



## Un modello di punto fisso e relativi algoritmi per la simulazione della distribuzione urbana delle merci in un contesto multimodale

*Luca D'Acerno,*

*Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti, Università di Napoli "Federico II"*

[luca.dacerno@unina.it](mailto:luca.dacerno@unina.it)

*Mariano Gallo,*

*Dipartimento di Ingegneria, Università del Sannio*

[gallo@unisannio.it](mailto:gallo@unisannio.it)

*Bruno Montella.*

*Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti, Università di Napoli "Federico II"*

[bruno.montella@unina.it](mailto:bruno.montella@unina.it)

**Abstract:** *Le reti di trasporto in ambito urbano sono generalmente condivise da tre tipologie di veicoli: le autovetture private, gli autobus ed i veicoli adibiti al trasporto delle merci (veicoli commerciali). Queste categorie di veicoli influenzano reciprocamente i propri tempi di viaggio (fenomeno della congestione incrociata). Pertanto, al fine di simulare le prestazioni delle reti di trasporto in ambito urbano, è necessario sviluppare un modello di assegnazione multimodale che tenga conto delle influenze generate dai veicoli sulle scelte degli utenti (almeno a livello di scelta modale e del percorso). Nella presente memoria si estende il modello proposto in un precedente articolo (D'Acerno et al., 2002) al caso della simulazione della distribuzione urbana delle merci, considerando la congestione incrociata tra tutti i sistemi di trasporto presi in considerazione. Il modello proposto è testato su di una rete di dimensioni reali mediante tre differenti approcci algoritmici al fine di confrontarne le prestazioni in termini di tempi di elaborazione ed affidabilità dei risultati.*

**Keywords:** **problemi di punto fisso, assegnazione multimodale alle reti di trasporto, congestione incrociata, distribuzione urbana delle merci.**

### 1. Introduzione

Un problema di assegnazione multimodale, in generale, si presenta quando è necessario stimare i flussi (di utenti e/o veicolari) congiuntamente su differenti sistemi di trasporto e quando sussistono le seguenti ipotesi: la scelta modale, oltre che quella del percorso, è influenzata dai costi della rete ed almeno due sistemi di trasporto sono congestionati (cioè le loro prestazioni dipendono dai flussi). Alcuni autori (ad esempio, Cantarella, 1997; Cascetta, 2001) hanno dimostrato che con opportune ipotesi sulle funzioni di costo, su quelle di domanda e sui modelli di scelta del percorso, è possibile dimostrare l'esistenza e l'unicità della soluzione del problema di assegnazione.

Nel presente lavoro, si propone un modello di assegnazione dove l'elasticità della domanda è associata alla scelta modale, considerando rigide le fasi di generazione e distribuzione degli spostamenti. Inoltre, al fine di utilizzare ipotesi attendibili in un contesto urbano, si è ipotizzato che i tempi di percorrenza degli autobus dipendano dai flussi delle autovetture e dei veicoli commerciali nel caso di corsie promiscue.

Bisogna far notare che tali ipotesi complicano dal punto di vista teorico i modelli di assegnazione in quanto non soddisfano alcune delle condizioni proposte da Sheffi (1985), Oppenheim (1995) e Cantarella (1997) che consentono di dimostrare l'unicità della soluzione sotto l'ipotesi di domanda elastica. Questo problema è stato analizzato e risolto da D'Acerno *et al.* (2002), estendendo le



condizioni sulle funzioni di costo al caso di un contesto bimodale (sistema di trasporto individuale e collettivo). Pertanto, obiettivo del presente lavoro è l'estensione dei modelli bimodali citati al caso della presenza di un terzo sistema di trasporto congestionato (distribuzione urbana delle merci).

Il modello proposto è stato risolto utilizzando tre differenti approcci algoritmici (approccio esterno, approccio interno ed approccio ad iperrete), simulando l'effetto della presenza dei veicoli commerciali sulle scelte degli utenti del trasporto individuale e collettivo.

La memoria è così articolata: nel paragrafo 2 sono riportate le ipotesi del modello di assegnazione multimodale proposto e la relativa formulazione analitica; nel paragrafo 3 sono descritti gli algoritmi risolutivi proposti ed i primi risultati su di una rete di dimensioni reali; infine, le conclusioni e le prospettive di ricerca sono sintetizzate nel paragrafo 4.

## 2. Il modello di assegnazione

Il modello di assegnazione multimodale proposto è basato sulle seguenti ipotesi:

- sono prese in considerazione tre modalità di trasporto: trasporto individuale, trasporto collettivo e trasporto merci;
- la domanda è elastica a livello di scelta modale per il sistema di trasporto individuale e per quello collettivo;
- la domanda è assunta rigida per il sistema di trasporto merci;
- il comportamento di scelta del percorso per gli utenti del trasporto collettivo è di tipo preventivo/adattivo (approccio ad ipercammini);
- i tre sistemi di trasporto si influenzano reciprocamente in termini di tempi di viaggio nel caso di corsie promiscue;
- i tempi di viaggio del trasporto collettivo sono costanti nel caso di corsie riservate;
- il modello di assegnazione è di tipo multiclasse con congestione indifferenziata;
- il coefficiente di occupazione medio per il sistema di trasporto privato è costante per tutte le categorie di utenti;
- non è presente alcun vincolo di capacità sui tre sistemi.

Con le suddette ipotesi, i flussi possono essere ottenuti mediante l'interazione di due tipologie di modelli: un modello di offerta, che simula le prestazioni dei sistemi di trasporto dipendenti dai flussi veicolari, ed un modello di domanda, che descrive le scelte degli utenti influenzate dalle prestazioni dei tre sistemi di trasporto.

Il problema, pertanto, consiste nel definire un insieme di flussi (per ciascun sistema di trasporto e per ciascuna categoria di utente) che generi delle prestazioni (costi) dei sistemi tali che le scelte degli utenti siano coerenti con l'insieme di flussi ipotizzati.

Con ipotesi del tutto generali, e quasi sempre soddisfatte dai modelli proposti in letteratura, è possibile dimostrare l'esistenza e l'unicità della soluzione di equilibrio, ossia dell'insieme dei flussi congruenti con i costi da essi prodotti.

In base alle ipotesi proposte è possibile decomporre il problema in tre sottoproblemi: un problema di punto fisso a domanda elastica relativo al sistema di trasporto individuale, un carico stocastico della rete relativo al sistema di trasporto collettivo (usualmente assunto non congestionato, cioè con prestazioni indipendenti dai flussi di utenti del sistema), ed un problema di punto fisso a domanda rigida per il sistema di trasporto merci (ipotizzando che la quantità di merci da trasportare non sia influenzata dalle prestazioni della rete). La risoluzione di tale modello di assegnazione multimodale richiede la risoluzione congiunta di due problemi di punto fisso (relativi ai sistemi di trasporto individuale e merci) e, successivamente, il carico della rete di trasporto collettivo.

## 3. Algoritmi risolutivi e prime applicazioni numeriche

Per risolvere il problema di punto fisso prima descritto, sono stati sviluppati alcuni algoritmi che seguono i tre classici approcci proposti in letteratura per la risoluzione di problemi di assegnazione a domanda elastica (approccio esterno, approccio interno ed approccio ad iperrete).

La convergenza degli algoritmi con approccio interno è stata dimostrata con ipotesi abbastanza generali (Cantarella, 1997; Cascetta, 2001). Analogamente Sheffi (1985) e Cascetta (2001) hanno mostrato come gli approcci ad iperrete siano dal punto di vista teorico equivalenti a quelli ad approccio interno, e, pertanto, come le ipotesi di Cantarella (1997) e Cascetta (2001) consentano di dimostrare la convergenza anche per quest'altra categoria di algoritmi. Al contrario, la convergenza degli algoritmi con approccio esterno non è stata dimostrata in letteratura. In ogni caso, se è possibile dimostrare l'esistenza e l'unicità della soluzione del problema e un algoritmo con approccio esterno converge, esso convergerà proprio alla soluzione di equilibrio.

Gli algoritmi con approccio esterno si basano sull'applicazione iterativa di algoritmi di assegnazione a domanda rigida e di modelli di domanda. In particolare, ogni volta che i modelli di assegnazione giungono a convergenza, si aggiornano le matrici origine-destinazione utilizzando i modelli di domanda. Gli algoritmi con approccio esterno si arrestano quando tra due iterazioni successive le variazioni percentuali dei flussi di arco e dei flussi origine-destinazione sono al di sotto di una soglia prefissata.

Gli algoritmi con approccio interno hanno una struttura analoga agli algoritmi di assegnazione a domanda rigida, ma aggiornano ad ogni iterazione (ossia in corrispondenza di ogni carico della rete) le matrici origine-destinazione utilizzando i modelli di domanda. L'algoritmo si arresta quando tra due iterazioni successive le variazioni percentuali dei flussi di arco sono al di sotto di una certa soglia prefissata.

Infine, gli algoritmi con approccio ad iperrete sono basati sulla costruzione di un particolare modello di rete, detto iperrete, che simula implicitamente (su rete) l'elasticità della domanda di trasporto, mediante l'introduzione di archi fittizi e di opportune funzioni di costo. In questo caso, l'utilizzo di un algoritmo di assegnazione a domanda rigida su di un'iperrete equivale all'implementazione di un algoritmo di assegnazione a domanda elastica. In particolare, il modello di iperrete utilizzato nel presente lavoro, riportato fig. 1, rappresenta un'estensione di quello proposto da D'Acerno *et al.* (2006).

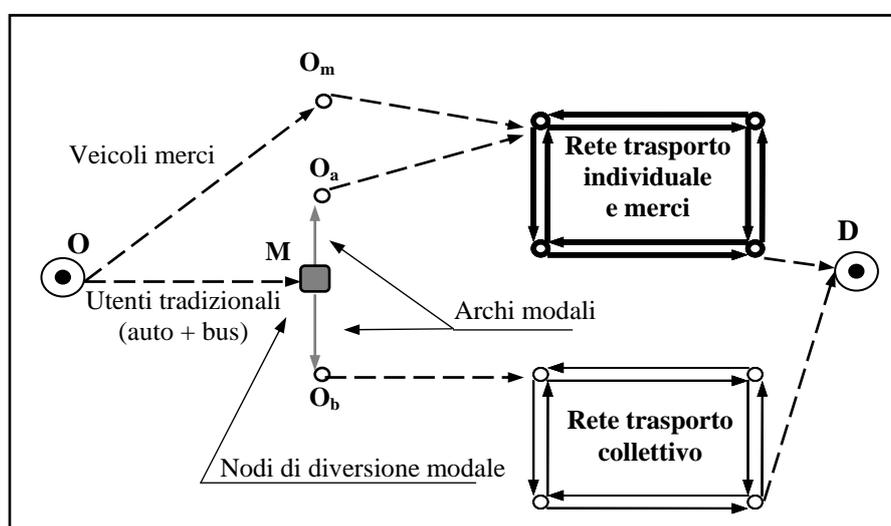


Figura 1: Modello di iperrete proposto

Gli algoritmi proposti hanno una struttura base di tipo MSA-FA (*Method of Successive Averages – Flow Averages*), mediando i risultati di un'iterazione, in termini di flussi, con i risultati di tutte le iterazioni precedenti. Ad ogni iterazione è necessario effettuare una procedura di carico della rete; a tal fine si è adoperato l'algoritmo proposto da Dial (1971) per i sistemi di trasporto individuale e merci, mentre per il sistema di trasporto collettivo si è utilizzato l'algoritmo proposto da Nguyen *et al.* (1998) che consente, tra l'altro, di simulare il comportamento preventivo/adattivo dell'utente. E' da rilevare che entrambi gli algoritmi adottati consentono la generazione implicita dei percorsi



(requisito fondamentale per gestire reti di dimensioni reali) ed il calcolo immediato della variabile di soddisfazione, il cui valore è necessario per poter operare in regime di domanda elastica.

L'applicazione su una rete di dimensioni reali ha mostrato come gli algoritmi ad approccio interno siano nettamente più efficienti rispetto a quelli ad approccio esterno, che hanno bisogno di tempi di calcolo fino a 3 volte maggiori; invece, l'approccio ad iperrete ha fornito risultati praticamente equivalenti all'algoritmo ad approccio interno, anche se con tempi di elaborazione leggermente superiori, conseguenti alla maggiore dimensione delle reti da gestire.

I primi risultati hanno mostrato come tutti gli algoritmi proposti convergano alla stessa soluzione, per quanto dal punto di vista teorico l'unicità della soluzione non sia dimostrabile, consentendo di ritenere affidabili i risultati ottenuti dalle simulazioni.

Da una prima analisi dei risultati è, inoltre, emerso che trascurare di simulare le scelte del percorso dei veicoli commerciali può condurre ad errori di stima dei flussi fino al 60% su alcuni archi; infine, trascurare la presenza di autoveicoli ed autobus nella fase di pianificazione dei percorsi del trasporto merci può condurre a variazioni dei flussi di traffico anche di quasi il 170%.

#### **4. Conclusioni e prospettive di ricerca**

Il modello di assegnazione multimodale proposto consente di simulare i sistemi di trasporto in ambito urbano considerando gli effetti prodotti sia dalle autovetture che dai veicoli commerciali sulla congestione.

Sebbene non sia stato possibile dimostrare la convergenza teorica, gli algoritmi sviluppati convergono alla stessa soluzione in tempi ragionevoli. Inoltre, i confronti tra i differenti approcci hanno mostrato che, almeno nel caso della rete esaminata, gli algoritmi ad approccio interno sono più efficienti in termini di tempi di elaborazione.

Le prospettive di ricerca saranno indirizzate all'utilizzo del modello proposto come strumento di simulazione nei problemi di progetto di reti urbane, considerando tutte le componenti della mobilità che hanno effetto sulla congestione stradale.

#### **Bibliografia**

- Cantarella G.E. (1997), A general fixed-point approach to multimode multi-user equilibrium assignment with elastic demand, *Transportation Science*, 31: 107-128.
- Cascetta E. (2001), *Transportation systems engineering: Theory and methods*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- D'Acerno L., Gallo M., Montella B. (2006), A hyper-network model for simulating park-and-ride trips, *Proc. of the 11th Meeting of the Euro Working Group on Transportation "Advances in Traffic and Transportation Systems Analysis"*, Bari, Italy, pp. 125-129.
- D'Acerno L., Montella B., Gallo M. (2002), Multimodal assignment to congested networks: fixed-point models and algorithms. *Proc. of the European Transport Conference 2002*, Cambridge, United Kingdom.
- Dial R.B. (1971), A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration, *Transportation Research*, 5: 83-111.
- Nguyen S., Pallottino S., Gendreau M. (1998), Implicit enumeration of hyperpaths in a logit model for transit networks, *Transportation Science*, 32: 54-64.
- Oppenheim N. (1995), *Urban travel demand modeling*, Wiley Interscience, New York (NY), USA.
- Sheffi Y. (1985), *Urban transportation networks*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (NJ), USA.