

X. Analisi comparativa dei consumi energetici e delle emissioni inquinanti di tipologie alternative di trasporto pubblico su strada

di Marco Diana*, Cristina Pronello*, Luca Quadrifoglio**

1. Introduzione e definizione del problema

Lo sviluppo del trasporto pubblico è considerato come uno dei principali strumenti di una politica volta ad un uso più efficiente e razionale delle fonti energetiche ed alla riduzione delle emissioni nocive. Al fine di raggiungere pienamente tali obiettivi, negli ultimi anni si sono fatti notevoli sforzi, anche in termini di mobilitazione di ingenti risorse finanziarie, per realizzare servizi di trasporto pubblico più efficienti sotto il profilo ambientale. Le azioni intraprese consistono in genere nell'adozione delle opzioni tecnologiche a livello del singolo veicolo ritenute più promettenti ai fini della minimizzazione di consumi energetici ed emissioni (ad esempio servizi in sede propria con trazione elettrica, o autobus con alimentazione a metano o ibrida).

Il presente studio, che nasce dalla collaborazione fra uno dei più dinamici centri di ricerca statunitensi sui servizi di trasporto innovativi e il gruppo di ricerca in Ingegneria dei Trasporti del Politecnico di Torino, intende sviluppare un approccio complementare al problema della minimizzazione dei consumi e delle emissioni indotti dall'effettuazione di servizi di trasporto pubblico. L'idea è di analizzare l'effetto dovuto all'organizzazione del servizio, a parità di caratteristiche dei mezzi e di infrastruttura considerati. Nel presente lavoro, come verrà meglio specificato in seguito, le tipologie organizzative considerate sono i servizi di linea tradizionali, con orari e percorsi prefissati, e i servizi a chiamata (detti anche taxi collettivi), in cui i movimenti dei mezzi sono programmati sulla base delle richieste di servizio che pervengono alla centrale.

L'interesse di tale approccio risiede nella possibilità di ottimizzare un servizio di trasporto pubblico sotto il profilo ambientale agendo sulla sua

* Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino

** Department of Industrial and Systems Engineering, University of Southern California

forma organizzativa, con interventi che richiedono generalmente minori investimenti rispetto ad un ricambio più completo della flotta veicolare. La più o meno recente diffusione di servizi a chiamata, prevalentemente su scala medio-piccola, in aree o fasce orarie a domanda debole, viene generalmente motivata in base a considerazioni di carattere sociale o economico, quali la sostituzione di servizi di linea scarsamente frequentati o espansione dell'offerta di trasporto pubblico al di là dei limiti propri dei servizi di linea tradizionali. Si pone quindi il problema della verifica della coerenza di tali iniziative rispetto agli obiettivi di ordine ambientale, legati in primo luogo al miglioramento della qualità dell'aria nelle aree urbane. Tale verifica può essere correttamente condotta solo attraverso una serie di analisi, volte ad esempio a chiarire il rapporto fra forma organizzativa dell'offerta di trasporto pubblico e comportamento della domanda, o gli effetti di sostituzione e di complementarità fra nuovi servizi a chiamata e modi di trasporto individuali motorizzati e non.

Da quanto detto nel paragrafo precedente, risulta agevole notare che l'ambito di ricerca inerente la valutazione sotto il profilo ambientale dell'introduzione di sistemi a chiamata è piuttosto vasto e in gran parte inesplorato, anche se è possibile attingere a non pochi risultati di precedenti studi, ad esempio nel campo delle teorie comportamentali applicate in ambito trasportistico. Rispetto alle analisi menzionate nel paragrafo precedente, il lavoro in seguito descritto vuole costituire un primo passo, attraverso lo sviluppo di una comparazione dei consumi energetici e delle emissioni inquinanti delle due forme di trasporto pubblico considerate, quando servono la stessa domanda. Nel seguito pertanto si ipotizzerà una domanda del servizio costante, non dipendente dalla tipologia di offerta.

La presente memoria si colloca nell'ambito di una serie di lavori, in parte già compiuti e in parte in via di completamento, che i due gruppi di ricerca a cui afferiscono gli autori stanno sviluppando già da alcuni anni in tema di analisi delle prestazioni ambientali dei servizi di trasporto pubblico innovativi. Dessouky et al. (2003) analizzano come sia possibile tenere in conto gli impatti ambientali nei processi decisionali che riguardano la gestione di flotte di veicoli, con particolare riferimento ai servizi a chiamata. D'altra parte, Diana (2003) ha sviluppato uno studio preliminare per capire come il livello di emissione di sostanze inquinanti cambierebbe se l'attuale servizio serale di autobus nella città di Torino venisse parzialmente sostituito da un servizio a chiamata. Tuttavia la metodologia ivi seguita non consente un'agevole generalizzazione ed estensione dei risultati ottenuti, il che ha rappresentato lo stimolo per una più generale disamina del problema attraverso un piano sperimentale che tiene conto di diversi fattori, quali la densità di domanda, il tipo di veicolo utilizzato, il livello di servizio e la struttura della rete urbana

(Diana e Pronello, 2004). Gli approfondimenti metodologici che sono alla base dell'applicazione in seguito descritta sono riportati in Quadrifoglio e Dessouky (2004) e in Diana et al. (2006). Ulteriori contributi metodologici in merito alla comparazione fra sistemi di trasporto pubblico su linea fissa e sistemi a chiamata, anche se su un piano prevalentemente economico, sono ad esempio sviluppati da Daganzo (1984) e da Aldaihani et al. (2004), mentre Chang e Yu (1996) offrono una panoramica dello stato dell'arte sull'argomento.

2. Le tipologie di servizio considerate

Nel seguito si svilupperà il caso più semplice, considerando un'area urbana quadrata di lato pari a 5 km in cui la rete stradale è a maglia quadrata, con distanza fra due strade adiacenti pari a 0,5 km. In tutto si avranno pertanto 20 strade, per complessivi 100 incroci o nodi. Le strade più esterne distano 0,25 km dal bordo dell'area. La domanda di trasporto pubblico nell'area è uniformemente distribuita: le coordinate cartesiane dei punti di origine e di destinazione dei viaggi sono dei campioni estratti da distribuzioni uniformi nell'intervallo [0, 5]. Si ipotizza pertanto che i punti di origine e di destinazione di un viaggio siano statisticamente indipendenti. Inoltre, si ipotizza che il processo di generazione della domanda sia poissoniano, con un numero medio di richieste di servizio nell'unità di tempo pari a λ . Questa configurazione dell'area di servizio e della funzione di domanda è quella maggiormente studiata in letteratura, in quanto può servire da base per studi maggiormente applicativi in cui è possibile suddividere l'area di studio in diverse regioni, per ciascuna delle quali la domanda può essere considerata costante e la rete stradale quadrangolare.

Le tipologie di servizio considerate sono due. Da un alto studieremo il caso di un servizio di trasporto pubblico effettuato con autobus che percorrono l'intera rete stradale. Supporremo pertanto l'esistenza di 20 linee, una per strada, aventi tutte la stessa lunghezza e tempo ciclo. Data l'uniformità della domanda, tutte le linee hanno inoltre la stessa frequenza di passaggi. Le fermate coincidono con i nodi della rete stradale, che pertanto costituiscono anche i punti di interscambio fra due diverse linee fra loro ortogonali. I punti di origine e di destinazione, generati secondo quanto detto nel paragrafo precedente, vengono assegnati alla fermata più vicina che verrà pertanto utilizzata dagli utenti corrispondenti. In base alla geometria dell'area di studio e della rete stradale, ne consegue che tutte le fermate hanno la stessa area di competenza, e pertanto hanno anche la stessa probabilità di essere un punto di accesso o di egresso al servizio.

La tipologia di servizio alternativa che consideriamo per servire la stessa domanda nella stessa area è un servizio a chiamata, in cui gli utenti devono prenotare il viaggio comunicando il punto di origine e di destinazione e l'ora di partenza desiderata. Per facilitare il confronto fra i due servizi, i punti di origine e di destinazione coincidono con le fermate delle linee di autobus, ossia con i nodi della rete. Il servizio è di tipo many-to-many (Jaw et al., 1986), ossia l'utente può richiedere di essere trasportato fra qualunque coppia di nodi della rete, e la sua richiesta verrà soddisfatta senza necessità di trasbordi. La flotta di veicoli quindi si muove senza percorsi od orari prefissati: questi vengono calcolati di volta in volta sulla base delle richieste di servizio pervenute.

L'operatore raccoglie le richieste di servizio e fissa (o negozia) il tempo massimo di permanenza a bordo del mezzo e l'attesa massima del mezzo alla fermata w , rispetto all'orario desiderato dall'utente. Il tempo massimo di permanenza a bordo rappresenta il limite superiore delle deviazioni che l'utente dovrà subire mentre è a bordo, rispetto al cammino minimo fra la propria origine e la propria destinazione, per consentire al veicolo di servire più di una richiesta contemporaneamente. Seguendo una prassi consolidata nell'ambito della modellizzazione dei sistemi di trasporto a chiamata, definiamo tale tempo massimo MT come una funzione lineare del tempo di percorrenza associato al cammino minimo fra origine e destinazione DT :

$$MT = a DT + b \quad (1)$$

Una volta fissati tali parametri di qualità, ossia i valori di a , b e w , l'operatore programma il servizio con l'uso di un software dedicato basato su algoritmi specialistici. Per condurre le simulazioni dei servizi a chiamata in seguito descritte, verrà usato l'algoritmo presentato in Diana e Dessouky (2004). I veicoli a chiamata possono fermarsi in qualunque punto della rete per aspettare richieste da servire, a condizione di non avere già utenti a bordo. La velocità commerciale v dei veicoli di linea e di quelli a chiamata è costante e uguale nei due casi, e si suppone inoltre che entrambi i servizi vengano effettuati con gli stessi mezzi su cui possono trovare posto 20 persone al massimo, anche se questo non corrisponde alla pratica operativa dove in genere la capacità dei veicoli a chiamata è inferiore e quella degli autobus di linea superiore. In questo modo però saremo in grado di isolare meglio l'effetto della forma organizzativa di trasporto pubblico sui consumi e sulle emissioni, indipendentemente dall'influenza di altri fattori.

3. Comparazione della qualità del servizio di linea e a chiamata e

definizione del piano sperimentale

Da quanto detto nel paragrafo precedente si deduce che il tempo di viaggio, ossia la qualità del servizio, è influenzata dal distanziamento spaziale dei veicoli h nel caso del servizio di linea, e dal valore delle costanti a e b e dell'ampiezza della finestra temporale w nel caso del sistema a chiamata. Al fine di condurre correttamente il paragone, occorre trovare una metodologia per fissare questi quattro parametri in modo tale che la qualità del servizio offerta sia simile nei due casi. Nel seguito supporremo che la qualità del servizio sia esclusivamente funzione del tempo di attesa del veicolo alla fermata, del tempo di viaggio addizionale rispetto al tempo di viaggio minimo fra origine e destinazione e dell'eventuale trasferta da una linea all'altra di autobus. Trascureremo pertanto altri fattori che potrebbero influenzare la percezione della qualità da parte degli utenti, quali le preferenze personali per uno o l'altro tipo di servizio. Per brevità, la metodologia utilizzata viene solo richiamata per sommi capi: per i necessari approfondimenti e giustificazioni a livello teorico, inclusa una discussione rispetto allo stato dell'arte della ricerca sull'argomento, si rimanda a Diana et al. (2006).

L'idea fondamentale consiste nel definire un tempo di viaggio virtuale T_v :

$$T_v = DT + p_1 (RT - DT) + p_2 WT + \Delta T x \quad (2)$$

dove DT è il tempo di viaggio per andare dal nodo origine al nodo destinazione seguendo il percorso più breve, RT è il tempo di permanenza a bordo del mezzo (o dei mezzi in caso di trasferta) e WT è il tempo di attesa alla fermata (o alle fermate in caso di trasferta). È noto che gli utenti valutano soggettivamente in modo diverso il tempo trascorso in ognuna di queste "attività", per cui si sono introdotti i pesi p_1 e p_2 che permettono di trasformare rispettivamente i tempi passati a bordo del mezzo durante l'effettuazione di deviazioni dal percorso minimo e i tempi di attesa alle fermate in tempi equivalenti di viaggio diretto, maggiormente gratificanti dal punto di vista psicologico (per cui p_1 e p_2 sono maggiori di 1). Infine, si è assegnata una penalità ulteriore nel caso in cui si effettui un trasbordo, espressa attraverso il termine ΔT . La variabile dummy x vale 1 se l'utente deve cambiare mezzo e 0 altrimenti.

Numerosi studi hanno avuto per oggetto la stima di p_2 e di ΔT (fra i più recenti ricordiamo Wardman, 2004 e Guo e Wilson, 2004), mentre non pare che ci siano risultati pubblicati per quanto riguarda p_1 , anche in considerazione del fatto che si tratta di una problematica di specifico interesse nel caso di servizi a chiamata. Sulla base dei risultati delle ricerche testé menzionate e di ulteriori considerazioni che qui ometteremo, nel presente

studio abbiamo fissato $p_1 = 1,5$; $p_2 = 1,8$ e $\Delta T = 10$ minuti.

Il passo successivo consiste nell'esprimere le componenti di T_v in funzione dei parametri di qualità h , a , b e w precedentemente introdotti. In particolare, per il servizio di linea testé definito è possibile ricavare quanto segue, indicando con $E(WT)$ e $VAR(WT)$ rispettivamente la media e la varianza di WT :

- $DT = RT$
- $x = 0$ per circa il 18% degli utenti
- $E(WT) \approx 0,18 \cdot h/2 + 0,82 \cdot (h/3 + h/2) \approx 0,77 h$
- $VAR(WT) \approx 0,14 h^2$.

Per il servizio a chiamata invece le distribuzioni di RT e di WT dipendono dall'algoritmo di programmazione dei viaggi che viene utilizzato, mentre i valori massimi sono definiti in base ai parametri di qualità menzionati:

- $\max(RT) = MT = a DT + b$
- $\max(WT) = w$
- $x = 0$ per tutti gli utenti.

In definitiva, si è scelto di porre l'ampiezza della finestra temporale w pari al massimo tempo di attesa alle fermate del servizio di linea, che vale $2h$. Inoltre, poiché per il servizio di linea nell'area considerata il tempo a bordo del mezzo è pari al tempo di viaggio minimo ($DT = RT$), ma d'altra parte la maggior parte degli utenti deve trasbordare, si è cercato di tenere conto della concomitanza di questi due fattori fissando $a = 1$ e $b = \Delta T = 10$ minuti.

A questo punto, per poter affermare che il servizio di linea e quello a chiamata sono di qualità equivalente occorre verificare che le distribuzioni risultanti dei rispettivi tempi di viaggio virtuali siano il più possibile simili per le combinazioni di livelli di fattori considerate nel piano sperimentale. Indichiamo per comodità i tempi di viaggio virtuali per il servizio di linea e quelli per il servizio a chiamata con $T_{v,l}$ e $T_{v,c}$ rispettivamente. Nel seguito considereremo 4 scenari, fissando a due livelli (basso e alto) il tempo medio di attesa e la densità di domanda in termini di numero di richieste di servizio nell'unità di tempo λ . Gli scenari considerati e i corrispondenti valori della media e della varianza della distribuzione di T_v per gli utenti dei due sistemi, in base alle simulazioni effettuate, sono riportati nella tabella 1. Per ogni scenario si sono fatte due repliche degli esperimenti.

Tab. 1 – Definizione degli scenari e dei rispettivi tempi di viaggio virtuali T_v

Scenario	λ	h	w	$E(T_{v,l})$	$VAR(T_{v,l})$	$E(T_{v,c})$	$VAR(T_{v,c})$
----------	-----------	-----	-----	--------------	----------------	--------------	----------------

	(rich./min.)	(min.)	(min.)	(min.)	(min.) ²	(min.)	(min.) ²
1	2	6,75	13,5	27,6	95,3	23,9	83,0
2	2	27	54	55,9	473	62,0	767
3	50	6,75	13,5	27,6	95,3	23,6	79,9
4	50	27	24	55,9	473	56,0	646

Dai valori riportati in tabella si nota che gli scarti in termini di valori medi sono ragionevolmente contenuti, mentre i tempi di viaggio virtuali sono maggiormente dispersi nel caso di servizi a bassa qualità. Sulla base di questi risultati, pare comunque ragionevole considerare le prestazioni dei due sistemi approssimativamente equivalenti, all'interno di ciascuno degli scenari definiti.

4. Calcolo dei consumi e delle emissioni

Le emissioni di sostanze inquinanti sono state calcolate moltiplicando per ogni scenario le percorrenze complessive delle flotte dei due sistemi, così come risultano dalle simulazioni, per gli opportuni fattori di emissione, espressi come grammi di sostanza inquinante per chilometro percorso. I fattori di emissione sono stati determinati attraverso la metodologia standard europea, che si basa sul modello COPERT (European Commission, 1999). Le sostanze inquinanti considerate sono le seguenti: anidride carbonica (CO₂), monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili (VOC) e particolato (PM). Sono state calcolate solo le emissioni a caldo, evidentemente preponderanti per gli scenari in esame. Le masse di carburante consumate sono state calcolate in base alle masse di inquinanti emessi attraverso un'equazione chimica di bilanciamento del carbonio. Dai fattori di emissione espressi in grammi per chilometro è infine possibile ricavare le masse per ora di funzionamento del servizio, che vengono riportate nella tabella 2. Si riportano inoltre le differenze percentuali dei consumi del sistema a chiamata rispetto al sistema su linea fissa. Le differenze percentuali relative alle emissioni sono pressoché identiche, essendo anch'esse funzione delle percorrenze.

Tab. 2 – Consumi di carburante ed emissioni di sostanze inquinanti dei due sistemi

Scenario	Servizio	Consumi (kg/h)	CO ₂ (kg/h)	CO (g/h)	NO _x (g/h)	VOC (g/h)	PM (g/h)
1	Linea fissa	588	1823	10547	11770	2766	269
	A chiamata	136	422	2444	2727	641	62
	Differenza %	-77%					
2	Linea fissa	147	456	2637	2942	691	67
	A chiamata	81	251	1452	1620	381	37

	<i>Differenza %</i>	-45%					
3	Linea fissa	588	1823	10547	11770	2766	269
	A chiamata	1046	3239	18743	20915	4915	478
	<i>Differenza %</i>	+78%					
4	Linea fissa	147	456	2637	2942	691	67
	A chiamata	605	1876	10854	12112	2846	277
	<i>Differenza %</i>	+312%					

5. Commenti sui risultati e conclusioni

I risultati riportati nella tabella 2 mostrano chiaramente l'influenza della forma organizzativa di un servizio di trasporto pubblico sui consumi e sulle emissioni, a parità di domanda servita, di veicoli utilizzati e di qualità del servizio nei termini di tempo di viaggio virtuale precedentemente definiti. I servizi a chiamata risultano minimizzare consumi ed emissioni quando la densità di domanda è bassa, mentre sono chiaramente inefficienti in caso contrario. Considerando l'effetto congiunto di densità di domanda e di qualità del servizio in termini di tempi di attesa alle fermate, il sistema a chiamata risulta particolarmente poco indicato per alte densità e finestre temporali molto strette, mentre è molto efficiente quando occorre servire pochi utenti con un tempo di attesa contenuto.

A valle di tali risultati sperimentali, è attualmente in via di definizione un modello che permetta di trovare per quali combinazioni critiche di densità di domanda e di qualità del servizio cambia la convenienza nell'uso di un servizio di trasporto o dell'altro, sulla scia di quanto proposto da Diana e Pronello (2004). Tale risultato, se considerato insieme ad una metodologia che permetta di determinare il cambiamento nel comportamento della domanda al variare della forma organizzativa del servizio, potrebbe rappresentare un valido strumento di supporto alle decisioni per verificare la coerenza di progetti di modifica dell'assetto di sistemi di trasporto pubblico tradizionali o innovativi rispetto ad obiettivi legati al contenimento degli impatti ambientali.

Bibliografia

- Aldaihani, M.M., Quadrioglio, L., Dessouky, M.M., Hall, R.W. (2004), Network design for a grid hybrid transit service, *Transportation Research A*, vol. 38 (7), 511-530.
- Chang, S.K., Yu, W.-J. (1996), Comparison of subsidized fixed- and flexible-route bus systems, *Transportation Research Record 1557*, 15-20.
- Daganzo, C.F. (1984), Checkpoint dial-a-ride systems, *Transportation Research B*, vol. 18 (4-5), 318-327.
- Dessouky, M., Rahimi, M., Weidner, M. (2003), Jointly optimizing cost, service, and environ-

- mental performance in demand-responsive transit scheduling, *Transportation Research D*, vol. 8 (6), 433-465.
- Diana, M. (2003), Potential contributions of demand responsive transit services in reducing public transit pollutants emissions in metropolitan areas: an example for the city of Turin, *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Madrid, Spain, 8pp.
- Diana, M., Dessouky, M.M. (2004), A new regret insertion heuristic for solving large-scale dial-a-ride problems with time windows, *Transportation Research B*, vol. 38 (6), 539-557.
- Diana, M., Pronello, C. (2004), The impact of different organizational forms of road public transport on distance covered and atmospheric pollution, *Selected Proceedings of the 10th World Conference on Transport Research*, Istanbul, Turkey, 20pp.
- Diana, M., Quadrioglio, L., Pronello, C. (2006), A methodology for comparing vehicles runs and emissions of quality-equivalent fixed-line and demand-responsive transit services. Articolo sottoposto per la pubblicazione.
- European Commission (1999), *Meet – Methodology for calculating transport emissions and energy consumption*, Luxembourg, ISBN 92-828-6785-4.
- Guo, Z., Wilson, N.H.M. (2004), Assessment of the transfer penalty for transit trips, *Transportation Research Record* 1872, 10-18.
- Jaw, J.J., Odoni, A.R., Psaraftis, H.N., Wilson, N.H.M. (1986), A heuristic algorithm for the multi-vehicle many-to-many advance request dial-a-ride problem, *Transportation Research B*, vol. 20 (3), 243-257.
- Quadrioglio, L., Dessouky, M.M. (2004), Mobility Allowance Shuttle Transit (MAST) services: formulation and simulation comparison with conventional fixed route bus services, *4th IASTED International Conference on Modeling, Simulation and Optimization (MSO)*, Kauai, HI, 6pp.
- Wardman, M. (2004), Public transport values of time, *Transport Policy*, vol. 11 (4), 363-377.

Sommario

Lo sviluppo di servizi di trasporto pubblici su strada che minimizzino consumi ed emissioni di sostanze inquinanti ha un ruolo chiave nel miglioramento della qualità dell'aria nelle aree urbane. Notevoli risorse finanziarie sono quindi stanziare per porre in essere opzioni tecnologiche maggiormente efficienti sotto il profilo ambientale, come l'acquisto di autobus con sistemi propulsivi innovativi. In questo studio viene valutata la possibilità alternativa di migliorare le prestazioni ambientali dei sistemi di trasporto pubblico cambiando la forma organizzativa del servizio. Si considerano un servizio di linea tradizionale e un servizio a chiamata, e si determina quale sistema minimizza i consumi e le emissioni per una serie di scenari che vengono definiti sulla base della densità di domanda e della qualità del servizio. Ipotizzando che il comportamento della domanda non cambi nel passare da un sistema all'altro, i risultati dello studio indicano che l'uso di un sistema a chiamata può diminuire drasticamente consumi ed emissioni quando la domanda nell'area di studio è bassa, ma nel contempo i tempi di attesa alle fermate devono rimanere contenuti.

Abstract

The operation of road public transport services that minimize fuel consumption pollutants emissions plays a key role in improving air quality in urban areas. Considerable financial re-

sources are thus employed to implement environmentally-friendly technology options such as buying buses with innovative propulsive systems. As an alternative, in this paper we assess the possibility of improving the environmental performances of a public transport system by changing the organizational form of the service. We consider a traditional bus service and a demand responsive service, and we identify which system minimizes fuel consumptions and emissions for a set of scenarios that are defined on the basis of the demand density and service quality. Under the demand invariance hypothesis, results indicate that the use of a demand responsive system can drastically lower consumptions and emissions when the service demand is weak and waiting times must be kept reasonable.

Author's Personal Copy
DO NOT Distribute or Reproduce