esiste una particolare categoria di nodi, detti centroidi, che vengono associati a ciascuna zona di traffico in cui l'area di studio viene suddivisa e che rappresentano le origini e/o le destinazioni di tutti gli spostamenti relativi alla zona considerata. Infine, si definisce percorso una sequenza di archi successivi che collega un nodo origine con un nodo destinazione, essendo possibile collegare ciascuna coppia origine-destinazione con più percorsi.

Per poter costruire dei modelli che permettono di simulare il comportamento degli utenti all'interno di un sistema di trasporto, è necessario dividere la popolazione in diverse classi, dove ogni classe rappresenta una categoria omogenea rispetto ad alcune caratteristiche socio-economiche, quali ad esempio la disponibilità di un'auto o il livello di reddito.

La condizione precedentemente definita come User Equilibrium, cioè la naturale configurazione in cui si porta la rete a seguito dell'interazione tra le preferenze dell'utenza e le prestazioni del sistema di trasporto, può essere formulata da un punto di vista matematico attraverso la combinazione di due classi di modelli: modelli di offerta, che simulano le prestazioni di un sistema di trasporto in funzione dei flussi di utenti (o veicoli) che impegnano gli archi della rete, e modelli di domanda, che simulano il comportamento di scelta degli utenti in funzione delle prestazioni del sistema di trasporto. Un modello di offerta può essere definito attraverso una relazione analitica del tipo:

$$C_m^{i,h} = A_m^T c_m^{i,h} (f_1^h, \dots, f_m^h, \dots, f_n^h) + C_{m,i,h}^{NA} \quad (1)$$

dove:

$C_m^{i,h}$ è il vettore dei costi generalizzati di percorso per gli utenti della classe i e modo m relativo al periodo di tempo h , di dimensione $(n_{m-Percorsi} \times 1)$, il cui generico elemento $C_{m,i}^{k,h}$ esprime il costo generalizzato del percorso k per gli utenti della classe i relativamente al modo m e al periodo h ;

A_m è la matrice di incidenza archi-percorsi per il modo m , di dimensione $(n_{m-Archi} \times n_{m-Percorsi})$, il cui generico elemento $a_{l,k}^m = 1$ se l'arco l appartiene al percorso k , 0 altrimenti;

$c_m^{i,h}$ è il vettore di costi generalizzati di arco per gli utenti della classe i e modo m relativo al periodo di tempo h , di dimensione $(n_{m-Archi} \times 1)$, il cui generico elemento $c_l^{m,i,h}$ esprime il costo medio percepito agli utenti della classe i quando attraversano l'arco l con il modo m durante il periodo h (in una rete congestionata questo vettore dipende dai flussi totali di arco f_m^h relativi al modo m e al periodo h ;

$f_m^h = \sum_i f_m^{i,h}$ è il vettore dei flussi di arco relativi al modo m e al periodo h , di dimensione $(n_{m-Archi} \times 1)$, il cui generico elemento $f_l^{m,h}$ esprime il numero medio di utenti che attraversano l'arco l con il modo m nell'unità di tempo durante il periodo h ; tale vettore è uguale alla somma dei vettori di flusso $f_m^{i,h}$ relativi ad ogni classe di utente i , di dimensione $(n_{m-Archi} \times 1)$, il cui generico elemento $f_l^{m,i,h}$ esprime il numero medio di utenti della classe i che attraversano l'arco l con il modo m nell'unità di tempo durante il periodo h ;

$C_{m,i,h}^{NA}$ è il vettore dei costi non additivi di percorso per gli utenti della classe i relativamente al modo m e al periodo h , di dimensione $(n_{m-Percorsi} \times 1)$, il cui generico

elemento $C_{k,h}^{m,i,NA}$ esprime il costo dipendente dal solo percorso k per gli utenti della classe i relativamente al modo m e al periodo h (ad esempio il pedaggio all'ingresso o all'uscita di un'autostrada).

Il modello di domanda può essere definito come una relazione matematica che associa ad un dato sistema di attività e di offerta di trasporto il valore medio del flusso di domanda in un determinato periodo di riferimento con le sue caratteristiche rilevanti (Cascetta, 2009). I modelli di domanda possono essere derivati dalla teoria dell'utilità aleatoria basata sull'ipotesi che ciascun utente, essendo un decisore razionale, tende a massimizzare l'utilità associata alle proprie scelte. Tipicamente l'utilità derivante dalle scelte di mobilità viene espressa come funzione lineare del costo di viaggio generalizzato. Il modello di domanda può essere definito attraverso una relazione analitica del tipo:

$$f_m^{i,h} = A_m F_m^{i,h} = A_m P_m^{i,h} (-C_m^{i,h}) d_m^{i,h} (C_1^{i,h}, \dots, C_1^{i,h}, \dots, C_m^{i,h}, \dots, C_m^{i,h}, \dots, C_m^{g,h}, \dots, C_n^{i,h}, \dots, C_n^{i,h}, \dots, C_n^{g,h}, \dots, C_n^{g,h})$$

(2)

dove

$F_m^{i,h}$ è il vettore dei flussi di percorso degli utenti della classe i relativamente al modo m e al periodo h , di dimensione $(n_{m-Percorsi} \times 1)$, il cui generico elemento $F_k^{m,i,h}$ esprime il numero medio di utenti della classe i che sceglie il percorso k utilizzando il modo m nell'unità di tempo durante il periodo h ;

$P_m^{i,h}$ è la matrice di probabilità di scelta del percorso per gli utenti della classe i relativamente al modo m e al periodo h , nota come mappa di scelta del percorso, di dimensione $(n_{m-Percorsi} \times n_{Coppie-OD})$, il cui generico elemento $P_{k,od}^{m,i,h}$ esprime la probabilità che gli utenti della classe i spostandosi sulla coppia origine-destinazione od con il modo m durante il periodo di tempo h scelgano il percorso k ; tale matrice dipende, generalmente, dal vettore dei costi generalizzati di percorso;

$d_m^{i,h}$ è il vettore di domanda degli utenti della classe i relativamente al modo m e al periodo h , di dimensione $(n_{Coppie-OD} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il numero medio di utenti della classe i che si spostano sulla coppia origine-destinazione od con il modo m durante il periodo di tempo h . Se si ipotizza la domanda elastica, tale vettore dipende dal vettore dei costi generalizzati di percorso, altrimenti è costante.

Combinando le relazioni 1 e 2, si ottiene il ben noto modello di assegnazione formulato attraverso un problema di punto fisso (Cantarella, 1997):

$$\bar{f}_m^{i,h} = \sum_i \bar{f}_m^{i,h} = \sum_i A_m P_m^{i,h} (-A_m^T c_m^{i,h}(\bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) - C_{m,i,h}^{NA}) d_m^{i,h} (A_i^T c_i^{j,h}(\bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) + -C_{i,i,h}^{NA}, \dots, -A_m^T c_m^{i,h}(\bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) - C_{m,i,h}^{NA}, \dots, -A_n^T c_n^{g,h}(\bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) - C_{n,g,h}^{NA})$$

dove:

\bar{f}_m^h è il vettore dei flussi di arco relativamente al modo m e al periodo h nella condizione UE;

$\bar{f}_m^{i,h}$ è il vettore dei flussi di arco degli utenti della classe i relativamente al modo m e al periodo h nella condizione UE.

Essendo la condizione UE non efficiente da un punto di vista economico, è necessario introdurre dei pedaggi sugli archi della rete per modificare il comportamento di scelta degli utenti ed ottenere, così, un miglior utilizzo del sistema di trasporto. Dal momento che esistono due tipologie di costo per gli utenti, cioè costi additivi e costi non additivi (come mostrato dalla relazione 1), sarà necessario introdurre due categorie di tariffa: tariffe additive (indicate con y) e tariffe non additive (indicate con Y). Formalmente, le tariffe non additive possono essere considerate come tariffe di percorso. Tali pedaggi sono applicati ai gruppi di percorso che soddisfano alcune caratteristiche (ad esempio a tutti i percorsi che collegano una stessa coppia origine-destinazione).

Di conseguenza, il numero di variabili da ottimizzare sarà più basso (avendo bisogno di una variabile per ogni gruppo) e non sarà, pertanto, necessario procedere all'enumerazione di tutti i percorsi considerati, essendo questa operazione implicitamente realizzata dall'algoritmo di assegnazione. Un esempio di tariffa additiva è fornito dal pedaggio dipendente dalla lunghezza degli archi (se un'auto attraversa due archi pagherà una tariffa complessiva pari alla somma dei pedaggi sui due archi); invece, un esempio di tariffa non additiva è fornito dal parking pricing in quanto la somma pagata dagli utenti dipende solo dal luogo in cui si parcheggia e dalla durata della sosta, mentre è indipendente dal numero (o dalla lunghezza) degli archi attraversati.

Inoltre, se si considerano tariffe fisse (cioè tariffe che non dipendono dal tempo di permanenza nel sistema), le variabili y ed Y rappresentano dei semplici valori numerici; invece, se si considerano tariffe orarie (cioè tariffe che dipendono dal tempo di permanenza nel sistema, come il parking pricing), le variabili y ed Y vanno intese come costi per unità di tempo e la somma complessiva sostenuta da ciascun utente può essere ottenuta moltiplicando per il tempo speso all'interno del sistema.

Il calcolo dei pedaggi può essere formulato attraverso un problema di ottimizzazione multidimensionale vincolata che, in accordo con la teoria economica, permette di trovare i valori \hat{y} e \hat{Y} che massimizzano il social surplus (opposto della funzione obiettivo Z utilizzata); in termini analitici:

$$[\hat{y}, \hat{Y}] = \arg \min_{y \in S_y; Y \in S_Y} Z(y, Y, \bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h)$$

(3)

soggetto a:

$$[\bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h] = A(y, Y, \bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) \quad (4)$$

$$f_m^h \in S_{f_m} \quad \forall m \in \{1, \dots, n\} \quad (5)$$

dove:

y è il vettore delle tariffe additive, di dimensione $(n_{Archi-Strdali} \times 1)$, il cui generico elemento y_l rappresenta il valore del pricing applicato all'arco l ;

Y è il vettore delle tariffe non additive, di dimensione $(n_{Percorsi-Strdali} \times 1)$, il cui generico elemento Y_k rappresenta il valore del pricing applicato al percorso k ;

\hat{y} [\hat{Y}] è il valore ottimo del vettore y [vettore Y];

S_y [S_Y] è l'insieme di ammissibilità del vettore y [vettore Y], che esprime i valori minimo e massimo che possono essere assunti dalle tariffe additive [non additive];

Z è la funzione obiettivo da minimizzare, uguale all'opposto del Social Surplus;

L è la funzione di assegnazione;

S_{f_m} è l'insieme di ammissibilità del vettore dei flussi di arco f_m^h relativi al modo m ; tale insieme esprime la congruenza dei flussi di equilibrio con la domanda e l'offerta di trasporto (ad esempio la somma di tutti i flussi che entrano in un nodo della rete che non sia un centroide deve essere uguale alla somma dei flussi uscenti).

Il primo vincolo (Eq. 4) rappresenta il vincolo di assegnazione multimodale e fornisce il vettore dei flussi di equilibrio $(\bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h)$ per tutti i modi come una funzione delle variabili di progetto (y e Y) e dei flussi stessi $(\bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h)$. Bisogna notare che rispetto ai modelli di assegnazione multimodale proposti in letteratura, quello sopra formulato considera il fenomeno della congestione incrociata, a causa della quale una variazione del flusso nel sistema di trasporto privato produce una variazione dei tempi di percorrenza anche per il trasporto pubblico sugli archi stradali condivisi. Questa circostanza introduce delle complicazioni teoriche poiché non sono più verificate alcune ipotesi proposte da Cantarella (1997) che garantiscono l'esistenza e l'unicità del problema nel caso di approccio multimodale. Il secondo vincolo (Eq. 5), invece, impone il soddisfacimento delle condizioni di congruenza dei flussi (come indicato nella definizione dell'insieme). La funzione

obiettivo Z utilizzata per il problema di ottimizzazione è l'opposto del Social Surplus, che può essere espresso come somma algebrica dell'*User Surplus* (US), dei *Ricavi da Traffico* (RT), dei *Costi di Sistema* (CS) e dei *Costi Esterni* (CE), secondo la relazione:

$$\begin{aligned} Z(y, Y, \bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) = & -US(y, Y, \bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) + \\ & -RT(y, Y, \bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) + CS(y, Y, \bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) + \\ & + CE(y, Y, \bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) \end{aligned} \quad (6)$$

Lo User Surplus può essere utilizzato come un indicatore del benessere degli utenti che utilizzano il sistema di trasporto. In altri termini, US rappresenta l'utilità netta che gli utenti derivano dalle proprie scelte di mobilità e può essere calcolata, nel caso si utilizzi un approccio stocastico, attraverso la variabile EMPU (*Expected Maximum Perceived Utility*), cioè il valore medio della massima utilità percepita. L'uso di un modello appartenente alla famiglia Logit per il modal split consente di esprimere la variabile EMPU in forma chiusa secondo la relazione:

$$\begin{aligned} US(y, Y, \bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) = \\ \sum_h \sum_{od} \sum_i (d_{od}^{i,h}) \cdot W_{od}^{i,h}(y, Y, \bar{f}_1^h, \dots, \bar{f}_m^h, \dots, \bar{f}_n^h) \end{aligned} \quad (7)$$

dove:

$d_{od}^{i,h}$ è la domanda di mobilità sulla coppia origine-destinazione $o-d$ relativa agli utenti della classe i durante il periodo h ;

$W_{od}^{i,h}$ è la variabile EMPU calcolata attraverso la ben nota formula:

$$W_{od}^{i,h} = \vartheta \ln \sum_m \exp(V_{m,od}^{i,h} / \vartheta)$$

in cui $V_{m,od}^{i,h}$ l'utilità sistematica che gli utenti della classe i associano al modo m sulla coppia origine-destinazione $o-d$ durante il periodo h e ϑ il parametro del modello Logit.

Il secondo ed il terzo termine che compaiono nell'espressione del Social Surplus rappresentano, rispettivamente, l'ammontare dei ricavi da traffico, derivanti sia dal sistema di trasporto pubblico che da quello privato, e

dei costi di sistema. Quest'ultimo termine non è altro che la somma dei costi di gestione del sistema di trasporto collettivo, funzione dei parametri prestazionali dello stesso, e dei costi di gestione del sistema di pricing, supposti costanti rispetto ai flussi che impegnano la rete:

$$RT(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n^h) = \sum_h \sum_m \mathbf{y}^T \cdot \bar{\mathbf{f}}_m^h(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n^h) + \sum_h \sum_m \mathbf{Y}^T \cdot \bar{\mathbf{F}}_m^h(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n^h) \quad (8)$$

dove:

$\bar{\mathbf{F}}_m^h$ è la il vettore dei flussi di percorso nella condizione di equilibrio per gli utenti della classe i e per ogni modo m durante il periodo h , di dimensioni $(n_{m-Percorsi} \times 1)$, il cui generico elementi $\bar{f}_m^{i,h}$ esprime il numero medio di utenti che scelgono il percorso k con il modo m e durante il periodo h ; tale vettore è uguale a

$$\bar{\mathbf{F}}_m^h = \sum_i \mathbf{F}_m^{i,h}$$

$$CS(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n^h) = COTC(PPTS) + COSP \quad (9)$$

dove:

COTC sono i costi operativi del sistema di trasporto collettivo, legati al vettore *PPTS* che definisce i parametri prestazionali del sistema;

COSP sono i costi operativi del sistema di pricing, i quali sono costanti rispetto ai flussi della rete ma dipendenti dal sistema di riscossione dei pedaggi adottato.

Infine, l'ultimo termine che compare nell'espressione del Social Surplus rappresenta i costi esterni, espressi in letteratura come funzione dei flussi di equilibrio:

$$EC(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n^h) = EC^*(\bar{\mathbf{f}}_1^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n^h) \quad (10)$$

Il problema di ottimizzazione (3) può essere risolto adoperando l'algoritmo meta-euristico proposto da D'Acerno *et al.* (2006). Tale algoritmo si articola in quattro fasi: ottimizzazione esaustiva mono-dimensionale (fase 1),

definizione della soluzione iniziale (fase 2), ottimizzazione attraverso la ricerca di intorno (fase 3) e test di arresto o definizione di una soluzione iniziale (fase 4). La prima fase consiste in una ricerca monodimensionale esaustiva rispetto a ciascuna variabile del modello, mentre la altre sono supposte costanti (ad esempio uguali a 0). Nella seconda fase viene scelta la soluzione iniziale assegnando a ciascuna variabile il valore ottimo individuato nella fase precedente. A partire dal punto individuato, l'algoritmo ricerca l'ottimo locale nell'intorno della soluzione corrente. Nella quarta fase, il valore ottimo trovato nell'intorno viene confrontato con la soluzione iniziale: se sono differenti, l'algoritmo assume come nuovo punto iniziale la soluzione ottima e ripete le fasi 3 e 4.; se sono uguali, l'algoritmo si arresta e la soluzione corrente corrisponde al minimo locale della funzione obiettivo. Il sopra descritto algoritmo meta-euristico ha permesso di gestire le particolari variabili di progetto (y e Y) adoperate con il problema di ottimizzazione; per la loro descrizione si rimanda al paragrafo seguente.

Applicazioni su rete test

Il modello precedentemente formulato è stato applicato ad una rete test (Fig. 2) per verificare l'efficacia di diverse politiche di pricing.

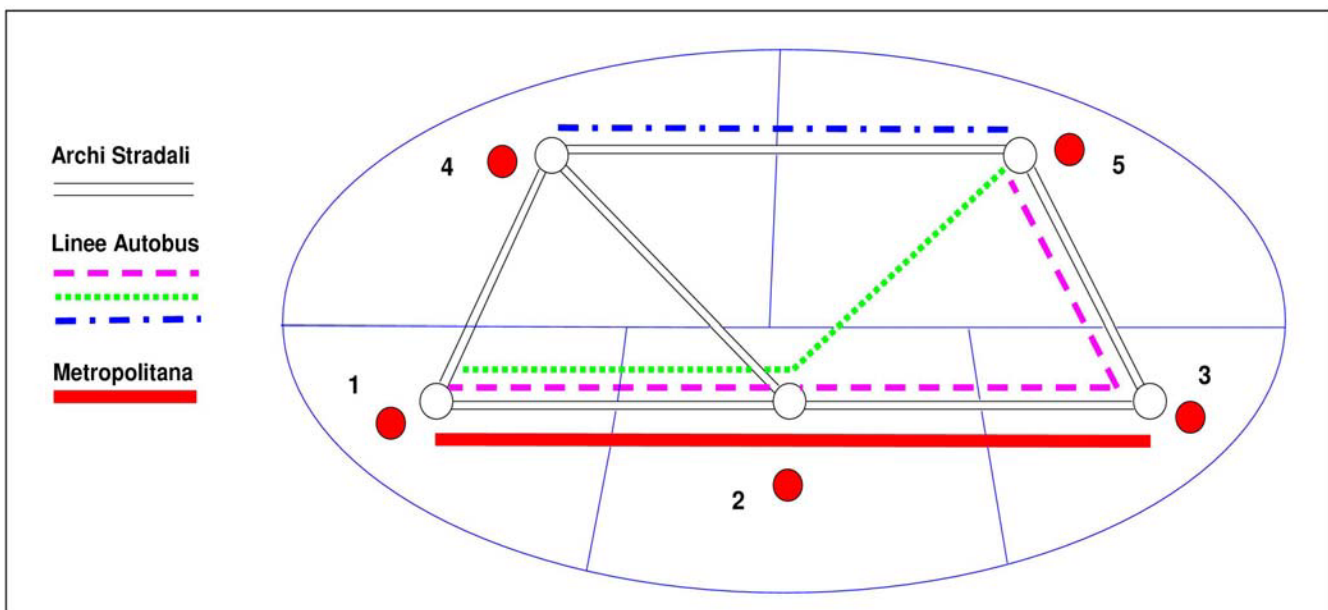
Gli utenti della rete possono effettuare i loro spostamenti con l'auto, con il trasporto collettivo e/o a piedi. Tuttavia, la principale caratteristica della rete è la forte variabilità del valore dell'accessibilità tra le diverse coppie origine-destinazione, coerentemente con quanto accade in una rete reale a servizio di una vasta area metropolitana: ad esempio, i nodi 2 e 4 non possono usufruire di alcun collegamento diretto con il trasporto pubblico. Per quanto riguarda la caratterizzazione della domanda, sono state considerate tre categorie di utenti che differiscono per l'insieme di scelta modale e per il tempo di permanenza nel sistema: utenti che non hanno disponibilità di un'auto (pari al 10% della domanda totale che si sposta su ogni coppia origine-destinazione); utenti che hanno un'auto e sostano nella zona di destinazione del loro spostamento 2 ore (pari al 20% della domanda totale che si sposta su ogni coppia origine-destinazione); infine, utenti che hanno un'auto e sostano nella zona di destinazione del loro spostamento 6 ore (pari al 70% della domanda totale che si sposta su ogni coppia origine-destinazione). Per ciascuna coppia origine-destinazione è stato ipotizzato un livello di domanda tale da produrre elevati valori della congestione quando non viene applicata alcuna politica di pricing agli archi della rete. Nelle applicazioni condotte sono state considerate soltanto misure di pricing di tipo second-best, quali cordon pricing e parking pricing. Per la tariffazione della sosta si è fatto

riferimento a tre possibili strategie: una prima che prevede tariffa unica per tutte le zone della rete; una seconda, detta *destination-based parking policy*, che prevede tariffe differenziate in funzione della zona in cui si effettua la sosta (la tradizionale tariffazione che viene comunemente applicata nei grandi centri urbani); infine, una terza, detta *Origin-Destination (OD) parking policy* e proposta da D'Acierno *et al.* (2006), che prevede tariffe differenziate per ciascuna coppia origine-destinazione della rete. Per le strategie proposte sono stati presi in esame due casi: un caso in cui le tariffe sono fisse ed un caso in cui le tariffe sono orarie. In questa seconda circostanza le variabili di progetto y ed Y esprimono dei valori per unità di tempo, pertanto l'ammontare complessivo pagato da ciascun utente per la sosta dipenderà dal suo tempo di sosta nel sistema. Naturalmente, per il cordon pricing le tariffe sono sempre fisse in quanto l'applicazione di una politica di tariffazione al cordone di tipo orario richiederebbe l'implementazione di un'avanzata tecnologia in grado di valutare per ogni veicolo il tempo di permanenza nell'area sottoposta alla misura. Inoltre, per ciascuna politica sono stati ipotizzati diversi valori della percentuale dei ricavi da traffico da utilizzare per il potenziamento del trasporto pubblico. In particolare, sono state ipotizzate 5 possibili situazioni: i ricavi del road pricing non vengono utilizzati; è possibile utilizzare il 25% dei ricavi; è possibile utilizzare il 50% dei ricavi; è possibile utilizzare il 75% dei ricavi; infine, è possibile utilizzare il 100% dei ricavi. Tuttavia, è bisogna sottolineare che, nei contesti reali, la percentuale dei ricavi da traffico che può essere usata come forma di finanziamento sistemi di trasporto alternativi all'auto privata dipende naturalmente dai costi di gestione dello schema di pricing adottato. Ad esempio, l'implementazione

di uno schema di cordon pricing con sistema di riscossione dei pedaggi completamente elettronico, come nel caso del Toll Ring di Oslo (Ieromonachou *et al.*, 2007), comporta dei costi di gestione molto bassi e, di conseguenza, una notevole disponibilità di fondi per finanziare programmi di mobilità e/o progetti di nuove infrastrutture. Al contrario, nell'applicazione di strategie di tipo parking pricing risulta più difficoltoso l'utilizzo di un sistema di riscossione completamente elettronico su vasta area perché le forme di controllo e sanzionamento delle infrazioni richiedono necessariamente l'impiego di personale, con conseguente aumento costi. Pertanto, nel caso di tariffazione della sosta raramente la percentuale di ricavi disponibile per altri usi risulta superiore al 50%.

Sebbene la rete test sia la stessa utilizzata da D'Acierno *et al.* (2006), è stato necessario apportare delle modifiche alla struttura dell'algoritmo risolutivo utilizzato per le applicazioni. In particolare, il modello di ottimizzazione proposto da D'Acierno *et al.* (2006) permette di progettare esclusivamente tariffe di sosta orarie. Nelle applicazioni condotte in questa memoria sono state considerate anche tariffe di sosta fissa (nel qual caso le variabili di progetto sono un valore reale e non più un valore per unità di tempo) e pedaggi di tipo cordon pricing (nel qual caso la variabile di progetto Y assume valore pari al pedaggio se corrisponde a un percorso che ha destinazione nell'area delimitata dal cordone e zero altrimenti). Inoltre, è stato necessario apportare delle modifiche all'algoritmo risolutivo che permettessero di valutare gli effetti in termini di flussi di utenti prodotti sulle diverse modalità di trasporto dall'utilizzo dei ricavi del pricing per il potenziamento del trasporto collettivo.

Fig.2 Schema della rete Test.



Le figure 3-7 mostrano i risultati dell'ottimizzazione per tutte le strategie implementate sulla rete test nei cinque possibili scenari ipotizzati per la percentuale dei ricavi da traffico disponibile. In particolare, in ciascuna figura viene fornito il valore della funzione obiettivo espresso in Euro/ora avendo considerato tutte le grandezze in gioco (tempi di percorrenza, tempi di attesa, etc.) in equivalente monetario attraverso l'uso di opportuni coefficienti. Da un'analisi dei risultati emerge che, qualunque sia la percentuale dei ricavi utilizzata, le politiche con tariffe orarie risultano essere sempre migliori del cordon pricing e che tra tutte le strategie quella ottima risulta essere sempre l'origin-destination parking pricing.

Fig.3 Valori della funzione obiettivo quando i ricavi del pricing non sono utilizzati.

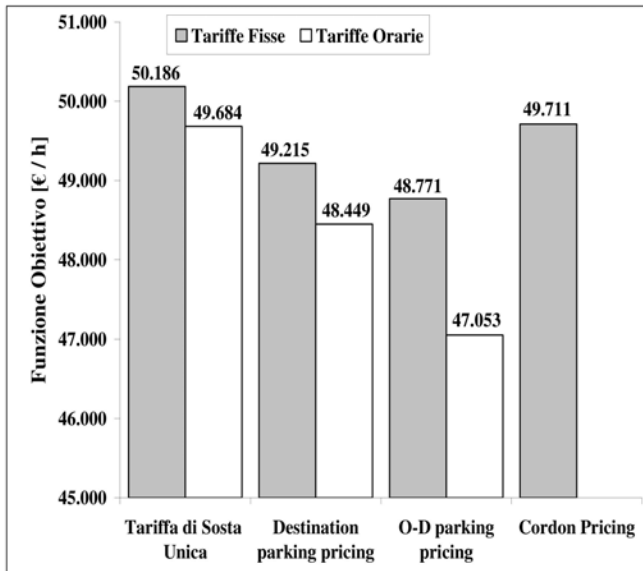


Fig.4 Percentuale dei ricavi usata al 25%.

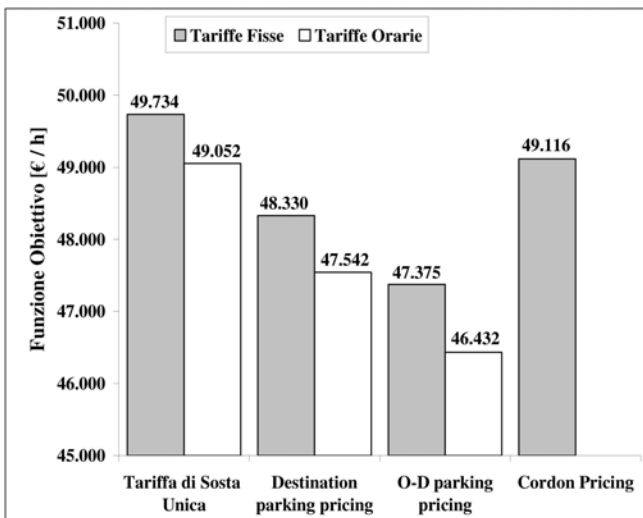


Fig.5 Percentuale dei ricavi usata al 50%.

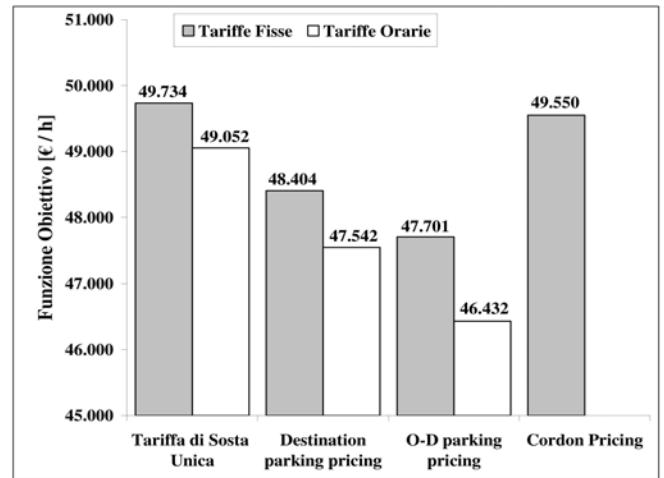


Fig.6 Percentuale dei ricavi usata al 75%.

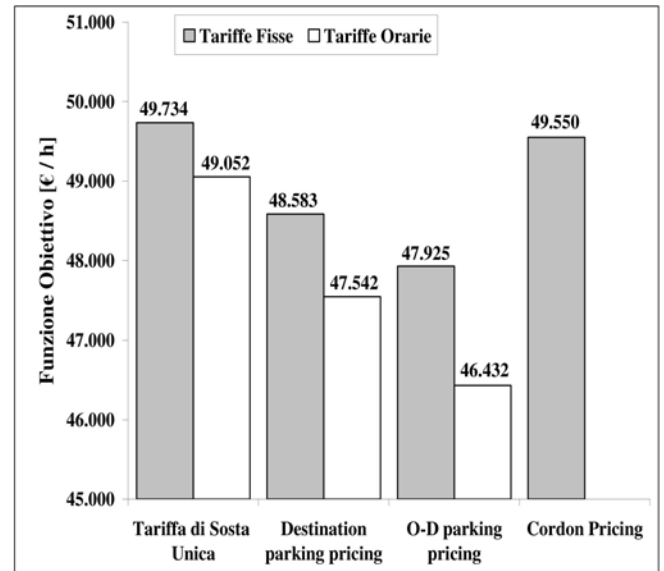
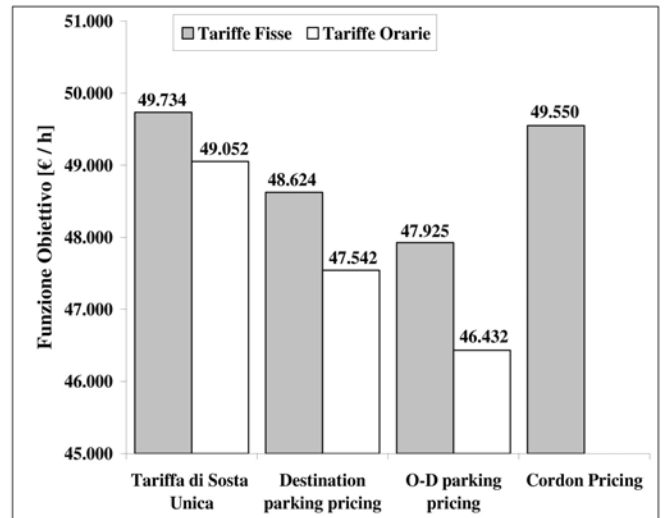


Fig.7 Percentuale dei ricavi usata al 100%.



La Fig. 8 fornisce un confronto generale (sempre in termini di funzione obiettivo) tra tutte le strategie testate in corrispondenza di tutti i possibili scenari ipotizzati.

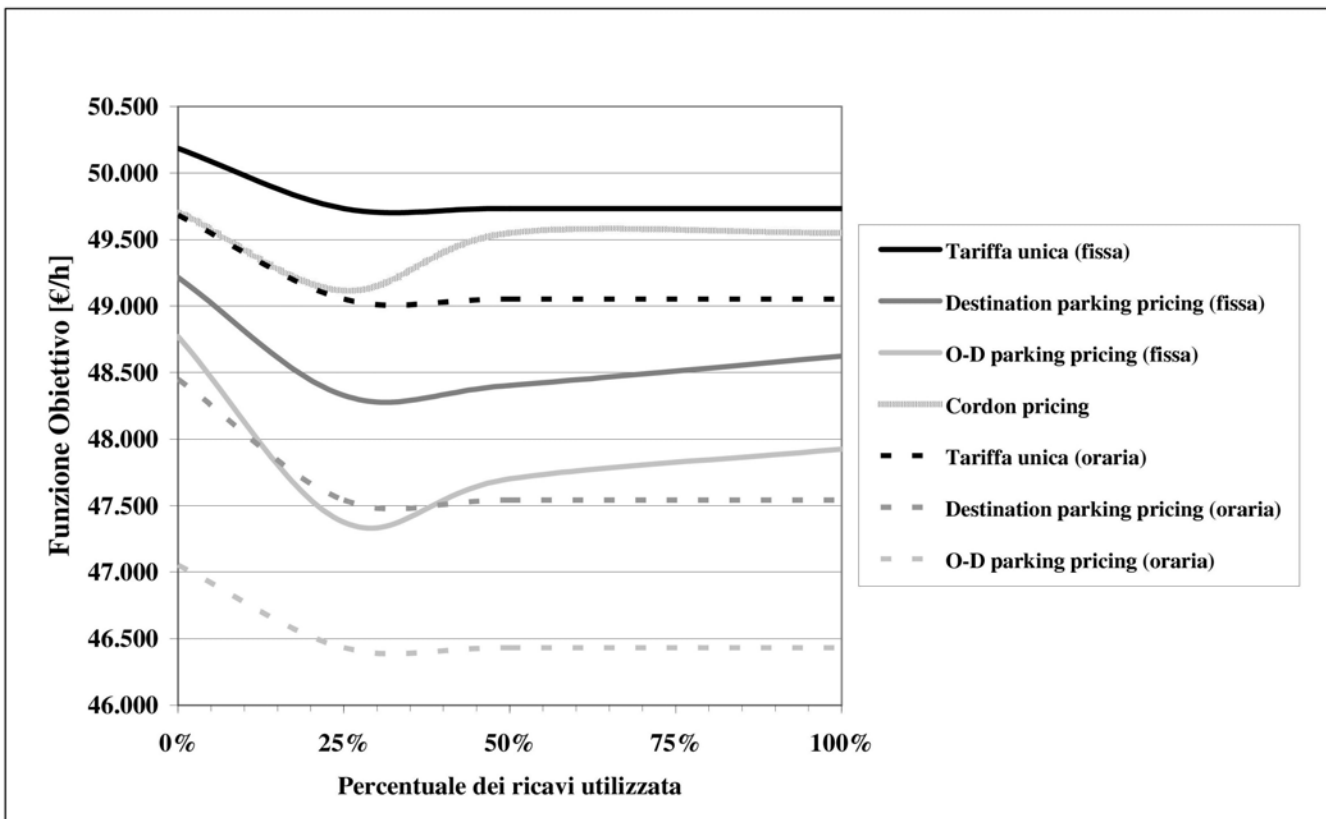
Come si può osservare dall'andamento delle curve, per ogni strategia testata il valore ottimo della funzione obiettivo corrisponde sempre ad una percentuale di utilizzo dei ricavi da traffico compresa tra il 25 ed il 50%. La spiegazione di questo particolare risultato deriva dal fatto che per percentuali di investimento inferiori al 25% del ricavo del pricing il miglioramento delle prestazioni del trasporto collettivo è pressoché trascurabile, mentre per percentuali superiori al 50% la capacità attrattiva del servizio pubblico è tale da ridurre notevolmente gli utenti del trasporto privato con conseguente riduzione dei ricavi e, quindi, di disponibilità di risorse da investire. Pertanto, esiste una configurazione ottima dell'intero sistema di trasporto che rappresenta un compromesso tra la necessità di ridurre il numero di veicoli circolanti e la possibilità di rendere implicitamente gli utenti che effettuano gli spostamenti in auto finanziatori del trasporto collettivo.

L'analisi della ripartizione modale (Fig. 9-13) mostra che alle tariffe orarie corrispondono sempre valori più elevati della domanda di trasporto collettivo e che il più alto valore di utilizzo del servizio pubblico è sempre prodotto dalla tariffazione della sosta basata sia sull'origine che sulla destinazione dello spostamento (Origin-Destination parking

policy). Per quanto riguarda l'uso dei ricavi, per valori di investimento superiori al 25% i valori del modal split rimangono pressoché costanti in quanto il sistema raggiunge una condizione di equilibrio legata alla riduzione del numero di "finanziatori" (cioè gli automobilisti) del trasporto collettivo. In generale, la funzione obiettivo utilizzata nella formulazione del problema di ottimizzazione multidimensionale vincolata non fornisce come risultato la massimizzazione della domanda di utenti del servizio pubblico bensì la massimizzazione congiunta dell'accessibilità e dei ricavi. Infatti, la ripartizione modale riportata nelle Fig. 9-13 rappresenta i valori medi nella rete senza tener conto dei differenti valori di accessibilità per le diverse coppie origine-destinazione. Pertanto, la funzione obiettivo adoperata (descritta dall'Eq. 6), che permette di massimizzare l'accessibilità relativa di ogni coppia origine-destinazione, può essere considerata un ottimo strumento per il progetto di un sistema di trasporto.

Infine, è possibile dimostrare che l'uso dei ricavi del pricing per il potenziamento del trasporto collettivo permette di ridurre il livello tariffario e che tale riduzione risulta essere dipendente dai parametri prestazionali del servizio collettivo su gomma. Il suddetto legame è mostrato in Fig. 14 in cui viene fornita, in funzione delle frequenze iniziali delle linee di autobus, la variazione del cordon pricing che si verifica utilizzando il 50% dei ricavi per potenziare il trasporto pubblico rispetto al caso in cui non venga effettuato alcun

Fig.8 Funzione obiettivo per tutte le strategie di pricing e percentuali d'uso dei ricavi.



tipo di investimento. Le frequenze di servizio sono supposte uguali per tutte le linee della rete test. Come si può osservare, la riduzione della tariffa al cordone prodotta dall'uso dei ricavi aumenta all'aumentare delle frequenze iniziali delle linee su gomma. Sulla base di tutte le considerazioni sopra esposte si deduce che, dal punto di vista economico, l'utilizzo dei ricavi è positivo perché aumenta il social surplus e, contemporaneamente, possono essere ridotte le tariffe, con un guadagno generale di accettabilità da parte dell'opinione pubblica. Pertanto è possibile affermare che politiche di parking pricing ben progettate possono risultare strumenti di gestione della domanda di mobilità più efficaci rispetto a politiche che impongono agli utenti il pagamento di un pedaggio per l'accesso ad un centro urbano.

Fig.9 Valore della domanda del trasporto pubblico quando i ricavi del pricing non sono utilizzati.

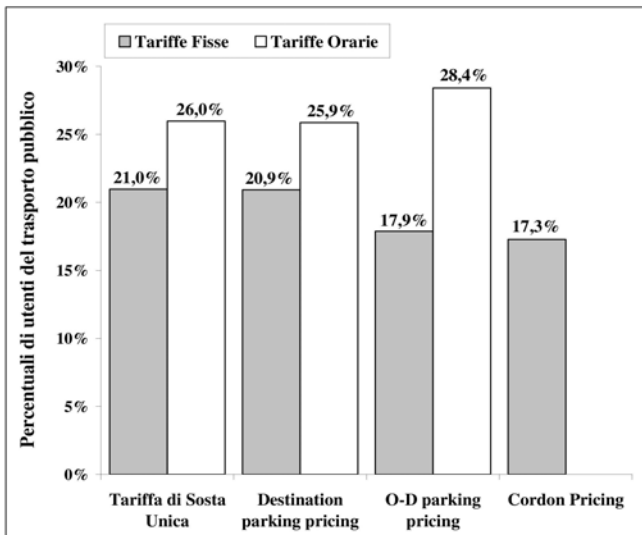


Fig. 10 Valore della domanda del trasporto pubblico quando la percentuale di investimento è il 25% dei ricavi.

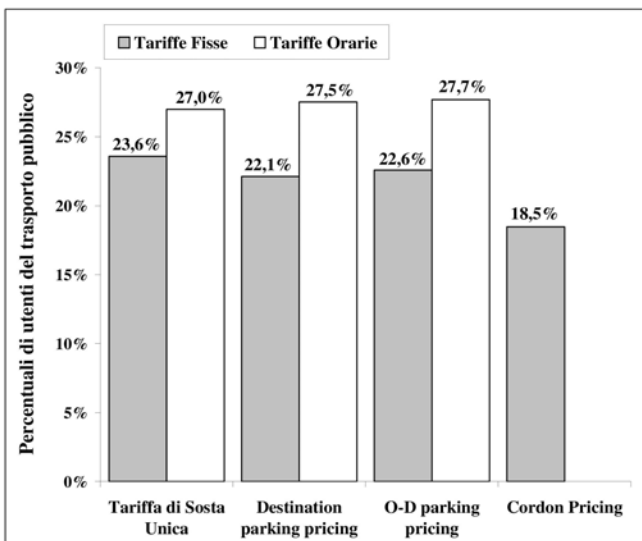


Fig.11 Valore della domanda del trasporto pubblico quando la percentuale di investimento è il 50 % dei ricavi.

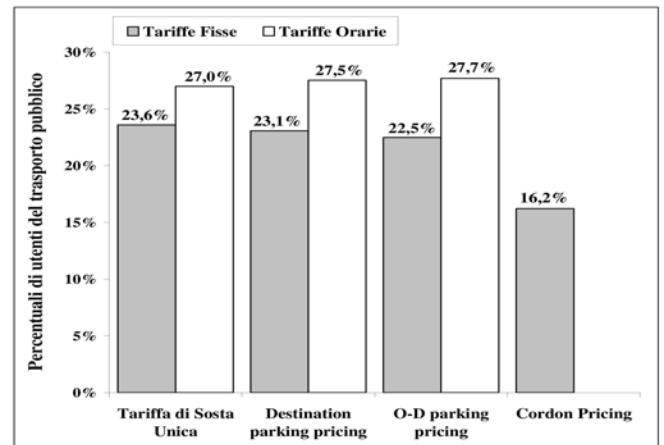


Fig.12 Valore della domanda del trasporto pubblico quando la percentuale di investimento è il 75 % dei ricavi.

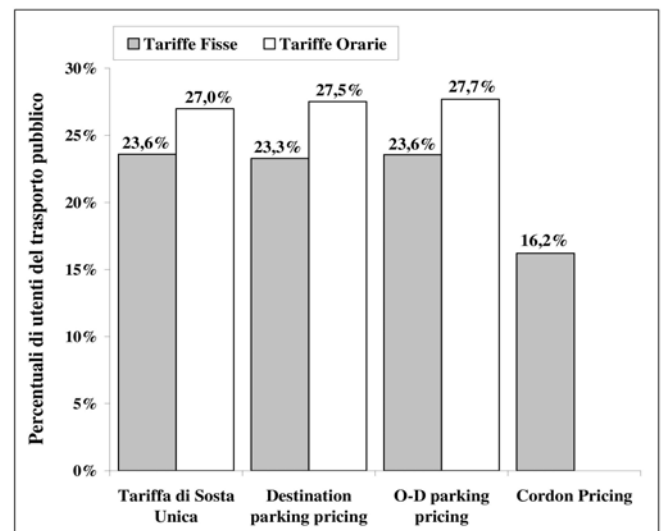
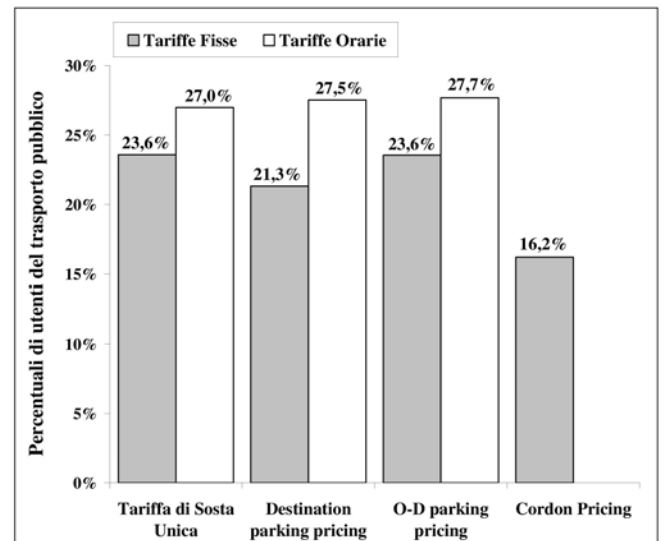


Fig.13 Valore della domanda del trasporto pubblico quando la percentuale di investimento è il 100% dei ricavi.



Inoltre, l'utilizzo di ricavi derivanti dalla tariffazione è sempre consigliabile perché, come sottolineato in precedenza, consente l'incremento del social surplus da un parte e la riduzione delle tariffe dall'altra.

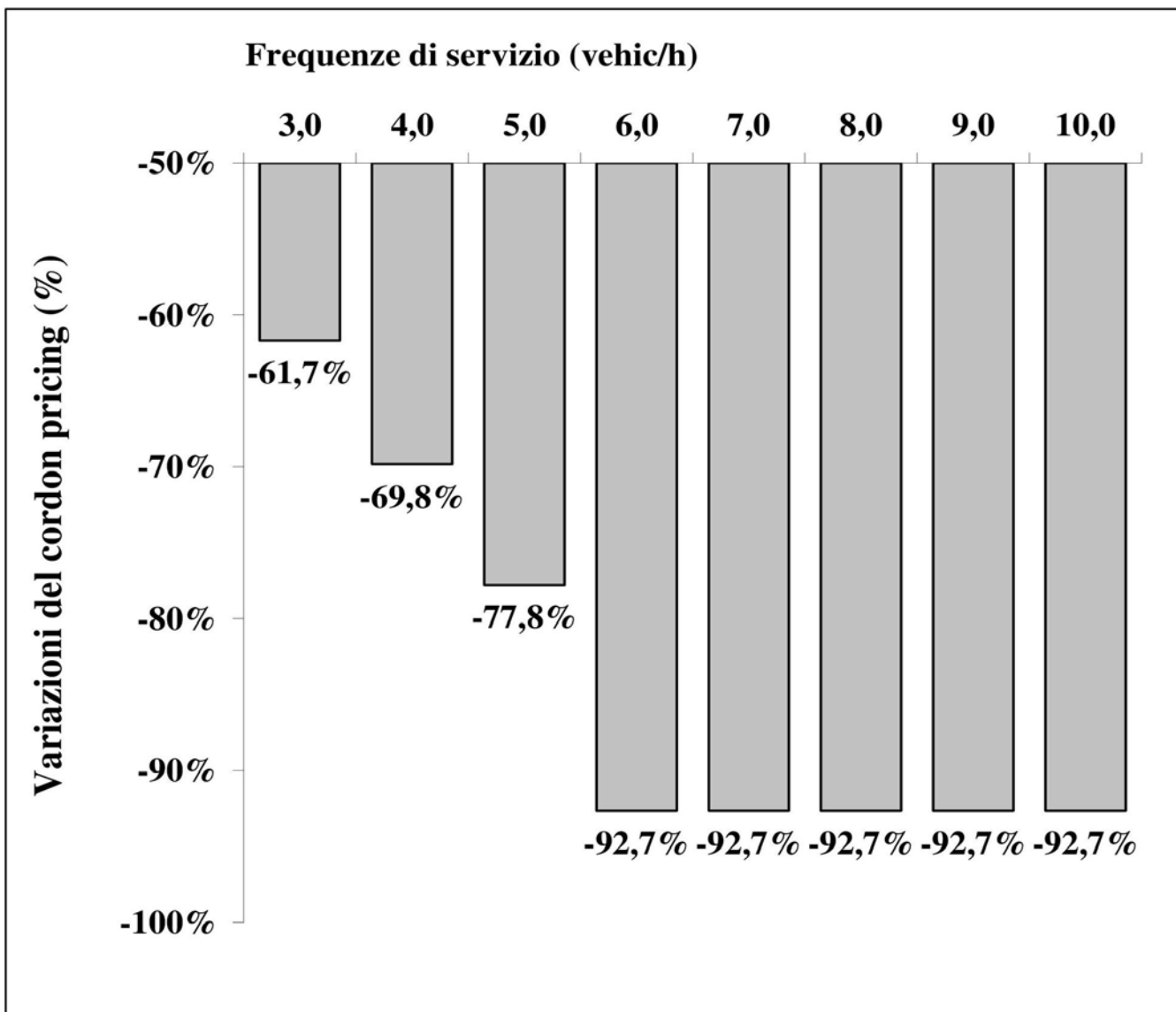
Coerentemente con la teoria economica (Pigou, 1920; Beckmann *et al.*, 1956), l'utilizzo ottimale di un sistema di trasporto può essere ottenuto imponendo ad ogni utente un costo addizionale pari alla differenza tra il costo marginale ed il costo medio privato. Poiché gli utenti, in generale, presentano diverse caratteristiche socio-economiche, il costo medio privato può risultare molto variabile all'interno dell'intera utenza. Di conseguenza, la miglior strategia è quella che permette di imporre tariffe differenziate sulla base delle differenti classi socio-economiche in cui è possibile dividere gli utenti. Nella rete test adoperata gli utenti sono stati differenziati sulla base della disponibilità di un'auto e del

tempo di sosta nella zona di destinazione dello spostamento. Pertanto, in questo caso, la miglior strategia (cioè quella che prevede tariffe differenziate in funzione delle caratteristiche socio-economiche delle diverse classi) è il parking pricing orario basato sull'origine e sulla destinazione dello spostamento, essendo tale misura completamente modulata sulle caratteristiche dell'utenza.

Conclusioni e prospettive di ricerca

Nello studio condotto è stato proposto un sistema di supporto alle decisioni per analizzare in maniera quantitativa i conflitti derivanti dall'adozione di politiche di tariffazione del sistema di trasporto privato al fine di ottenere un uso più efficiente della rete di trasporto. Data l'impossibilità di

Fig.14 Variazione del cordon pricing quando la percentuale di investimento è il 50% dei ricavi.



applicare, per una serie di motivi precedentemente analizzati, i pedaggi previsti dalla letteratura economica in una rete reale, è stata analizzata l'efficacia di alcune politiche cosiddette second-best, quali il cordon ed il parking pricing, attraverso l'applicazione del modello formulato ad una rete test adeguatamente costruita. Coerentemente con le caratteristiche di una rete di trasporto reale a servizio di una vasta area metropolitana, è stata utilizzata una rete multimodale con livelli di accessibilità variabili tra le diverse coppie Origine-Destinazione e domanda di mobilità segmentata in funzione delle caratteristiche socio-economiche dell'utenza. In particolare, se si considerano utenti con differente tempo di sosta all'interno del sistema, il road pricing può non essere la miglior strategia, mentre alcune politiche di parking pricing, come l'Origin-Destination parking policy, possono risultare un efficace strumento di gestione della domanda di mobilità. Inoltre, una politica di tariffazione della sosta comporta un minor

numero di problemi di accettabilità rispetto ad una politica di road pricing, che difficilmente incontra l'approvazione dell'opinione pubblica e dei decisori politici.

Come molti autori suggeriscono, l'utilizzo dei ricavi da traffico per il potenziamento del trasporto collettivo produce effetti positivi, in quanto non solo comporta un aumento del social surplus ma permette anche la riduzione delle tariffe, con conseguente guadagno di accettabilità da parte dell'opinione pubblica. Naturalmente, queste considerazioni sull'efficacia delle politiche esaminate sono legate alle caratteristiche della rete test adoperata. Un possibile avanzamento della ricerca intrapresa potrebbe essere quello che permette di estendere queste considerazioni relative alla percentuale di utilizzo dei ricavi da traffico ad una rete reale, poiché l'analisi dei sistemi di pricing attualmente implementati nei centri urbani mostra che essa risulta fortemente variabile e dipendente dal sistema di riscossione dei pedaggi adottato.

Riferimenti bibliografici

- Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente (2009) "Monitoraggio Ecopass: Gennaio-Dicembre 2008".
- Arnott R., Krauss M. (1998) "When are anonymous congestion charges consistent with marginal cost pricing?", *Journal of Public Economics* 67, 45-64.
- Beckmann M., McGuire C.B., Winsten C.B. (1956) "Studies in the Economics of Transportation", Yale University Press, New Haven (CT), USA.
- Cantarella G.E. (1997) "A general fixed-point approach to multimodal multi-user equilibrium assignment with elastic demand", *Transportation Science* 31, 107-128.
- Cascetta E. (2009) "Transportation systems analysis: models and applications", Springer, New York (NY), USA.
- D'Acerno L., Gallo M., Montella B. (2006) "Optimisation models for the urban parking pricing problem", *Transport Policy* 13, 34-48.
- Ekström J., Engelson L., Rydergren C., 2009. "Heuristic algorithms for a second-best congestion pricing problem". *Netnomics* 10, pp. 85-102.
- Eliasson J., Hultkrantz L., Nerhagen L., Rosqvist L.S. (2009) "The Stockholm congestion-charging trial 2006: Overview of effects", *Transportation Research Part A* 43, 240-250.
- Farrel S., Slesh W. (2005) "Road-user charging and the modelling of revenue allocation", *Transport Policy* 12, 431-442.
- Ferrari P. (2005) "Road Pricing and users' surplus", *Transport Policy* 12, 477-487.
- Gentile G., Papola N., Persia L. (2005) "Advanced pricing and rationing policies for large scale multimodal networks", *Transportation Research Part A* 39, 612-631.
- Ieromonachou P., Potter S., Warren J.P. (2007) "A strategic niche analysis of urban road pricing in the UK and Norway", *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 7, 15-38.
- Hamdouch Y., Florian M., Hearn D.W., Lawphongpanich S. (2007) "Congestion pricing for multi-modal transportation systems". *Transportation Research Part B* 41, 275-291.
- Huang H.J. (2002) "Pricing and logit-based mode choice models of a transit and highway system with elastic demand", *European Journal of Operational Research* 140, 562-570.
- Kottenhoff K., Brundell Freij K. (2009) "The role of public transport for feasibility and acceptability of congestion charging-The case of Stockholm", *Transportation Research* 43, 297-305.
- Kuwahara M. (2007) "A theory and implications on dynamic marginal cost", *Transportation Research Part A* 41, 627-643.
- Lawphongpanich S., Hearn D.W. (2004) "An MPEC approach to second-best toll pricing", *Mathematical Programming* 101, 33-35.

- Odeck J., Bråthen S., 2008. "Travel demand elasticities and users attitudes: A case study of Norwegian toll projects". *Transportation Research A*, 42 pp. 77-94.
- Pigou A.C. (1920) "The economics of welfare", MacMillan, London, United Kingdom.
- Prud'homme R., Bocarejo J.P. (2005) "The London congestion charge: a tentative economic appraisal", *Transport Policy* 12, 279-287.
- Rouwendal J., Veroeff E.T. (2006) "Basic economic principles of road pricing: From theory to applications", *Transport Policy* 13, 106-114.
- Stewart K. (2007) "Tolling traffic links under stochastic assignment: Modelling the relationship between the number and price level of tolled links and optimal traffic flows", *Transportation Research Part A* 41, 644-654.
- Transport for London (2008) "Central London Congestion Charging: Impacts Monitoring", 6th Annual Report, Transport for London, London, United Kingdom.
- Verhoef E.T., Nijkamp P., Rietveld P. (1996) "Second-best congestion pricing: the case of an untolled alternative", *Journal of Urban Economics* 40, 279-302.
- Verhoef E.T. (2002) "Second best congestion pricing in a general networks: heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points". *Transportation Research Part B* 36, 707-729.
- Yang H., Huang H.J. (2004) "The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and system optimum problem", *Transportation Research Part B* 38, 1-15.
- Yang H., Zhang X. (2008) "Existence of anonymous link tolls for system optimum on networks with mixed equilibrium behaviours", *Transportation Research Part B* 42, 99-112.
- Yildirim M.B., Hearn D.W. (2005) "A first best toll pricing framework for variable demand traffic assignment problems", *Transportation Research Part B* 39, 659-678.
- Zhang H., Ge Y.E. (2004) "Modeling variable demand equilibrium under second-best road pricing", *Transportation Research Part B* 38, 733-749.