

Un'analisi dei tram di Torino: effetti della priorità semaforica ed ITS sui consumi energetici

Original

Un'analisi dei tram di Torino: effetti della priorità semaforica ed ITS sui consumi energetici / Berger, M., Bottero, M., Bono, M., Cassinelli, P., DALLA CHIARA, B., Deflorio, F.P.. - In: TP: TRASPORTI PUBBLICI. - STAMPA. - XXX:11-12(2014), pp. 31-37.

Availability:

This version is available at: 11583/2668392 since: 2017-04-04T12:04:48Z

Publisher:

ASSTRA

Published

DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

UN ANALISI DEI TRAM DI TORINO

Effetti della priorità semaforica ed ITS sui consumi energetici

Nello studio condotto si sono raccolti ed elaborati dati relativi alla cinematica e ai consumi energetici di un campione dei tram attualmente in servizio sulla linea 4 di Torino, al fine di stimare il beneficio energetico atteso dalla priorità semaforica.

Introduzione

Ridurre la dipendenza quasi-monopolistica da petrolio nei trasporti, con le conseguenti emissioni, e migliorarne l'efficienza energetica sono oggi un obiettivo prioritario dell'Unione Europea (UE). L'UE, alla fine del 2006, si è impegnata a ridurre del 20% il consumo annuo di energia primaria da fonti non rinnovabili entro il 2020. Più recenti linee guida per un sistema di trasporto europeo sostenibile sono state definite dalla Commissione Europea nel Piano di Azione per la Mobilità Urbana (2009), nel Libro Bianco sui Trasporti (marzo 2011) nonché, a livello attuativo, nella più recente direttiva sulla realizzazione di un'infrastruttura per i combustibili alternativi (direttiva europea 22/10/2014 n. 2014/94/UE).

Il traffico urbano nelle città di medie o grandi dimensioni è caratterizzato dalla presenza di molte intersezioni, spesso a raso e gestite da impianti semaforici.

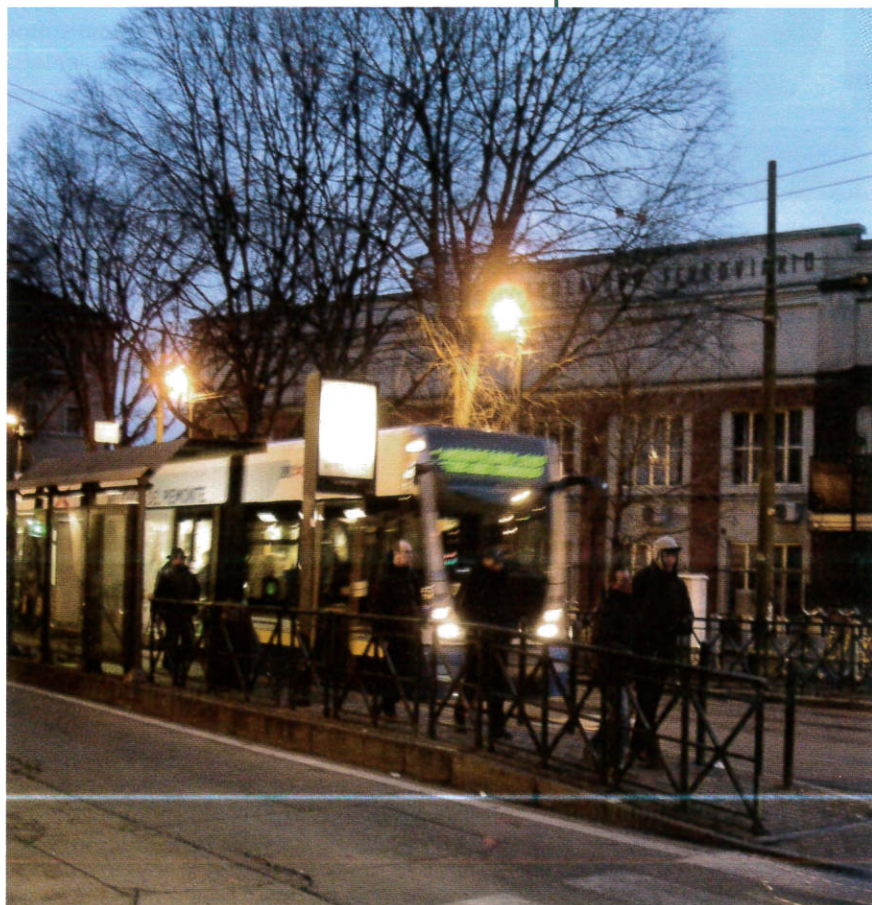
I recenti sistemi di controllo e gestione del traffico regolano la circolazione stradale, grazie a logiche di controllo più o meno complesse, che in alcuni casi possono contemplare strategie mirate a favorire le prestazioni del trasporto pubblico. I sistemi UTC – *Urban Traffic Control* – si sono rivelati negli anni come strumento molto utile per gestire anche tali aspetti, considerando fra gli obiettivi possibili la riduzione dell'impatto ambientale.

Tali sistemi nascono per coordinare tra loro intersezioni adiacenti agendo direttamente sulla gestione dei segnali semaforici, al fine di rendere il traffico fluido, ridurre i ritardi in coda e conseguentemente le emissioni nocive [1].

Sistema di Controllo Adattativo del Traffico Urbano e supervisore

Nel caso in esame, il sistema di Controllo Adattativo del Traffico Urbano in uso nella città di Torino effettua il controllo sostanzialmente continuo (aggiornato ogni 3") del traffico privato in tutte le fasce orarie, provvedendo ad assegnare la priorità semaforica ai mezzi pubblici, su alcune linee preselezionate. Il sistema gestisce (2014/2015) circa 330 incroci, su un totale di circa 600 incroci semaforizzati della città [2, 3]. Il Controllo del Traffico Urbano è basato sul sistema UTOPIA (*Urban Traffic OPTimisation by Integrated Automation*): un sistema di controllo semaforico adattativo in grado di deter-

di Mario Berger*
 Marco Bottero*
 Marco Bono**
 Paolo Cassinelli**
 Bruno Dalla Chiara*
 Francesco Deflorio*





minare ed attuare strategie ottimali di gestione degli impianti semaforici, sulla base di informazioni provenienti da sensori. Tutti i parametri della regolazione (ciclo, durata delle fasi e *off-set*) sono gestiti dal sistema UTC con l'obiettivo di migliorare le condizioni globali del traffico urbano, minimizzando il tempo totale di viaggio del traffico privato e privilegiando al contempo i mezzi pubblici [2].

Il sistema consente di monitorare lo stato del traffico nella rete viaria controllata rilevando in tempo reale eventuali anomalie di flusso e registrando diverse tipologie di dati statistici. Il sistema può assegnare una priorità ponderata, selettiva o assoluta per determinate classi di veicoli – come autobus o tram – senza però penalizzare significativamente gli altri utenti o non penalizzandoli su una scala temporale più estesa rispetto a quella della variazione transitoria imposta. Se utilizzato con una priorità totalmente adattativa, il sistema monitora e prevede continuamente le condizioni di traffico per ottimizzare la strategia di controllo.

Il sistema si sviluppa su due differenti livelli: nel livello superiore – anche detto livello di area – le funzioni di previsione e controllo a medio e lungo termine sono affidate a un sottosistema centrale. Per il livello inferiore – relativo al singolo incrocio – il sistema opera con una rete di Unità Multifunzionali (MFO), dotate delle funzioni di Controllori Locali (SPOT), interconnesse tra loro. I Controllori Locali sono

installati ad ogni singolo incrocio e determinano la durata ottimale delle fasi semaforiche, utilizzando come dati di input le misure di traffico rilevate (ad esempio con i numerosi sensori di traffico distribuiti in città) e le informazioni rilevate dagli SPOT negli incroci adiacenti. Il piano semaforico variabile è di tipo adattativo e viene generato in tempo reale in base ai dati rilevati nei singoli incroci. La durata delle fasi viene modificata in base alle condizioni di flusso in modo da garantire un maggior tempo di verde alle manovre a maggiore flusso veicolare (Figura 1).

I dati dei flussi veicolari sono rilevati generalmente con l'utilizzo di spire induttive inserite nel manto stradale. Le spire registrano il numero di veicoli in ingresso ed in uscita dall'intersezione comunicando i dati allo SPOT. Nel caso di intersezioni centralizzate in rapida successione i dati delle spire in uscita dall'intersezione a monte rappresentano i dati in ingresso per l'intersezione a valle.

Scenario analizzato: analisi dei dati per il consumo statico e la priorità semaforica ai tram

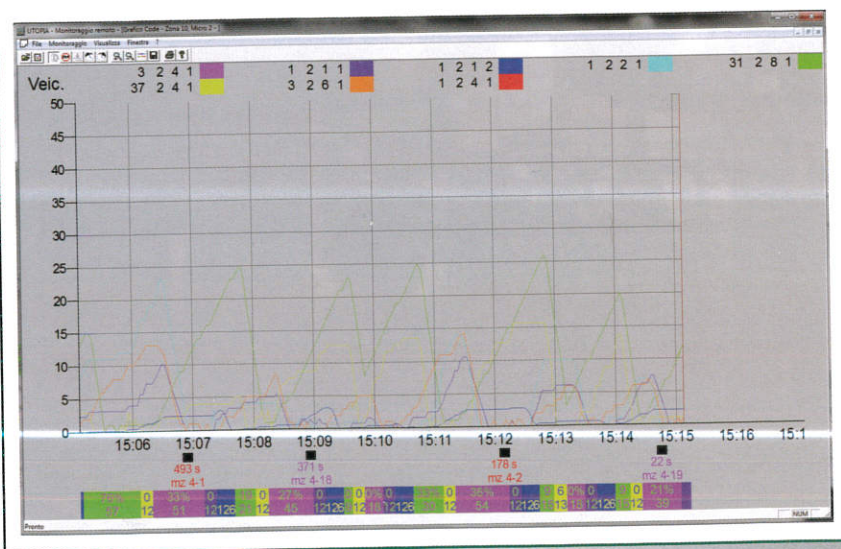
Le prestazioni del sistema di Controllo Adattativo del Traffico Urbano sono state analizzate nel periodo gennaio-marzo 2007 con uno studio realizzato da 5T (la società che gestisce, per conto del Comune di Torino e di GTT, il Controllo del Traffico Urbano) con la collaborazione di GTT. L'analisi ha confermato una significativa riduzione dei tempi medi di attesa su ciascuna delle 26 intersezioni coinvolte. La riduzione media dei tempi di attesa per tram è stata calcolata pari a circa il 33% per intersezione.

La priorità semaforica ai tram ha permesso di ridurre il tempo ciclo, per effetto dell'incremento della velocità media di viaggio, quindi il numero di vetture per coprire il servizio sulla linea 4 di 2 unità, con i conseguenti risparmi in termini di costi del materiale rotabile.

Attualmente nella città di Torino la priorità semaforica assoluta è attiva sulle linee di trasporto pubblico tramviarie 3, 4, 9 e 10 (Figura 1).

In questo studio si è voluta valutare l'influenza del sistema di priorità sul consumo energetico del tram. Per analizzare l'influenza del sistema UTC adattativo sui consumi del tram, oltre alle sue caratteristiche tecniche [3], è necessaria la raccolta di alcuni dati sui parametri cinematici ed energetici del mezzo durante il moto. È stato innanzitutto suddiviso il consumo del tram in

Fig. 1 - Monitoraggio remoto con la visualizzazione degli istanti di passaggio dei tram su un incrocio controllato (fonte: sistema UTOPIA in 5T)



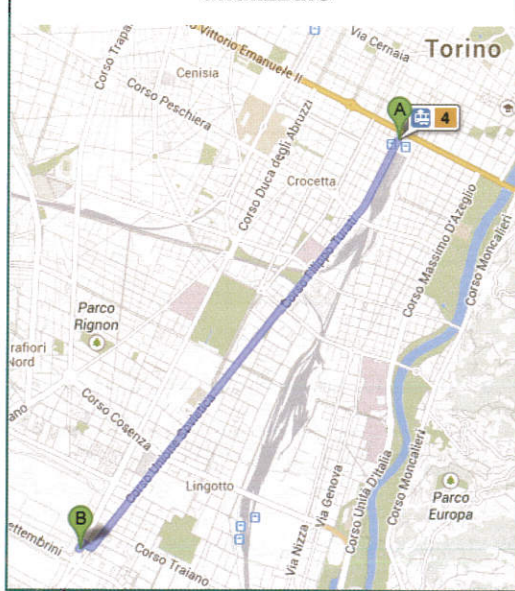
tre componenti: quello necessario per la trazione (indipendente dalla velocità), quello dovuto alla resistenza all'aria (dipendente dalla velocità) ed il consumo derivante dall'utilizzo dei dispositivi di bordo. Si è scelto di studiare in maniera separata le tre componenti sia per ottenere un risultato più preciso sia per riuscire ad identificare accorgimenti mirati utili a ridurre il consumo e migliorare di conseguenza l'efficienza energetica.

Il tratto della Linea 4 sul quale sono stati acquisiti i dati è quello compreso tra le fermate presso la stazione ferroviaria centrale di Porta Nuova (via Sacchi, Figura 2 e Figura 3) e piazza Caio Mario.

Tale porzione, che si estende per circa 5,5 km, è interessata da 15 fermate intermedie, tutte comprese tra una lunghezza minima di 250 metri e massima di 450 metri. Su 22 incroci semaforizzati, 19 sono controllati da un UTC di tipo adattivo [4, 5]. Fin dai primi test sono emersi alcuni problemi sulla elevata quantità di dati da elaborare. Dopo aver effettuato alcune prove sull'intera tratta, si è focalizzato lo studio su un singolo tratto, selezionato tra due fermate con caratteristiche tipiche di una rete tramviaria urbana. I dati raccolti sull'intera tratta si sono rivelati in ogni caso utili per valutazioni generali sullo *stile di guida* del conducente che, com'è emerso, ha una notevole influenza sul consumo del tram. Il consumo necessario alla *trazione* e alla *resistenza all'aria* sono stati valutati mediante l'integrazione tabellare sulla base dei dati effettivi raccolti (geo-localizzazione ed accelerometrici con alta accuratezza). I dati del veicolo necessari sono stati ricavati direttamente sulla scheda tecnica del tram. In particolare sono necessari valori relativi alla massa e all'aerodinamicità del mezzo (coefficiente aerodinamico) insieme alla curva caratteristica di trazione del motore.

Il *consumo statico* è causato dal prelievo di energia necessario per il corretto funzionamento dei dispositivi di bordo, quali luci, riscaldamento, condizionamento, sistemi di informazione per il conducente ed i passeggeri ed alcuni altri. Grazie alla collaborazione con GTT, sono state effettuate alcune misure sul consumo statico presso il deposito di Torino in via Manin 17 con lo scopo di valutare il reale consumo statico in situazioni ordinarie. I test hanno riportato una potenza assorbita di circa 38 kW, valutato come *media tra il caso in cui sia in funzione l'aria condizionata e il caso in cui sia utilizzato il riscaldamento*

Fig. 2 - Tratto della linea tranviaria analizzato



sulla base di un ora di rilievi e quindi pari ad un consumo energetico di 38 kWh.

Per stimare il beneficio della priorità semaforica sul consumo statico del tram ad un incrocio semaforizzato è necessario analizzare i ritardi in ciascun incrocio in condizione di ciclo fisso (situazione senza priorità attiva) e con il sistema UTC attivo. Nel caso di ciclo fisso è stata utilizzata la regolazione semaforica applicata in caso di emergenza, ovvero in caso di guasti e/o gravi anomalie del sistema. I dati sono stati forniti direttamente da 5T.

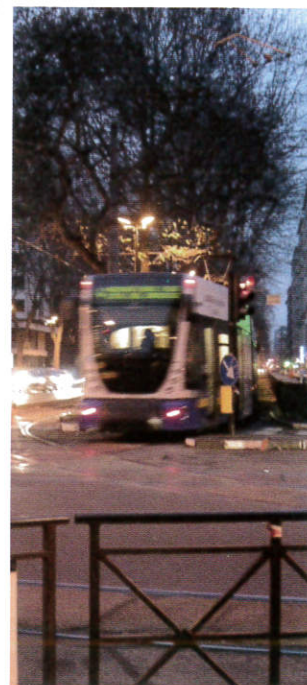


Fig. 3 - Tram Serie 6000 in fermata a Porta Nuova - linea 4 di Torino, direzione Mirafiori sud



Tabella 1 - Tempi del ciclo fisso per diversi incroci semaforizzati [fonte: 5T]

Linea 4: probabilità di passaggio senza attesa agli incroci semaforizzati regolazione semaforica - ciclo fisso

Incrocio	Durata fase favorevole (S)	Durata intero ciclo (S)	Durata fase sfavorevole (S)	Passaggi senza attesa (%)
V. Sacchi / V. Assietta	55	90	35	61,11%
V. Sacchi / C. Stati Uniti	35	80	45	43,75%
C. Turati / C. Sommeiller	16	115	99	13,91%
C. Turati / V. Vespucci	36	80	44	45,00%
C. Turati / V. Magellano	42	100	58	42,00%
C. Turati / C. Dante-Rosselli-De Nicola	37	120	83	30,83%
C. Turati / V. Tirreno	42	96	54	43,75%
C. Unione Sovietica / C. Bramante-Lepanto	40	100	60	40,00%
C. Unione Sovietica / V. Gallupi	46	100	54	46,00%
C. Unione Sovietica / V. Steffeneone	70	100	30	70,00%
C. Unione Sovietica / C. Sebastopoli	43	100	57	43,00%
Piazzale San Gabriele di Gorizia	45	90	45	50,00%
C. Unione Sovietica / V. Montevideo	48	100	52	48,00%
C. Unione Sovietica / V. San Marino	49	100	51	49,00%
C. Unione Sovietica / V. Buenos Aires	50	100	50	50,00%
C. Unione Sovietica / C. Cosenza-Giambone	44	100	56	44,00%
C. Unione Sovietica / C. Tazzoli	33	100	67	33,00%
C. Unione Sovietica / V. Passo Buole direzione sud	29	110	81	26,36%
C. Unione Sovietica / V. Passo Buole	43	110	67	39,09%
C. Unione Sovietica / V. Pasubio	64	100	36	64,00%
C. Unione Sovietica / C. Traiano	46	110	64	41,82%
C. Unione Sovietica / V. Nichelino	30	45	15	66,67%
C. Agnelli / P. Caio Mario	28	91	63	30,77%

La stima del ritardo in questo caso è stata condotta ipotizzando una legge uniforme degli arrivi del tram all'incrocio, secondo l'espressione:

$$\text{attesa media/ciclo} = \text{probabilità di rosso} \times \text{attesa media/rosso}$$

dove:

$$\text{probabilità di rosso} = \text{durata di rosso/durata di ciclo}$$

$$\text{attesa media/rosso} = \text{rosso}/2$$

Con la priorità semaforica, invece, il ciclo semaforico varia continuamente.

Il sistema UTOPIA utilizza infatti algoritmi adattativi per modificare in modo continuativo

la gestione dell'impianto semaforico, sulla base dei dati di traffico rilevati dai sensori presenti sull'incrocio stesso e sulle intersezioni circostanti. In questo caso per ottenere una stima del valore medio di attesa è necessaria una raccolta estesa di dati su singoli incroci. Per questo motivo è stata effettuata una raccolta dati su tre incroci per determinare il tempo medio di attesa nel caso di priorità attiva.

Avendo ricavato i tempi medi di attesa e la probabilità di passaggio senza attesa è possibile stimare il risparmio giornaliero sul consumo statico dovuto alla priorità semaforica per la tratta San Marino-Giambone. La priorità semaforica riduce in maniera considerevole la probabilità

di arresto del tram agli incroci semaforizzati e, di conseguenza, il tempo medio di attesa è sempre minore rispetto alla regolamentazione semaforica a ciclo fisso.

L'analisi dei dati: consumo dinamico e priorità semaforica ai tram

Il *consumo dinamico* è il consumo dovuto alla trazione ed alle resistenze al moto. Lo studio, come indicato, si è concentrato sull'analisi relativa a due fermate adiacenti. I dati necessari per stimare il consumo dinamico sono stati rilevati direttamente a bordo del tram, mediante un dispositivo dotato di accelerometro e GPS. In questo modo sono stati ricavati sperimentalmente i profili di marcia del tram. È emersa una notevole influenza sul consumo dovuta allo stile di guida del tram, mediamente pari al 22% sul consumo per tratta. L'analisi dei profili di marcia evidenzia come in caso di semaforo rosso l'influenza dello stile di guida sia minore rispetto al caso in cui il tram incontri il semaforo verde: questo può essere dovuto al fatto che su brevi distanze il macchinista è facilitato a mantenere un'accelerazione costante.

Dopo l'elaborazione di circa 30 profili di marcia rilevati, si è concluso che la priorità semaforica, aumentando la probabilità di passaggio senza attesa agli incroci semaforizzati, consente attualmente un risparmio energetico stimato nella tratta San Marino-Giambone del 4,5%, pari a circa 70 kWh giornalieri.

Già dall'analisi dei dati raccolti tra le fermate San Marino e Giambone (Figura 4) è emersa l'influenza sui consumi dello stile di guida. L'intera flotta di mezzi operanti sulle linee gestite dalla GTT è monitorata costantemente al fine di garantire la regolarità del servizio e gestire nel minor tempo possibile eventuali guasti ed emergenze. Ad ogni operatore della centrale operativa (SIS¹) è affidata la gestione ed il moni-

Fig. 4 - Diagrammi osservati velocità-tempo sulla tratta San Marino-Giambone (Linea 4 - Tram serie 6000)

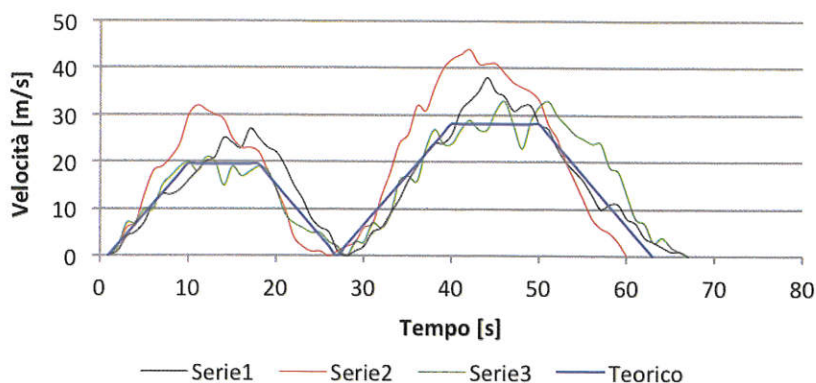


Fig. 5 - Esempio di un profilo di marcia osservato sulla tratta Pastrengo - Sommeiller

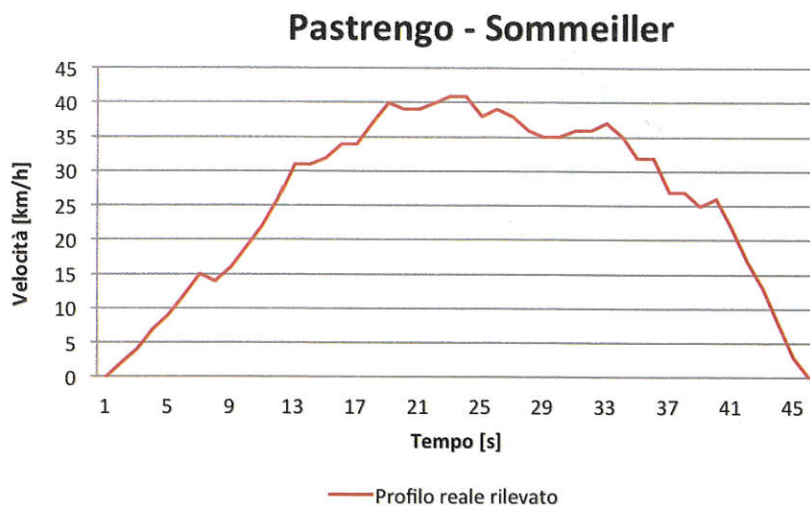
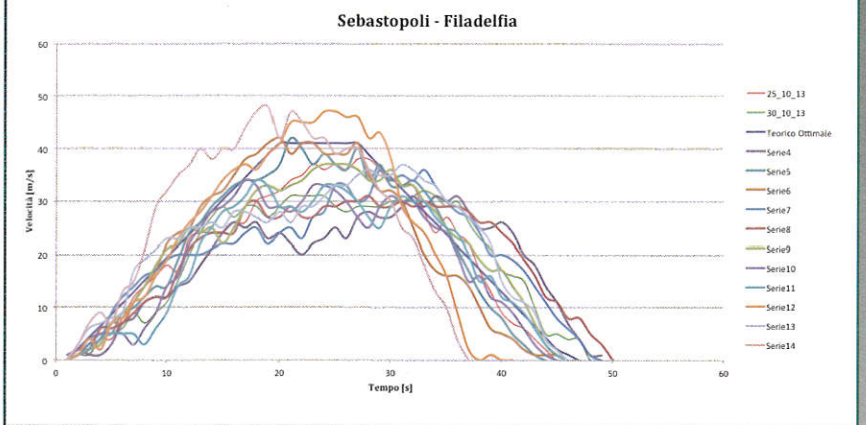


Tabella 2 - Confronto tra il consumo teorico e il consumo medio rilevato (incidenza dello stile di guida)

San Marino/Giambone, analisi del CONSUMO DINAMICO

	Semaforo VERDE	Semaforo ROSSO	Aumento a causa del semaforo	
Consumo teorico	3,26	3,58	9,82%	[kWh]
Consumo medio rilevato	4,04	4,24	4,95%	[kWh]
Influenza dello stile di guida	23,9%	18,5%		

Fig. 6 - Profili osservati sulla tratta Sebastopoli - Filadelfia (14 rilievi)

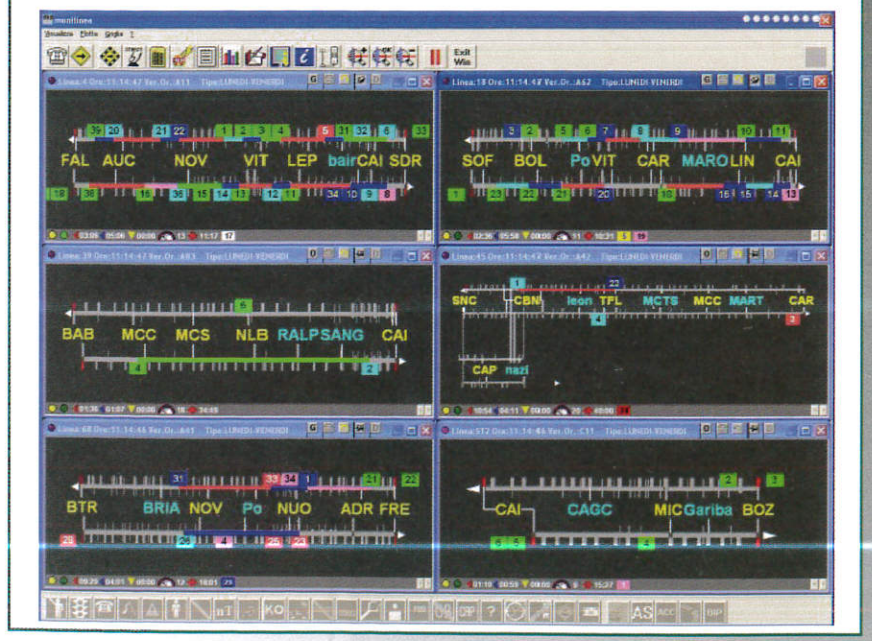


toraggio di una decina di linee, raffigurate graficamente sul terminale della postazione di lavoro (Figura 7).

I rilievi su una porzione maggiore della Linea 4, dalla stazione di Porta Nuova al parcheggio Caio Mario, hanno evidenziato come lo *stile di guida del tram sia una variabile quasi costante* su tutto il percorso.

Consideriamo per semplicità e per ottenere una maggior accuratezza nei risultati solo le tratte tra due fermate che non hanno semafori inter-

Fig. 7 - Esempio di schermata di controllo dei mezzi in sala regia SIS



medi, e riportiamo i consumi per diverse corse. Evidenziando due valori per ciascun estremo – i due consumi migliori e i due consumi peggiori rilevati – si nota chiaramente come lo stile di guida della corsa sia una caratteristica tipica lungo il percorso (Figura 8).

Il macchinista 4 ha causato il consumo peggiore in 5 tratte su 8 analizzate, mentre il macchinista 7 ha avuto il consumo minore su 5 tratte. Lo stile di guida, e di conseguenza il consumo energetico, potrebbe non essere solo influenzato dai numerosi fattori. In alcuni casi, infatti, ci potrebbe essere l'influenza da parte del sistema SIS: il macchinista con uno stile di guida veloce e irregolare potrebbe aver ricevuto dal SIS un avviso di ritardo, mentre uno stile di guida estremamente regolare può essere indotto da una segnalazione da parte del SIS di una situazione di anticipo rispetto agli orari prestabiliti. Lo stile di guida, in ogni caso, ha un significativo impatto sui consumi: la differenza tra i due macchinisti considerati è stimata pari a circa 3,8 kWh (26 kWh nel primo caso e 22,3 kWh nel secondo) su una distanza percorsa di circa 2,5 km, equivalente ad un risparmio energetico pari a circa 14,5 %.

In particolare, sulla linea tranviaria oggetto dello studio, i risparmi energetici stimati che si conseguono con la priorità semaforica sono i seguenti:

- giornaliero sull'intera linea: 4.680 kWh (risparmio statico e in movimento) per 30 vetture e complessive 360 corse al giorno;
- giornaliero dovuto all'utilizzo di 2 vetture in meno per garantire il servizio: 4.800 kWh (percorrenza giornaliera media per vettura 200 km, consumo 12 kWh/Km).

Il veicolo tramviario è tra i mezzi di superficie quello con la maggiore inerzia al moto, per costruzione ma soprattutto per numero di passeggeri che è in grado di trasportare. Questo motivo è la causa del fatto che la fermata obbligata ad un eventuale semaforo rosso crea un'interruzione del diagramma del moto e richiede un consumo di energia considerevole per la fase di ripartenza. Maggiore è la lunghezza del tratto di percorso che il tram riesce a percorrere a velocità costante minori sono i kWh di energia elettrica consumati, in particolare dai dati delle prove sperimentali è emerso che, mediamente, il veicolo della linea 4 necessita di circa 280 metri per raggiungere la velocità massima di 50 km/h che poi potrebbe mantenere se non dovesse frenare per un altro arresto obbligato.

Figura 8 - Dati sui consumi medi rilevati per ogni macchinista o conducente (M, per colonna)

	Consumo medio	M. 1	M. 2	M. 3	M. 4	M. 5	M. 6	M. 7	M. 8	M. 9	M. 10	M. 11	M. 12	M. 13
Pastrengo-Sommelier	3,37	3,27	3,60	3,62	3,74	3,13	3,63	2,92	3,56	2,99	3,20	3,58	3,16	3,47
Sommelier-Vespucci	3,17	3,07	3,19	3,60	3,66	3,52	2,83	2,73	3,04	3,23	3,32	2,93	3,16	2,86
Dist. Militare-Morelli	4,32	3,88	4,32	4,05	4,81	4,77	4,47	4,22	4,72	4,02	4,09	4,24	4,22	3,88
C. Morelli-Sebastopoli	3,10	3,11	2,95	3,00	2,99	3,31	3,53	2,94	3,19	3,08	3,05	3,11	3,11	2,96
Sebastopoli-Filadelfia	3,18	3,43	2,96	3,37	3,51	3,37	3,38	2,67	3,18	3,04	2,89	3,30	3,01	3,20
Montevideo-S.Marino	2,47	2,03	2,60	2,39	2,99	2,18	2,24	2,77	2,57	2,75	2,59	2,71	2,45	1,90
Giambone-Tazzoli Est	4,48	4,31	4,57	4,61	4,36	4,31	4,59	4,02	4,41	4,52	4,15	4,71	5,05	4,67
Totale					26,06	kWh		22,27	kWh					

Conclusioni

La priorità semaforica permette sia una riduzione dei tempi di viaggio per il trasporto pubblico sia un risparmio energetico, che potrebbe essere ulteriormente aumentato con uno stile di guida più prossimo al profilo di marcia teorico. Se un semaforo interrompe il moto di un tram, di fatto ne raddoppia indicativamente il consumo tra due fermate.

Le maggiori criticità del sistema di priorità semaforica rilevate durante l'analisi riguardano principalmente quattro fattori:

- l'interferenza con il mezzo proveniente in direzione opposta, che in alcuni casi non permette al sistema di assegnare la priorità ad entrambi i mezzi;
- lo stile di guida, che può ridurre in maniera significativa il potenziale risparmio energetico della priorità sul consumo dinamico del tram;
- i tempi di fermata per la salita e discesa dei passeggeri, assunti costanti dal sistema di priorità per tutte le fermate e per qualsiasi fascia oraria, non rispettano le reali condizioni della linea: dai valori rilevati si evidenzia come ci sia una variabilità non trascurabile;
- il SIS (Service Information System), che comunica con un apparato di bordo eventuali situazioni di anticipo o ritardo sul tempo di percorrenza previsto, potrebbe in misura minore determinare una variazione dello stile di guida.

Alcuni accorgimenti - tra i quali il prolungamento della fase di rosso del ciclo semaforico che precede l'arrivo del tram, lungo la sua direttrice di marcia, oltre a quello di verde all'arrivo del tram medesimo, con restituzione del verde

medesimo al flusso incrociante nelle fasi successive - potrebbero aumentare ulteriormente i benefici della priorità semaforica. Un altro elemento saliente è l'aumento della frequenza di campionamento della posizione del tram durante il suo percorso e l'adozione di un valore variabile sia in funzione della fermata sia in funzione della fascia oraria, sulla base di valori medi rilevati.

Ringraziamenti

Lo studio è stato possibile grazie alla collaborazione con le Società GTT, 5T e SWARCO MIZAR S.p.A.

Riferimenti bibliografici

- DALLA CHIARA B. (a cura di) CON AA.VV. (2013), *ITS nei trasporti stradali, tecnologie, metodi e applicazioni*, Egaf
- www.swarco.com/mizar, Swarco Mizar S.p.A, 2014
- www.alstom.com, Alstom Group, 2014
- www.5t.torino.it, 5T S.r.l. - Tecnologie Telematiche Trasporti Traffico Torino, 2014
- www.gtt.it, Gruppo Torinese Trasporti, 2014
- DAGANZO C. (1997), *Fundamentals of transportation and traffic operations*, Emerald Group Publishing Limited
- VUCHIC VUKAN R. (2007), *Urban Transit: operations, planning, and economics*, Wiley.

* Politecnico di Torino

** 5T

¹ La centrale operativa SIS, situata a fianco del deposito Nizza, è attiva 24 ore su 24 per 365 giorni l'anno.

