



Università degli studi ROMA TRE

Scuola Dottorale in Ingegneria

Sezione Scienze dell'Ingegneria Civile

XXIV Ciclo

Tesi di Dottorato

**Sviluppo di un modello di microsimulazione per
l'analisi delle prestazioni di sistemi BRT**

Dottorando: Claudio Nelli

Docente guida: Prof. Stefano Gori

Co-Tutore: Ing. Marco Petrelli

Coordinatore del dottorato: Prof. Leopoldo Franco

Roma, Febbraio 2012

Collana delle tesi di Dottorato di Ricerca
In Scienze dell'Ingegneria Civile
Università degli Studi Roma Tre
Tesi n° 34

Prefazione

“C'è bisogno di una prova per conoscersi; nessuno sa quel che può se non sperimentandosi.”

Lucio Anneo Seneca

62 d.C.

Sommario

Recentemente sia in Europa che nel resto del mondo, è stata posta particolare attenzione allo studio dei sistemi Bus Rapid Transit (BRT) per la loro capacità di migliorare la mobilità urbana con investimenti e tempi relativamente contenuti, nel rispetto dei canoni della mobilità sostenibile.

Tuttavia, la letteratura di settore è carente di modelli avanzati che tengano conto delle ricadute sul servizio delle scelte di pianificazione e progettazione delle infrastrutture viarie di linea e di organizzazione del servizio e dimensionamento della flotta. Si tratta di servizi di trasporto di superficie in sede in tutto o in parte riservata, ad elevate frequenza e velocità commerciale, a capacità intermedia tra i servizi di superficie ordinari e sistemi di trasporto pubblico pesanti come le metro, con dotazioni tecniche e tecnologiche avanzate, di livello superiore sia per il controllo e la regolazione del servizio sia per la fruibilità da parte dell'utenza. Tali caratteristiche generali ne rendono in molti casi fattibile ed efficiente la realizzazione, specialmente in contesti urbani e suburbani più o meno consolidati da un punto di vista urbanistico ed infrastrutturale per i quali la realizzazione di sistemi su ferro non è giustificata dalla consistenza della domanda o fortemente frenata dai vincoli e dai costi.

A partire da una panoramica delle caratteristiche di alcuni sistemi BRT realizzati nel mondo nell'arco di alcuni decenni, dalla quale si coglie un ampio spettro di soluzioni adottate per ciascuno degli aspetti caratterizzanti, si è quindi considerata la modellistica presente in letteratura per la loro analisi prestazionale.

A fronte della varietà delle soluzioni possibili e delle potenzialità offerte dalla micro simulazione per esaminare funzionalmente anche tali sistemi, viene poi approfondito l'approccio di studio dei BRT mediante lo sviluppo, dalla definizione alla implementazione fino all'applicazione ad un caso significativo un nuovo modello di microsimulazione specifico per la valutazione delle alternative di servizio, dell'efficienza delle corsie riservate e dei benefici prodotti dai sistemi di priorità semaforica, allo scopo di massimizzare il bilanciamento tra l'efficienza e l'affidabilità del sistema e di minimizzarne i costi.

Tale modello simula sia i singoli veicoli nelle fasi di marcia e nelle operazioni compiute in corrispondenza di fermate passeggeri ed impianti semaforici, sia gli utenti nei loro spostamenti tenendo conto della capacità dei veicoli in esercizio.

Il modello è stato raffinato per l'analisi delle configurazioni delle stazioni near-side, far-side e mid-stop, e considera gli effetti della variabilità nello stile di guida fra conducenti diversi.

Il modello è stato prima validato in un caso di applicazione teorico e quindi applicato ad sistema BRT reale in progetto nella città di Roma per la stima dei parametri di servizio attesi.

Abstract

In recent years, both in Europe and the rest of the world, the attention focused on the study of Bus Rapid Transit systems has been growing significantly since they represent a significant way to improve mobility at relatively low cost without underestimating the challenge of sustainable mobility in urban context.

Despite BRT systems having economic advantages and mobility benefits, literature lacks consolidated and generally accepted tools for planning, designing and operating BRT vehicles and facilities.

Therefore, using a micro-simulation approach is a useful way to study Bus Rapid Transit design and their operational problems.

The starting point of this paper is an overview of literature on the characteristics of existing BRT as well as on performance evaluation frameworks.

Furthermore a dynamic micro simulation model representing a BRT system has been implemented by ARENA ROCKWELL Software. This software developed such a model through the cooperative use of dynamic Flow-Charts and static module for Data entry, each of which referred to a specific sub-process.

The implemented model allows the replication of vehicle operations, including driver's decision making along the route, in passenger stations and at traffic signals. At the same time the model provides a representation of passengers waiting on the platform, travelling on board and getting off a vehicle. Moreover it has been empowered to analyse near-side, far-side and mid-stop layout for stations, taking into account the kinematic parameter variability due to different drivers.

In addition, operations detailed by the model deal also with assigning a destination station to each passenger leaving from every starting station, according to a designed matrix.

Moreover, the system is capable of analyzing service working at capacity, taking the vehicle's boarding limit into account when the simulation runs.

This provides a higher understanding of the factors that influence and impact travel time and bus delay and provides a tool that can evaluate specific measures and alternatives to increase the efficiency and effectiveness of the system.

Micro simulation modelling is useful to evaluate the effectiveness of specialized lanes, and transit signal priority, and measure the benefits and impacts of the signal priority strategy.

Once the model has been defined, the calibration and validation procedure is carried out achieving a comparison between the model's output and recent literature findings. In particular, results have been compared to those obtained by an analytic model for evaluation of transit line performance.

Finally, model has been tested in a real-life case study for a new BRT line in Rome.

Indice

ELENCO DELLE FIGURE.....	IX
ELENCO DELLE TABELLE	XII
ELENCO DEI SIMBOLI.....	XIII
1 INTRODUZIONE	1
2 I SISTEMI BRT.....	2
3 MODELLI PER L'ANALISI DEI PARAMETRI DI SERVIZIO.....	10
3.1 MODELLI ANALITICI AGGREGATI (SPERIMENTALI)	11
3.2 MODELLI DISAGGREGATI (TEORICI).....	15
3.3 MODELLI DI SIMULAZIONE.....	19
4 IL MODELLO DI MICROSIMULAZIONE TRANSIMT	21
4.1 ASPETTI GENERALI.....	21
4.2 LA MODELLIZZAZIONE DEI VEICOLI	22
4.3 LA MODELLIZZAZIONE DEGLI UTENTI	31
4.4 GLI INPUT E GLI OUTPUT DEL MODELLO.....	34
5 VALIDAZIONE DEL MODELLO	37
5.1 GLI SCENARI DI DOMANDA E DI OFFERTA.....	37
5.2 I RISULTATI.....	38
6 APPLICAZIONE DEL TRANSIMT AD UN CASO REALE: IL CORRIDOIO EUR FERMI-TORRINO A ROMA	43
6.1 IL CORRIDOIO EUR FERMI- TORRINO.....	43
6.2 LA MODELLIZZAZIONE.....	45
6.3 LA MODELLIZZAZIONE DELLA DOMANDA	46
6.4 CALIBRAZIONE DEL MODELLO	49
6.5 SCENARI DI SIMULAZIONE.....	50
6.6 I RISULTATI.....	51
7 CONCLUSIONI	68
BIBLIOGRAFIA & SITOGRAFIA	71

Elenco delle figure

1	<i>La quantità di spazio richiesta per trasportare lo stesso numero di passeggeri:auto privata,bicicletta, bus</i>	3
2	<i>Confronto grafico delle capacità dei principali modi di trasporto</i>	5
3	<i>Classificazione dei modelli per l'analisi delle prestazioni di sistemi BRT.</i>	10
4	<i>Applicazione sulla linea bus Avenida Grecia nella città di Santiago del Cile del Modello Sperimentale (Fernández, R., 1996).</i>	12
5	<i>Velocità Commerciale vs Distanziamento medio tra fermate per una linea BRT (Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., 2009)</i>	18
6	<i>Numero di Mezzi della Flotta vs Distanziamento medio tra fermate per una linea BRT (Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., 2009)</i>	18
7	<i>Tempo di viaggio a bordo dell'utente vs Distanziamento medio tra fermate per una linea BRT (Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., 2009)</i>	19
8	<i>Il processo iterativo di ottimizzazione mediante la microsimulazione</i>	20
9	<i>Il collegamento tra Caratteristiche dei BRT ed i rispettivi Indicatori di prestazione</i>	22
10	<i>Logica seguita dai veicoli nelle operazioni di trasporto e rispettivi sottomodelli per il calcolo delle scelte, dei tempi di percorrenza e dei tempi di sosta.</i>	23
11	<i>Fase di Scelta in corrispondenza di una Stazione di Fermata passeggeri</i>	25
12	<i>Schema della Fase di Scelta in corrispondenza di un Impianto Semaforico</i>	26
13	<i>Configurazioni di fermata di tipo Near-side e Far-side</i>	27
14	<i>Diagrammi di moto nella fase di passaggio da una tratta alla successiva</i>	30
15	<i>Passaggio da una tratta ad un'altra con limite di velocità più basso</i>	30

16	<i>Passaggio da una tratta ad un'altra con limite di velocità più alto</i>	31
17	<i>Le attese e le scelte di viaggio del passeggero</i>	32
18	<i>Spostamento senza scalo effettuato con bus a servizio locale</i>	33
19	<i>Spostamento senza scalo effettuato con bus a servizio Express</i>	33
20	<i>Passaggio da una tratta ad un'altra con limite di velocità più alto</i>	34
21	<i>Infrastruttura con Configurazione di tipo A</i>	37
22	<i>Infrastruttura con Configurazione di tipo B</i>	37
23	<i>Configurazione A: curve di velocità commerciale media Bus</i>	39
24	<i>Sovrapposizione risultati TRANSIMT con risultati "Evaluation framework for Bus Rapid Transit systems performance" su una Configurazione di tipo A</i>	40
25	<i>Configurazione B: curve di velocità commerciale media Bus</i>	41
26	<i>Confronto Configurazione A e B: curve di velocità commerciale Bus</i>	41
27	<i>Curve di velocità commerciale nelle Configurazioni A e B per diversi livelli di frequentazione e di frequenza delle corse</i>	42
28	<i>Il Corridoio della mobilità in progetto nel quadrante Sud della città di Roma</i>	43
29	<i>Itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino a Roma</i>	44
30	<i>Grafici dei Tempi di ciclo e delle fasi degli impianti semaforici dell'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino</i>	46
31	<i>Grafici della domanda di trasporto nell'ora di punta pomeridiana lungo l'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino</i>	47
32	<i>Rappresentazione grafica delle variazioni degli indicatori rispetto allo SCENARIO I</i>	54
33	<i>Rappresentazione grafica delle variazioni degli indicatori rispetto allo SCENARIO I</i>	55
34	<i>Diagramma Spazio-Tempo relativi allo SCENARIO I</i>	56
35	<i>Diagrammi Spazio-Tempo con inizio traslato nell'origine, relativi allo SCENARIO I</i>	57
36	<i>Curve di riempimento dei veicoli nello SCENARIO I e SCENARIO IV</i>	58

37	<i>Istante di Ciclo in cui i veicoli arrivano all'approccio dell'intersezione semaforizzata nello SCENARIO I</i>	59
38	<i>Analisi dei distanziamenti temporali tra veicoli successivi nella prima e nell'ultima stazione di fermata relativamente allo SCENARIO I</i>	61
39	<i>Analisi dei distanziamenti temporali tra veicoli successivi nella prima e nell'ultima stazione di fermata relativamente allo SCENARIO IV</i>	62
40	<i>Tempo medio di attesa in banchina degli utenti per lo SCENARIO I</i>	63
41	<i>Classificazione % dei Tattesa in bachina dei passeggeri (Normale, Eccessivo ed Inaccettabile) per lo SCENARIO I</i>	65
42	<i>Velocità commerciale media dell'Utenza per fermata di Origine</i>	67

Elenco delle tabelle

1	<i>Capacità dei principali modi di trasporto</i>	4
2	<i>Principali caratteristiche di alcuni sistemi BRT in America</i>	6
3	<i>Caratteristiche dei sistemi BHLS selezionati in Europa (Heddebaut, O., et al., 2010)</i>	8
4	<i>Incremento della domanda e fattori correlati per sistemi BHLS selezionati in Europa</i>	9
5	<i>Combinazioni di Richieste di fermata e di Libero passaggio del veicolo per una Configurazione di Stazione di Fermata Near-Side</i>	28
6	<i>Elenco delle fermate e degli impianti semaforici dell'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino</i>	45
7	<i>Tempi di ciclo e delle fasi degli impianti semaforici dell'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino</i>	46
8	<i>Domanda di trasporto nell'ora di punta pomeridiana lungo l'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino</i>	47
9	<i>Matrice OD dei passeggeri nell'ora di punta pomeridiana lungo l'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino</i>	48
10	<i>Componenti aleatorie da calibrare considerate nel TRANSIMT.</i>	50
11	<i>Indicatori di prestazione risultanti dalle simulazioni degli scenari effettuate</i>	52
12	<i>Variazione degli indicatori rispetto allo SCENARIO I</i>	53
13	<i>Analisi delle prestazioni degli impianti semaforici relative allo SCENARIO I</i>	59

Elenco dei simboli

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

$pphpd$	<i>passengeri ora per direzione</i>
V_c	<i>velocità commerciale media (Km/h)</i>
f_s	<i>frequenza delle fermate di ogni tipo per Km</i>
V_0, α, β	<i>parametri di calibrazione</i>
f_p	<i>frequenza fermate bus per Km</i>
f_0	<i>frequenza altre fermate per Km</i>
t_s	<i>tempo di fermata per ogni causa</i>
δ_D	<i>variabile dummy di direzione (centro, fuori città)</i>
δ_p	<i>variabile dummy periodo di viaggio (ora di punta mattina, altro)</i>
δ_f, δ_t	<i>variabili dummy per tecnologia bus (cambio automatico o manuale)</i>
δ_L	<i>variabile dummy tipo di corsia (riservata, promiscua)</i>
f_p	<i>frequenza fermate per passeggeri</i>
f_s	<i>frequenza fermate per semafori</i>
t_p	<i>tempo di fermata per passeggeri</i>
t_s	<i>tempo di fermata per semafori</i>
s	<i>n° medio veicoli che effettuano fermata</i>
n	<i>n° fermate</i>
p	<i>n° passeggeri serviti/ora</i>
h	<i>headway iniziale Bus</i>
L	<i>lunghezza del tracciato</i>
V	<i>Velocità limite</i>
a	<i>accelerazione bus</i>
d	<i>decelerazione bus</i>
k	<i>tempo medio apertura e chiusura porte</i>
τ	<i>tempo medio di salita/discesa passeggeri</i>
l	<i>distanza media di viaggio</i>

D	<i>distanza media tra le fermate;</i>
V_a	<i>velocità pedonale dei passeggeri.</i>

Simboli utilizzati per la definizione e l'utilizzo del modello TRANSIMT.

L	<i>lunghezza totale della tratta</i>
v_0	<i>velocità del veicolo in entrata nella tratta</i>
v_{fin}	<i>velocità desiderata per il veicolo in uscita dalla tratta</i>
a_m	<i>accelerazione media del veicolo;</i>
a'_m	<i>decelerazione media del veicolo.</i>
$v_{max\ tria}$	<i>velocità massima raggiungibile in assenza di limiti di velocità</i>
v_{lim}	<i>Limite di velocità imposto nella tratta</i>
h	<i>tasso di arrivo degli utenti alla stazione di fermata di origine</i>
H	<i>Distanziamento temporale tra le vetture in partenza</i>
$\Delta T_{Spostamento}$	<i>Tempo di spostamento complessivo dell'utente</i>
$\Delta T_{Attesa\ in\ banchina\ di\ Origine}$	<i>Tempo di attesa dell'utente nella propria fermata di origine</i>
$\Delta T_{Viaggio\ a\ bordo}$	<i>Tempo di viaggio dell'utente a bordo del veicolo</i>
$\Delta T_{Attesa\ in\ banchina\ per\ lo\ scalo}$	<i>Tempo di attesa dell'utente nella fermata in cui effettua lo scalo</i>
\bar{a}	<i>Accelerazione media del veicolo</i>
\bar{a}'	<i>Decelerazione media del veicolo</i>
V_{lim}	<i>Velocità massima raggiunta dal veicolo</i>
r	<i>Ritardo/ Anticipo alla partenza del veicolo</i>
\bar{f}_p	<i>Media del Tasso di arrivo dei passeggeri in fermata</i>
σ_p	<i>Deviazione standard del Tasso di arrivo dei passeggeri in fermata</i>
C_v	<i>Capacità dei veicoli</i>
\bar{T}_{tot}	<i>Tempo che mediamente viene impiegato dal veicolo a percorrere l'intero itinerario</i>
$\sigma(\bar{T}_{tot})$	<i>Deviazione Standard del Tempo che mediamente viene impiegato dal veicolo a percorrere l'intero itinerario</i>

\overline{V}_c	<i>Velocità commerciale media di esercizio</i>
$\overline{\alpha}$	<i>Coefficiente di riempimento medio del veicolo durante l'esercizio</i>
α_{\max}	<i>Coefficiente di riempimento massimo raggiunto dalle vetture durante l'esercizio</i>
$E[W]$	<i>Tempo medio di attesa dell'utente in banchina</i>
$E[H]$	<i>distanziamento temporale medio tra i veicoli</i>
$Var[H]$	<i>Deviazione standard del distanziamento temporale tra i veicoli</i>
N	<i>numero di vetture necessarie per effettuare un servizio</i>
T	<i>tempo di giro</i>

1 Introduzione

Il presente studio, denominato “Un modello di simulazione per l’analisi delle prestazioni dei sistemi BRT”, mira all’approfondimento delle tematiche riguardanti il trasporto pubblico concentrando l’attenzione sull’evoluzione degli strumenti di analisi a disposizione dei tecnici del settore.

Secondo le linee guida per l’implementazione dei BRT fornite dalla Federal Transit Administration (FTA), il sistema BRT è definito come un “un mezzo di trasporto collettivo flessibile e dalle alte prestazioni che combina una varietà di elementi fisici, operativi e di sistema all’interno di un sistema costantemente integrato con una immagine di qualità ed una identità unica” (Levinson, H., et al. 2003: Volume 1, 1-1).

In generale si tratta di sistemi di trasporto di superficie ad alta capacità, in sede del tutto o in parte riservata, con elevate frequenza e velocità commerciali e con dotazioni tecniche e sistemi tecnologici che massimizzano il livello di servizio per l’utenza e agevolano il gestore nel controllo e nella regolazione del servizio.

Nel rispetto generale di questi attributi ogni sistema BRT in esercizio si caratterizza per le specifiche scelte progettuali e di esercizio in funzione del contesto in cui è chiamato ad operare, e che sono quelle che ne determinano poi l’effettivo successo in termini sia di efficacia sia di efficienza.

L’obiettivo di questo studio è di condividere lo stato dei modelli per l’analisi delle prestazioni dei sistemi BRT attualmente disponibili e di proporre uno innovativo al fine di superare i limiti e le difficoltà nell’implementazione di tali sistemi.

2 I sistemi BRT

E' noto che il punto critico che le città moderne si trovano ad affrontare riguarda i problemi relativi alla mobilità e che questo rappresenta una grande sfida che gli urbanisti non dovrebbero sottovalutare (Banister, D., 2005; Balaker, T. e Staley, S., 2006; Wickham, J., 2006). Tale problematica deriva dal forte aumento dei livelli di domanda, sia di persone che di merci, che viene in gran parte soddisfatta attraverso l'uso dei mezzi di trasporto privato. Ciò causa deleteri fenomeni di congestione, ritardi nei tempi di spostamento, incremento del consumo di carburanti e, di conseguenza, fenomeni di inquinamento atmosferico (Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., 2009)

La mobilità sostenibile fornisce un paradigma alternativo all'interno del quale è possibile studiare la complessità delle città e rafforzare i legami tra uso del territorio ed i trasporti.

La città è la forma urbana maggiormente sostenibile e costituisce il luogo dove la maggior parte (70-80%) della popolazione mondiale vive. Diversi studi empirici testimoniano che il livello di popolazione, affinché identifichi una città sostenibile, deve variare in un intervallo compreso tra 50.000 e 100.000 abitanti ed essere distribuita in modo da garantire più densità medie tra le 40 e le 200 persone per ettaro.

La città si dovrebbe sviluppare garantendo l'accessibilità dei corridoi di trasporto pubblico dai principali punti di interscambio presenti al loro interno in modo da facilitare l'uso misto di tali sistemi di trasporto (Banister, D., 2005; Banister, D., 2006).

E' necessario utilizzare con parsimonia lo spazio comune all'interno delle città perchè ciò influisce sulla loro vivibilità. Esso, infatti, a parità di domanda, varia molto a seconda che il sistema di trasporto scelto sia un'automobile privata, una bicicletta o un bus (vedi Figura 1).



Figura 1: La quantità di spazio richiesta per trasportare lo stesso numero di passeggeri: auto privata, bicicletta, bus¹

Pertanto l'approccio alla mobilità sostenibile non esclude l'uso dell'autovettura privata ma pone una maggiore attenzione al contenimento dei costi ad essa correlati e, ci suggerisce di focalizzare l'attenzione su 4 azioni:

- 1) Riduzione della necessità di viaggiare;
- 2) Incoraggiare l'intermodalità;
- 3) Ridurre le distanze da percorrere;
- 4) Incrementare l'efficienza dei sistemi di trasporto.

Inoltre, ai singoli cittadini ed alle attività commerciali, che utilizzano il servizio offerto per raggiungere la loro rispettiva destinazione, interessa conoscere il tempo necessario ad effettuare lo spostamento. Tale intervallo temporale deve assumere dimensioni accettabili, anche se maggiori del valore minimo, con un ragionevole grado di certezza. E' l'affidabilità del sistema ad essere cruciale (Noland, R., e Polak,, J., 2002).

Fortemente connessi all'incremento dell'efficienza dei sistemi di trasporto impiegati sono da considerare tutte le operazioni che portano verso un riequilibrio modale tra trasporto pubblico e privato.

I BRT possono essere un modo estremamente efficiente in termini di costi per fornire un sistema di trasporto dalle alte qualità e prestazioni (Levinson, H., et al. 2003: Volume 1, 1-3) e per le'efficacia che li caratterizza, sono in grado di avere effetti non trascurabili anche sulla

▪ ¹ Poster from the city of Munster (Germany), Planning Office, August 2001.

ripartizione modale, al contrario dei sistemi di trasporto di superficie ordinarie ed alla stregua dei più complessi ed impegnativi sistemi metro.

La seguente tabella riporta gli intervalli di capacità oraria per diversi sistemi di trasporto:

	Sede promiscua		Separazione longitudinale		Sede propria		Vettura privata su	
	<i>Bus</i> ²	<i>Tram</i> ³	<i>Bus</i> ⁴	<i>LRT</i> ⁵	<i>BRT/BHLS</i> ⁶	<i>Metro pesante</i> ⁷	<i>Strada ordinaria</i> ⁸	<i>Superstrada</i> ⁹
Capacità della linea (pphpd)	3600-7200	7000-15000	3600-7200	9000-30000	3000-28000 ¹⁰	10000-60000	780-1040 ¹¹	1950-2600 ¹²

Tabella 1: Capacità dei principali modi di trasporto

- ² Carrese Stefano, “Interazione tra i parametri caratteristici di una linea di trasporto pubblico”, Dottorato di ricerca in Ingegneria dei Trasporti VII Ciclo Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, 1995.
- ³ Ibidem;
- ⁴ Ibidem;
- ⁵ Ibidem;
- ⁶ Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., “Evaluation framework for Bus Rapid Transit systems performance”, The capacity of Transport Systems: arcs, nodes, services and technologies International Conference, organized from TTL (Transport, Territory and Logistics) Unit of IUAV University of Venice, 2009;
- ⁷ (Carrese, S., 1995);
- ⁸ Ibidem;
- ⁹ Ibidem;
- ¹⁰ I 28000 passeggeri ora per direzione si riferiscono al sistema TransMilenio di Bogotá (Cain, A., et al., 2007). Questo rappresenta un sistema BRT dalle caratteristiche estremizzate in quanto previsto non integrato ma in sostituzione di un sistema metro di cui la città è priva.
- ¹¹ Si è considerata una capacità pratica di 1,3 persone/veicolo
- ¹² Idem.

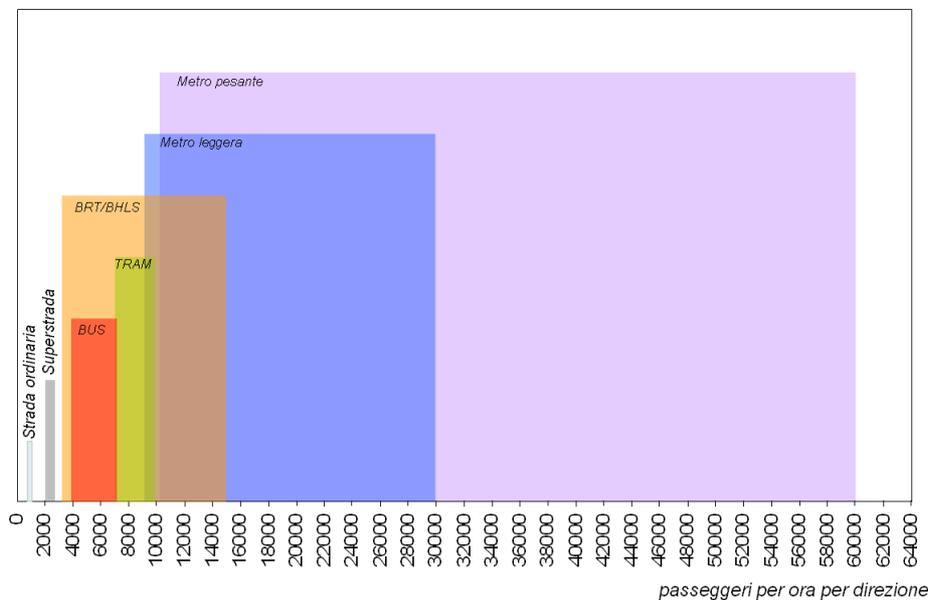


Figura 2: Confronto grafico delle capacità dei principali modi di trasporto¹³

I sistemi BRT sono stati adottati in molte città degli U.S.A., del Canada, dell’Australia, dell’Europa e del Sud America. Il punto in comune a molte di queste aree urbane è l’alta concentrazione di popolazione (sopra i 700,000 abitanti) e la presenza di un sistema collettivo rapido su ferro.

Le principali caratteristiche dei BRT consistono nelle corsie riservate, ampie distanze tra fermate, stazioni accattivanti (anche di tipo ferroviario), veicoli agevolmente accessibili ad alta capacità, attività di bigliettazione fuori dal veicolo, uso di tecnologie ITS (l’Automatic Vehicle Location con il controllo in tempo reale della regolarità dell’esercizio, l’informazione ai passeggeri, i sistemi di priorità semaforica, ecc...) ed il Programma di esercizio flessibile ma frequente e costante (il servizio dovrebbe operare al minimo 16 ore ogni giorno, con distanziamenti temporali di 15 minuti o minori nelle ore di morbida e al più di 10 minuti nell’ora di punta) in modo da caratterizzare il sistema con un’identità positiva a cui viene associata un’immagine univoca.

La localizzazione delle fermate ed il loro reciproco distanziamento dipende dal contesto urbanistico in cui sono collocate e delle caratteristiche del sistema di trasporto, e tende ad individuare il miglior equilibrio tra accessibilità al sistema e velocità commerciale. Inoltre,

▪ ¹³ I valori di riferimento sono quelli della Tabella 1.

rispetto ai sistemi metro sotterranei, la posizione superficiale delle fermate presenta vantaggi in termini di accessibilità, sicurezza e tempi complessivi di spostamento per gli utenti.

La Tabella 2 riassume le principali caratteristiche del BRT per alcuni sistemi americani analizzati.

Città (anno di prima apertura)	Tipo di viabilità	Lunghezza (km)	Distanziamento medio tra fermate (m)	Tipo di servizio (Corsia di sorpasso)	Velocità di servizio (km/h)
Boston (2002)	Bus lanes, tunnel	12.0	660	All stops (Yes)	-
Los Angeles (1979)	HOV, bus lanes	38.1	2,200	Express (No)	-
Miami (1996)	Busway	13.1	880	Express, all stops (yes)	29-19
Pittsburgh (1977)	Busway	25.8	1,280	Express, all stops (yes)	64-48
Ottawa (1983)	busway, bus lanes	59.2	2,100	Express, all stops (yes)	70-38
Adelaide (1989)	Guided busway	11.8	-	Express, all stops (No)	-
Brisbane (1990)	Busway	16.8	1,690	Express, all stops (yes)	-
Rouen (2001)	Bus lanes	45.6	750	Limited stops (yes)	-
Bogotà (2000)	Median busway	81.9	650	Express, all stops (yes)	30-21
Curitiba (1973)	Median busway	59.5	430	Express, all stops (yes)	30-19
Quito (1996)	Median busway	16.0	500	Express, all stops (No)	19
Sao Paulo (1975)	Median busway	32.0	610	Express, all stops (yes)	22

Tabella 2: Principali caratteristiche di alcuni sistemi BRT in America¹⁴

Sin dagli anni 90 in tutta Europa sono state osservate delle evoluzioni nel trasporto bus che sono state definite “Bus with a High Level of Service” (BHLS). Tali paesi hanno seguito lo stesso approccio “sistematico” che ricerca sia di incrementare l’utenza dei bus e la qualità del servizio sia di adattare il servizio offerto al contesto urbano ed economico Europeo.

¹⁴ (Levinson, H., et al. 2003: Volume 1)

Mentre negli Stati Uniti il trasporto pubblico risponde essenzialmente alle esigenze dei pendolari provenienti da punti estremamente distanti e differenti tra di loro e diretti al centro città, i modelli urbani europei si presentano come città relativamente dense con strade strette dove la maggior parte delle attività e le residenze si affiancano. Ciò ha influenzato l'organizzazione del trasporto pubblico, il quale trae vantaggio dai flussi concentrati. La domanda di trasporto pubblico va al di là dell'ora di punta in cui si concentrano gli spostamenti dei pendolari e copre tutto l'arco della giornata, la sera ed i fine settimana in cui vengono utilizzati i sistemi di trasporto pubblico (Heddebaut, O., et al., 2010).

Il BHLS tenta a creare un collegamento tra i vantaggi di un sistema economico basato sui bus e le prestazioni di sistemi più pesanti.

Il concetto di BHLS si ispira alla metodologia ed il design dei BRT americani; il BHLS, come il BRT, resta generico e può essere inserito in un qualsiasi tipo di infrastruttura.

Il BHLS in Europa raggiunge i propri obiettivi trasportistici, sociali, ambientali ed economici soltanto quando avviene un incremento di utenza.

Le applicazioni implementate in Europa hanno mostrato che i sistemi BHLS determinano incrementi di utenza per il servizio di trasporto pubblico, che in alcuni casi può arrivare anche a raddoppiarsi.

In Tabella 3 e Tabella 4 vengono presentati dieci sistemi BHLS Europei.

Città	Identità del Sistema	Lunghezza del Sistema (km)/ (Corsie Dedicate)	Natura della Viabilità	Passeggeri per Giorno	Headway dell'ora di punta (Minuti)	Flotta Dedicata?
Amsterdam	Zuid-Tangent	41 (33)	Viabilità esclusiva, corsie bus (periferica, circolare)	40.000	6	Si
Dublino ¹⁵	Quality Bus Corridor	12 (8.4)	corsie bus	34.000	<1.5 ¹⁶	No
Göteborg ¹⁷	TrunkBus	16.5 (7.5)	corsie bus	24.000	3.3	Si
Amburgo ¹⁸	MetroBus	14.8 (4.0)	corsie bus	60.000	3.5	Si
Helsinki	Jokeri Line	28 (6)	corsie bus (itinerario circolare)	25.000	5	Si
Madrid	Bus-VAO	16.1 (16.1)	Corsie protette con senso di marcia variabile (inserita in strada per flussi a lunga percorrenza)	33.000 ¹⁹	<1 ²⁰	No
Nantes	BusWay	7 (6)	corsie bus	24.600	3.3	Si
Parigi	TVM	20 (19)	Viabilità esclusiva per bus (periferica, circolare)	65.800	3.5	Si
Prato	LAM	42 (15)	corsie bus	n/a	7	Si
Stoccolma	Blue Line	40 (12)	corsie bus	36.575 ²¹	5	Si

Tabella 3: Caratteristiche dei sistemi BHLS selezionati in Europa²² (Heddebaut, O., et al., 2010)

- ¹⁵ I dati relativi a Dublino si riferiscono alla Road Quality Bus Corridor, ci sono altri QBC.
- ¹⁶ I sistemi di Dublino e Madrid svolgono l'esercizio su più itinerari sui loro sistemi BHLS.
- ¹⁷ I dati relativi a Göteborg si riferiscono alla Linea 16, ci sono altre linee TrunkBus.
- ¹⁸ I dati relativi a Amburgo si riferiscono alla MetroBus Line 5, ci sono altre linee MetroBus.
- ¹⁹ vedi nota 16.
- ²⁰ Il sistema Bus-VAO svolge servizio con senso di marcia variabile. I dati riportati si riferiscono al flusso dell'ora di punta entrante (07:00-10:00), per più itinerari bus e combinazioni di occupazioni degli HOV.
- ²¹ I passeggeri per giorno di Prato e Stoccolma sono mediati su più itinerari e corridoi.
- ²² Tratto da: Casi studio del COST BHLS www.bhls.eu. Accesso del 26 marzo 2010.

Città	Identità del Sistema	Variazione di domanda per il BHLS	Variazione della velocità operativa	Periodo di punta con riduzione dell'headway	Ammodernamento della rete nel Corridoio?	Unica Identità per il servizio BHLS?
Amsterdam	Zuid-Tangent	+47%	Significativo	Si	Significativo	Si
Dublino ²³	Quality Bus Corridor	+125%	Maggiore	Si	Minore	No
Göteborg ²⁴	TrunkBus	+73%	Moderato	Si	Significativo	Si
Amburgo ²⁵	MetroBus	+20%	Minore	Si	Minore	Si
Helsinki	Jokeri Line	+100%	Significativo	7 → 5	No	Si
Madrid	Bus-VAO	+70-100%	+80-100%	Si	Minore	No
Nantes	BusWay	+55%	Moderato	Si	Significativo	Si
Parigi	TVM	+134%	Significativo	5 → 3.5	Significativo	Si
Prato	LAM	+57%	+5%	15 → 7	Maggiore	Si
Stoccolma	Blue Line	+27%	0	Si	No	Si

Tabella 4: Incremento della domanda e fattori correlati per sistemi BHLS selezionati in Europa²⁶ (Heddebaut, O., et al., 2010)

Tutto ciò suggerisce la necessità, sia in fase di progettazione che di verifica, di un esame delle caratteristiche del sistema e della loro calibrazione in funzione dello specifico contesto di inserimento del BRT. Ciò premesso, dato l'elevato numero di variabili da considerare, è evidente l'utilità di uno strumento di supporto per l'analisi e l'ottimizzazione di tali caratteristiche.

- ²³ I dati relativi a Dublino, Göteborg ed Amburgo sono relativi a specifiche linee BHLS come riportato in Tabella 1; questi sono i migliori esempi di linee BHLS per ciascuna città.
- ²⁴ Come riferimento per il BHLS Ridership Growth viene generalmente preso la prima più importante implementazione di BHLS. In alcuni casi ci sono stati dei gradualissimi miglioramenti negli anni precedenti, che sono di solito inclusi nel caso di riferimento.
- ²⁵ In alcuni casi, i dati sono stati riportati come variazioni del tempo di viaggio.
- ²⁶ Tratto da: Casi studio del COST BHLS www.bhls.eu. Accesso del 26 marzo 2010.

3 Modelli per l'analisi dei parametri di servizio

In passato sono state presentate molteplici analisi delle prestazioni dei BRT, seguendo differenti impostazioni metodologiche.

Si riporta di seguito una classificazione dei modelli di analisi disponibili ed una sintesi delle rispettive potenzialità a partire dalla individuazione delle due tipologie fondamentali

- Modelli analitici
- Modelli di simulazione

a loro volta articolati rispettivamente in:

- Modelli aggregati sperimentali
- Modelli disaggregati

e

- Modelli macroscopici
- Modelli mesoscopici
- Modelli microscopici

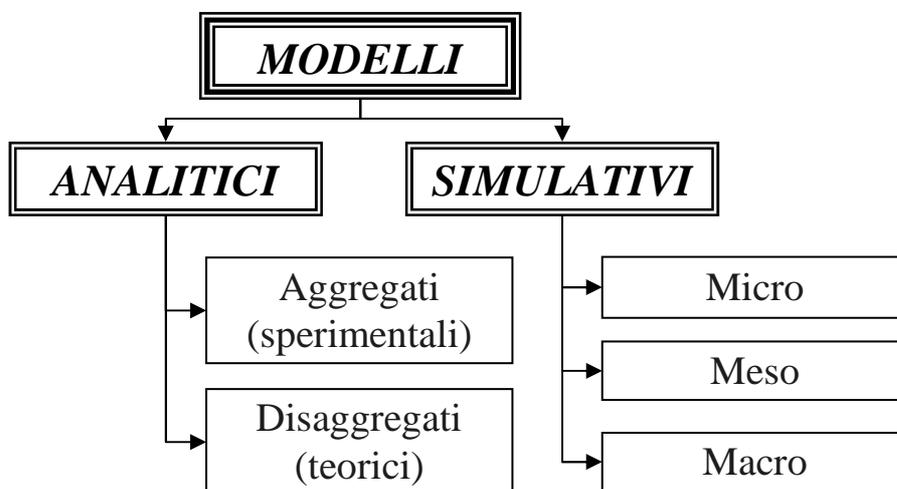


Figura 3: Classificazione dei modelli per l'analisi delle prestazioni di sistemi BRT.

Nei modelli analitici l'espressione delle relazioni tra le variabili significative è analitica e viene definita o sulla base delle osservazioni sperimentali condotte (nei modelli aggregati sperimentali) o dall'analisi

teorica della funzionalità. Nei modelli di simulazione viene invece modellizzato il comportamento del sistema e del suo funzionamento a livello di disaggregazione progressivamente crescente dai modelli macrospici e quelli microscopici.

3.1 Modelli Analitici Aggregati (Sperimentali)

In generale, i modelli Analitici Aggregati, anche detti Modelli Empirico-Sperimentali, analizzano i fenomeni partendo dall'osservazione di un caso specifico, di tipo pratico, per giungere ad una conclusione generale, di tipo teorico. Essi, pertanto, hanno come obiettivo quello di passare, dallo studio di un caso particolare, ad una formulazione di ordine generale (metodo induttivo).

La velocità commerciale è definita come la velocità media di viaggio tra due punti di un servizio di trasporto pubblico, includendo ogni ritardo accumulato dal veicolo durante le fermate. Essa è uno dei principali parametri per la valutazione delle prestazioni di un servizio di trasporto pubblico. Migliore è la stima della velocità commerciale di una linea in progetto, tanto maggiore potrà essere l'assetto delle priorità semaforiche alle intersezioni, la scelta delle tecnologie dei veicoli, il dimensionamento della flotta e la progettazione del programma di esercizio.

Si riporta di seguito l'evoluzione storica dei modelli analitici aggregati per la stima della velocità commerciale fino ad arrivare a quelli di ultima generazione.

Già dalle prime formulazioni la forma funzionale preferita per i vari modelli che si sono susseguiti nel tempo è stata una combinazione lineare di esponenziali negativi.

La prima formula proposta per la stima della velocità commerciale è la seguente:

$$V_c = V_0 \cdot e^{-\alpha f_s}$$

(Cohen, S., 1984; Gibson, J., 1989)

dove:

V_c : velocità commerciale media (Km/h)

f_s : frequenza delle fermate di ogni tipo per Km

V_0 , α : parametri di calibrazione

Tale equazione ha trovato una forte correlazione tra velocità commerciale e frequenza delle fermate.

In via esemplificativa questo modello esponenziale, applicato sulla linea bus Avenida Grecia nella città di Santiago del Cile per valutare le differenti condizioni di servizio, ha prodotto, in corrispondenza di quattro differenti configurazioni di infrastruttura, i risultati di seguito illustrati (Fernández, 1996):

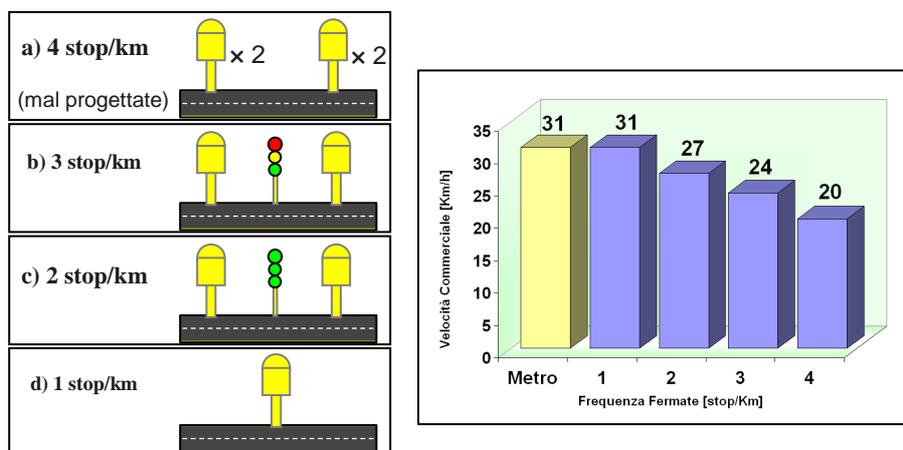


Figura 4: Applicazione sulla linea bus Avenida Grecia nella città di Santiago del Cile del Modello Sperimentale (Fernández, R., 1996).

Le configurazioni di Figura 4 sono caratterizzate come segue:

- Config.a) corsia riservata; fermate ogni 500 m; 2 aree di fermata mal progettate che impongono ognuna una doppia fermata del mezzo; $V_{c_stimata} = 20$ km/h;
- Config.b) corsia riservata; fermate ogni 500 m; 2 aree di fermata intervallate da un semaforo; $V_{c_stimata} = 24$ km/h;
- Config.c) corsia riservata; fermate ogni 500 m; 2 aree di fermata intervallate da un semaforo con priorità semaforica; $V_{c_stimata} = 27$ Km/h;
- Config.d) corsia riservata; 1 fermate ogni 1000 m; $V_{c_stimata} = 31$ Km/h.

Successivamente è stata proposta una estensione di tale modello tramite l'inserimento di nuovi parametri di influenza (Variante 1):

$$V_c = V_0 \cdot e^{-(\alpha f_p + \beta f_0)}$$

(Fernández, R., 1996)

V_c : velocità commerciale media (Km/h)

f_p : frequenza fermate bus per Km

f_0 : frequenza altre fermate per Km

V_0, α, β : parametri di calibrazione

In questo caso la sperimentazione del modello calibrato ha prodotto delle stime della velocità commerciale con un coefficiente di determinazione medio pari a

$$R^2 \sim 0.44.$$

In seguito, una nuova rettifica del modello, ottenuta con l'introduzione della variabile relativa alla durata delle soste, ha portato alla seguente relazione (Variante 2):

$$V_c = V_0 \cdot e^{-(\alpha f_s + \beta t_s)}$$

(Valenzuela, E., et Baleza, I., 1991)

t_s : tempo di fermata per ogni causa

β : parametro dell'effetto della fermata

Tale espressione, attraverso la sperimentazione su varie linee bus nella città di Concepción (Cile), ha permesso di ottenere una stima delle velocità commerciali con un coefficiente di determinazione medio pari a

$$R^2 \sim 0.63.$$

Sulla base degli studi appena elencati, è stato poi proposto un nuovo modello che tiene in considerazione altri importanti fattori nella stima della velocità commerciale (Variante 3):

$$V_c = (V_0 + V_0' \delta_D + V_0'' \delta_P) \cdot e^{-[(\alpha + \alpha' \delta_f) f_s + (\beta + \beta' \delta_t) t_s]}$$

(Fernández, R., et al, 2002)

dove:

δ_D : variabile dummy di direzione (centro, fuori città);

δ_P : variabile dummy periodo di viaggio (ora di punta mattina, altro);

δ_f, δ_t : variabili dummy per tecnologia bus (cambio automatico o manuale).

Il modello è stato calibrato mediante dati collezionati attraverso un veicolo strumentato da una linea bus in Santiago del Cile in assenza di

corsie riservate, ottenendo un coefficiente di correlazione per la stima delle velocità commerciali pari a

$$R^2 \sim 0.55.$$

Il coefficiente di correlazione nel caso di corsie di marcia riservate non viene fornito.

Il modello mostra un buona rappresentatività e sensibilità a varie grandezze: tecnologia del veicolo, periodi di punta o di morbida e direzione di viaggio (da o verso il centro città).

E' stato mostrato come tale formulazione descrive le velocità osservate dei bus in modo migliore rispetto allo Strategic Urban Transport Model of Santiago (ESTRAUS) (Osses, M., et al, 2001), che prova a mettere in relazione le velocità dei bus a quelle delle vetture private.

Infine, solo a livello teorico, viene proposto un nuovo modello analitico aggregato avente la seguente forma funzionale (Variante 4):

$$V_c = (V_0 + V_0' \delta_D + V_0'' \delta_P + V_0''' \delta_L) \cdot e^{-[(\alpha + \alpha' \delta_{fp}) f_p + (\beta + \beta' \delta_{tp}) t_p + (\gamma + \gamma' \delta_{fs}) f_s + (\sigma + \sigma' \delta_{ts}) t_s]} \quad (\text{Fernandez, R., Valenzuela, E., 2003})$$

dove

δ_L : variabile dummy tipo di corsia (riservata, promiscua)

f_p : frequenza fermate per passeggeri

f_s : frequenza fermate per semafori

t_p : tempo di fermata per passeggeri

t_s : tempo di fermata per semafori

Quest'ultimo modello non è ancora sottoposto a procedure di calibrazione.

Nonostante questo metodo di analisi dei fenomeni possa giungere alla formulazione di ipotesi passibili di verifica empirica, è significativo evidenziare che tali modelli, una volta calibrati, possono essere applicati con efficacia ai soli sistemi dalle caratteristiche simili a quelli di calibrazione. Ciò, in considerazione della variabilità delle molteplici caratteristiche dei BRT, può rappresentare un limite per tali modelli.

3.2 Modelli Disaggregati (Teorici)

Nei modelli Disaggregati, anche detti Modelli Teorici, l'analisi dei fenomeni reali parte da un'affermazione generale, di tipo teorico, che si da per scontata, e giunge ad una conclusione specifica, di tipo pratico. Essi quindi si propongono di passare dal generale al particolare (metodo deduttivo).

Nel caso specifico dell'analisi delle prestazioni dei sistemi di trasporto, come punto di partenza vengono spesso prese le equazioni della cinematica del punto materiale ed altre utili a rappresentare i fenomeni connessi alle operazioni di trasporto. Attraverso l'opportuna combinazione di tali espressioni si tende ad individuare una funzione generale in forma esplicita che meglio descriva il fenomeno d'interesse. In questo modo sostituendo alle variabili di tale funzione i valori attuali del fenomeno da osservare è possibile prevedere in anticipo quale sia il risultato in quel caso particolare.

E' stata effettuata una indagine all'interno della vasta letteratura di settore presente in argomento per selezionare gli studi che negli ultimi anni hanno dato i contributi più significativi alla ricerca.

In particolare, già in passato Kikuchi, Vuchic, Montella, Gori, Petrelli e Cipriani hanno elaborato delle forme funzionali utili ad affrontare il problema della definizione di tali modelli.

Pertanto, di seguito, rivolgeremo l'attenzione agli studi effettuati da tali illustri autori, sottolineando ed evidenziando i risultati più importanti raggiunti da ognuno di essi.

La prima ricerca che è stata considerata si intitola:

- *“Marcia e spazio tra fermate di una linea di trasporto”*

(Kikuchi, S., Vuchic, V.R., 1982).

In questo primo lavoro viene proposta un'equazione per la stima del numero medio veicoli che effettuano fermata, in funzione di alcuni parametri che ne influenzano significativamente il valore.

Si ha

$$s = n \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{2ph}{n}\right)} \right]$$

(Kikuchi, S., Vuchic, V.R., 1982)

dove

s : n° medio veicoli che effettuano fermata

n : n° fermate;

p : n° passeggeri serviti/ora;

h : headway iniziale Bus.

Il secondo studio, già da molti anni ritenuto di grande valore nell'ambito degli studi dei Modelli Disaggregati, è denominato:

- *“Simulazione di una linea di trasporto collettivo per determinare l'influenza dei parametri del tempo di giro”*

(Montella, B., 1994).

Attraverso questo lavoro viene proposto un modello analitico per la simulazione di una linea di trasporto collettivo in diverse situazioni di esercizio, sia senza interferenze con il traffico privato (corsia preferenziale) sia con interferenze con il traffico privato, ed i risultati con esso conseguiti.

Tale modello ha lo scopo di valutare l'influenza di tutti i parametri che intervengono nel tempo di giro nelle diverse condizioni di esercizio ipotizzabili, al fine di definire il peso di ogni componente nelle diverse situazioni.

Si tratta cioè di determinare qual'è il campo d'influenza sul tempo di giro dei parametri di accelerazione, contraccollo, regolarità del servizio ecc. nelle diverse condizioni di esercizio (Montella, B., 1994).

Il terzo studio, è stato presentato alla conferenza internazionale “The capacity of Transport Systems: arcs, nodes, services and technologies”, tenuta a presso l'Università IUAV di Venezia nel 2009, si intitola:

- *“Evaluation framework for Bus Rapid Transit systems performance”*

(Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., 2009).

Non senza tenere in considerazione le passate esperienze appena citate, la formulazione analitica sperimentale proposta in questo studio per la valutazione del tempo di percorrenza in una direzione di un veicolo di trasporto collettivo risulta essere la seguente:

$$T = T_c + T_s + T_d = \left(\frac{L - s \cdot \left(\frac{V^2}{2a} + \frac{V^2}{2d} \right)}{V} \right) + s \cdot \left(\frac{V}{a} + \frac{V}{d} \right) + s \cdot \left(k + \tau \cdot \frac{p \cdot h}{s} \right)$$

(Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., 2009)

dove:

n : n° fermate;
 s : n° medio veicoli che effettuano fermata;
 p : n° passeggeri serviti/ora;
 h : headway iniziale Bus;
 L : lunghezza del tracciato;
 V : Velocità limite;
 a : accelerazione bus;
 d : decelerazione bus;
 k : tempo medio apertura e chiusura porte;
 τ : tempo medio di salita/discesa passeggeri.

Tale espressione ci permette di stimare il Tempo di percorrenza dei veicoli in una direzione come somma del Tempo di viaggio a velocità massima, del Tempo speso per rallentamenti alle fermate ed i Tempi di sosta alle fermate.

Inoltre viene anche fornita la seguente espressione per la valutazione del tempo di viaggio dell'utenza:

$$T_u = T_r + T_a + T_w = \left(\frac{l - D/2}{V_c} \right) + \left(\frac{D/2}{V_a} \right) + \frac{h}{2}$$

(Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., 2009)

dove:

l = distanza media di viaggio;
 D = distanza media tra le fermate;
 V_c = velocità commerciale;
 V_a = velocità pedonale dei passeggeri.

Infine, per il calcolo delle dimensioni della flotta necessaria a servire la linea, viene utilizzata la nota formula seguente:

$$N^{\circ}mezzi_{Flotta} = \frac{\text{Tempo di giro}}{\text{headway}}$$

Dall'implementazione numerica del modello sono stati ottenuti molti interessanti risultati, dei quali di seguito se ne riportano alcuni:

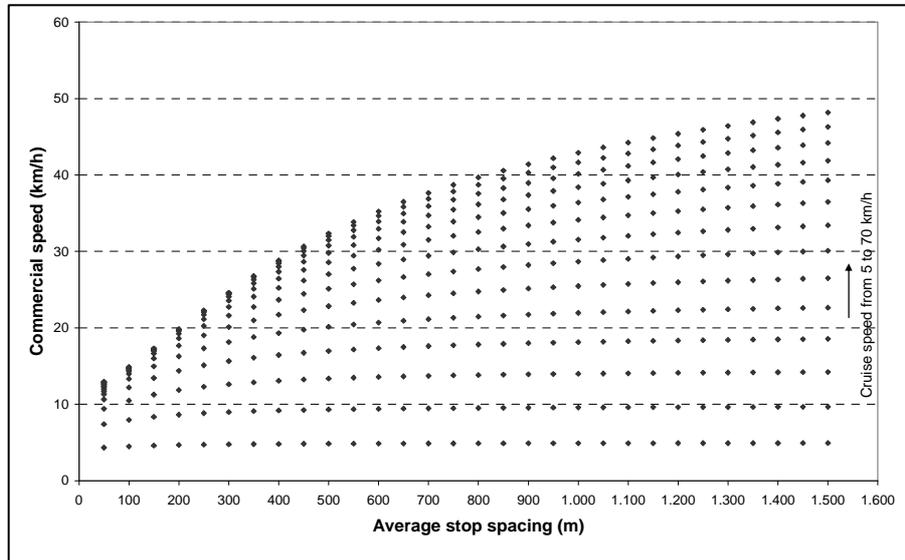


Figura 5: Velocità Commerciale vs Distanziamento medio tra fermate per una linea BRT (Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., 2009)

Dalla Figura 5 si può notare che la distanza tra fermate influenza fortemente la velocità commerciale.

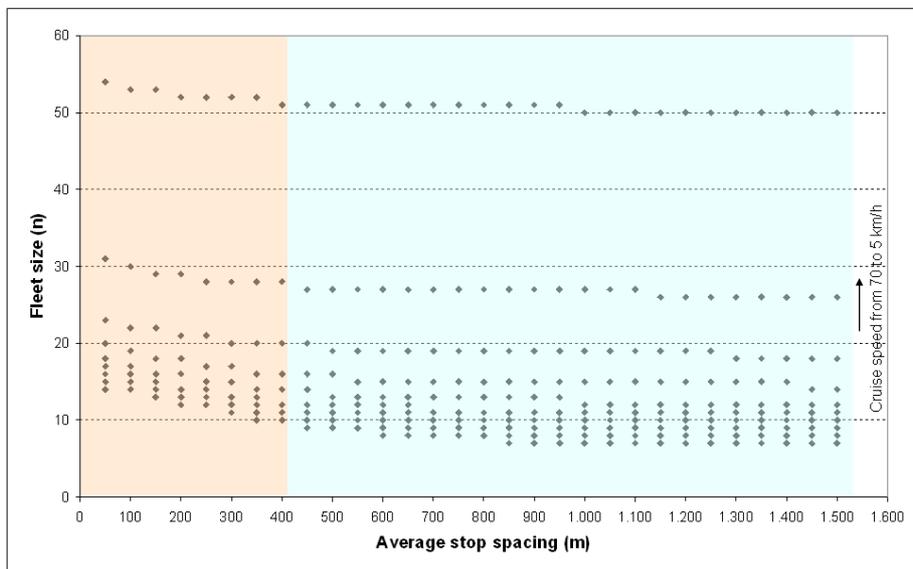


Figura 6: Numero di Mezzi della Flotta vs Distanziamento medio tra fermate per una linea BRT (Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., 2009)

La Figura 6 mostra come all'aumentare del distanziamento tra fermate (sopra i 400 m) si riducono fortemente le dimensioni della flotta.

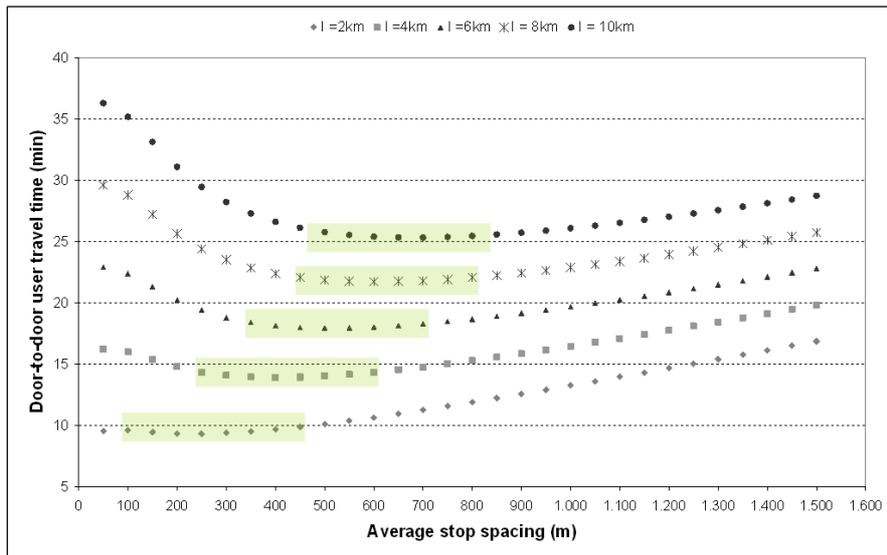


Figura 7: Tempo di viaggio a bordo dell'utente vs Distanziamento medio tra fermate per una linea BRT (Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M., 2009)

Infine la Figura 7 descrive come i Tempi di viaggio minimi si hanno per distanziamenti tra fermate medi, non particolarmente contenuti né eccessivi. Tale distanziamento cresce all'aumentare della lunghezza del viaggio.

3.3 Modelli di simulazione

I modelli di simulazione rappresentano il sistema da modellizzare simulandone il funzionamento al fine dell'analisi prestazionale a livelli di disaggregazione diversi che partono nel caso dei modelli macro a livello generale di tutto il sistema nel suo complesso. Nei modelli mesoscopici viene rappresentato quale elemento di riferimento il singolo elemento del sistema, quindi il veicolo e l'utente il cui comportamento viene però riprodotto secondo regole generali e comuni a tutti gli elementi della stessa tipologia nei modelli microscopici invece gli elementi modellizzati

rimangono gli stessi secondo però leggi e parametri individuali. Pertanto, al fine dell'analisi dei parametri di servizio di una singola linea di trasporto in corsia preferenziale, il modello di analisi più adatto è quello Microsimulativo.

La Microsimulazione, infatti, considera le singole unità, ovvero i singoli veicoli e utenti. A queste unità viene poi applicato un insieme di regole (probabilità di transizione) che gli stati ed i comportamenti all'interno della simulazione. Queste regole possono avere carattere deterministico (probabilità = 1), come ad esempio per il passaggio di un veicolo ad un'interserzione con semaforo in fase di verde efficace, o stocastico (probabilità ≤ 1), come il rispetto dell'orario di partenza previsto dal programma di esercizio della linea.

In tal modo, i modelli di microsimulazione riproducono in una realtà virtuale una copia di un sistema reale. Ciò li rende un importante strumento di supporto alle decisioni economico e pratico.

Va detto che il processo di ottimizzazione di un fenomeno mediante la microsimulazione è di tipo iterativo.

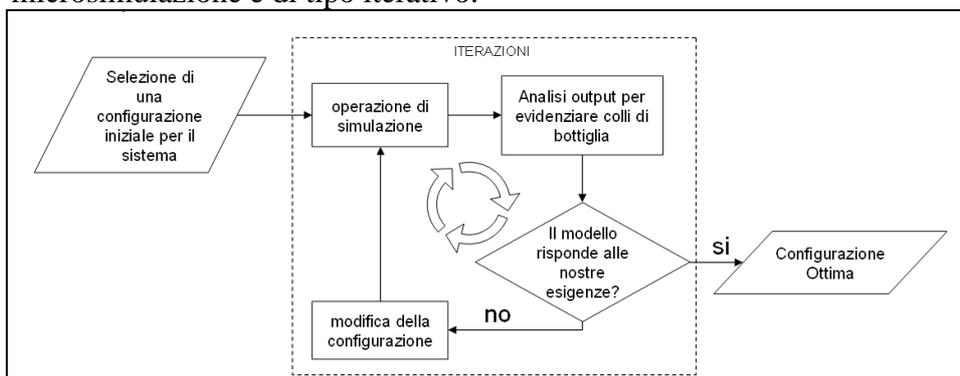


Figura 8: Il processo iterativo di ottimizzazione mediante la microsimulazione

4 Il Modello di Microsimulazione TRANSIMT

L'esame delle caratteristiche dei sistemi BRT ha evidenziato come sia assolutamente opportuno, già dalla fase di progettazione, disporre di uno strumento per la loro verifica e calibrazione che tenga conto dello specifico contesto territoriale in cui il BRT è inserito.

Pertanto, esaminati i modelli sperimentali ed analitici, per sviluppare uno strumento originale, con i vantaggi che ciò può comportare, la scelta è ricaduta sulla microsimulazione.

Per far ciò è stato utilizzato il un programma per la simulazione di eventi discreti e l'automazione denominato Arena, della Rockwell Automation Inc. Esso utilizza il linguaggio di simulazione SIMAN.

4.1 Aspetti Generali

Uno dei metodi oggi utilizzato per lo studio e la progettazione dei sistemi BRT si basa sull'osservazione delle caratteristiche dei sistemi già realizzati nel mondo, anche con l'obiettivo di trovare una correlazione tra le caratteristiche tecniche del sistema e le sue prestazioni. Tuttavia, un tale approccio qualitativo, è ben più efficace se supportato da uno strumento che permette di stimare quantitativamente gli indicatori di prestazione del sistema.

Al riguardo, viene di seguito proposto un innovativo Strumento di Analisi, pensato in modo da creare un collegamento tra l'insieme delle specifiche caratteristiche tecniche dei sistemi BRT e quello dei rispettivi indicatori di prestazione, operando come una funzione avente come dominio il primo insieme e come codominio il secondo (vedi Figura 9).

Lo Strumento di Analisi in questione si basa sulla tecnica della microsimulazione ed è stato denominato TRANSIMT (TRansit ANalysis SIMulation Tool).

Per l'implementazione si è utilizzato un software multipurpose, ARENA pensato per rappresentare processi e offrendo una interfaccia più agevole di un linguaggio di programmazione evoluto senza però compromettere le possibilità di personalizzare esigenze lo sviluppo del modello secondo le

priu stringenti e fornendo anche la possibilità di una rappresentazione grafica del la simulazione che oltre che coreografica rappresenta un funzionale strumento integrativo di analisi e verifica.

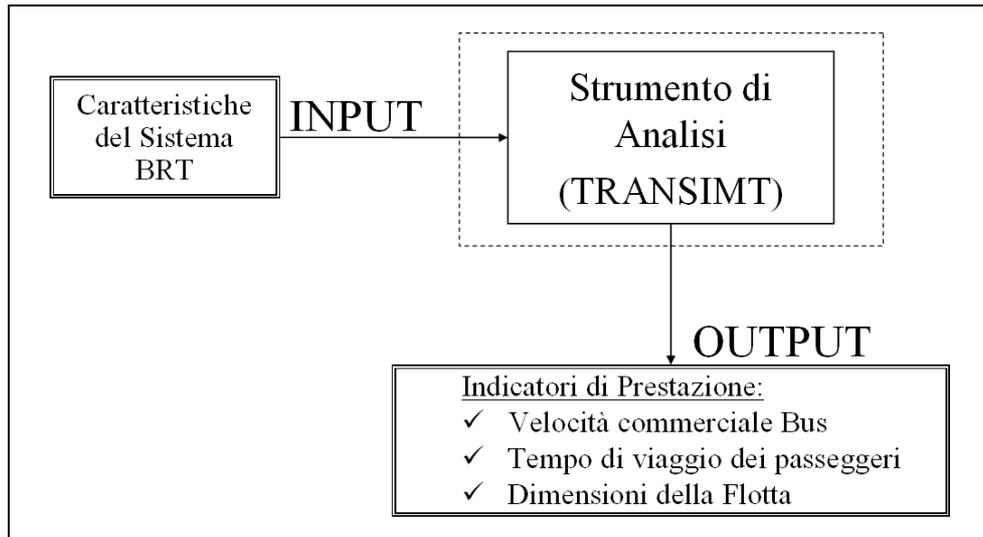


Figura 9: Il collegamento tra Caratteristiche dei BRT ed i rispettivi Indicatori di prestazione

La modellizzazione a fronte della complessità del sistema è stata condotta prevedendo:

- la modellizzazione dei veicoli del trasporto pubblico lungo il percorso del sistema BRT, e
- la modellizzazione dei singoli utenti nel loro spostamento Origine Destinazione

4.2 La modellizzazione dei veicoli

Il TRANSIMT nasce per l'analisi dei sistemi BRT in sede propria, in assenza di interferenze da parte del traffico veicolare privato.

Per modellizzare il tracciato lungo il quale i veicoli svolgono il servizio, questo è stato discretizzato in tratte ciascuna delle quali con caratteristiche omogenee. Ogni tratta è definita dalla presenza nel suo punto terminale di un elemento infrastrutturale-funzionale che per sua natura può interferire con la marcia indisturbata del veicolo. In questo studio, gli elementi

considerati come possibili terminali di tratta sono le Stazioni di fermata passeggeri e gli Impianti semaforici. da un punto funzionale la singola tratta viene quindi suddivisa in una sezione iniziale ed una finale da un punto nel quale si determina il comportamento del veicolo in funzione dello stato dell'elemento terminale.

In tali ipotesi, si è potuto schematizzare il moto del veicolo lungo la generica tratta, mediante fasi logiche successive (Figura 10) per le quali la tratta è suddivisa in due sottotratte, la sezione iniziale e la sezione finale, la prima delle quali il veicolo inizia a percorrere secondo un diagramma di moto selezionato ad hoc in base alla velocità di ingresso nella tratta, al limite di velocità esistente e alla lunghezza, arrivando all'ingresso della seconda, posizionato in funzione della velocità di marcia del veicolo e della distanza dal punto di fine tratta, e quindi seguendo un secondo diagramma di marcia in funzione dello stato del punto di fine tratta (semaforo o fermata) che può prevedere o meno la fermata del veicolo.

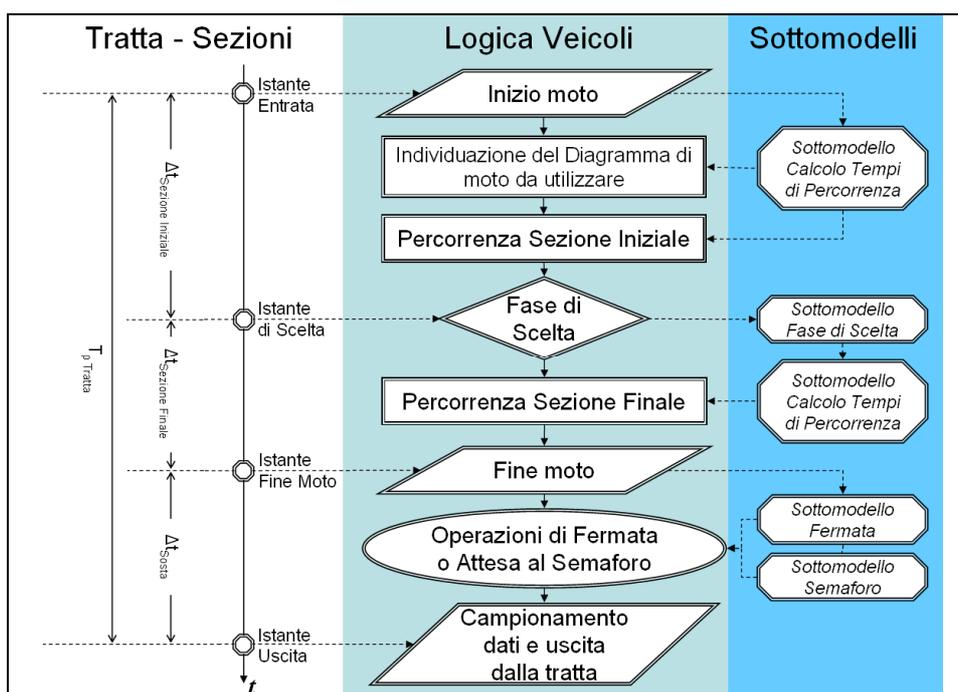


Figura 10: Logica seguita dai veicoli nelle operazioni di trasporto e rispettivi sottomodelli per il calcolo delle scelte, dei tempi di percorrenza e dei tempi di sosta.

Il TRANSIMT è stato dotato di vari sottomodelli, ognuno dei quali dedicato ad una specifica operazione di calcolo.

La potenza del sottomodello sviluppato per il calcolo dei tempi di percorrenza è di riuscire a combinare le equazioni cinematiche del moto, in funzione delle caratteristiche del tracciato ed allo stato del sistema. Il risultato ottenuto è un generico diagramma di marcia che si compone mentre il veicolo percorre la tratta, in funzione delle decisioni prese dal conducente del veicolo sulla base della valutazione delle esigenze dell'utenza in fermata e a bordo e degli impianti fissi per la regolazione del traffico presenti lungo il percorso.

La forma assunta dal diagramma di moto descritto da un veicolo durante l'attraversamento di una tratta può essere di forma triangolare o trapezoidale. Ciò dipende dal fatto che la massima velocità raggiunta dal veicolo nella tratta può essere maggiore o minore del limite di velocità in essa imposto.

Gli elementi che condizionano la forma del diagramma di moto sono le condizioni iniziali del moto (velocità iniziale), le caratteristiche tecniche del veicolo (accelerazione media e decelerazione media), le possibili interferenze di fine tratta (es: un semaforo che richiede l'arresto del veicolo), la lunghezza della tratta, la velocità limite della tratta percorsa e quella imposta su quella successiva.

In teoria sappiamo che la velocità massima raggiungibile all'interno di una tratta da un veicolo, in assenza di limiti di velocità, vale

$$(1) \quad v_{\max \text{ tria}} = \sqrt{\frac{2L + \frac{v_0^2}{a_m} + \frac{v_{fin}^2}{a'_m}}{\left(\frac{1}{a_m} + \frac{1}{a'_m}\right)}}$$

dove

L : lunghezza totale della tratta;

v_0 : velocità del veicolo in entrata nella tratta;

v_{fin} : velocità desiderata per il veicolo in uscita dalla tratta;

a_m : accelerazione media del veicolo;

a'_m : decelerazione media del veicolo.

Se consideriamo la possibilità di dover arrestare il veicolo al termine della tratta dobbiamo imporre nella equazione (1) che sia $v_{fin} = 0$ e pertanto, la velocità massima raggiungibile sarà

$$(2) \quad v_{\max \text{ tria}} = \sqrt{\frac{2L + \frac{v_0^2}{a_m}}{\left(\frac{1}{a_m} + \frac{1}{a'_m}\right)}}$$

Confrontando il valore della $v_{\max \text{ tria}}$ ricavato dall'equazione (2) con il valore della velocità limite v_{\lim} , si può individuare univocamente il diagramma di moto che verrà descritto dal veicolo.

Infatti, si otterrà un

- ✓ diagramma triangolo se $v_{\max \text{ tria}} \leq v_{\lim}$; oppure
- ✓ diagramma trapezio se $v_{\max \text{ tria}} > v_{\lim}$.

Si assume per ipotesi che tutti gli elementi infrastrutturali sottoposti alla valutazione del conducente rientreranno nella sua distanza di visibilità.

TRANSIMT è stato dotato di specifici algoritmi, rispettivamente illustrati nelle seguenti Figura 11 e Figura 12, per la simulazione dei processi di scelta svolti dai conducenti in corrispondenza di:

- Stazioni di Fermata passeggeri
- Impianti Semaforici

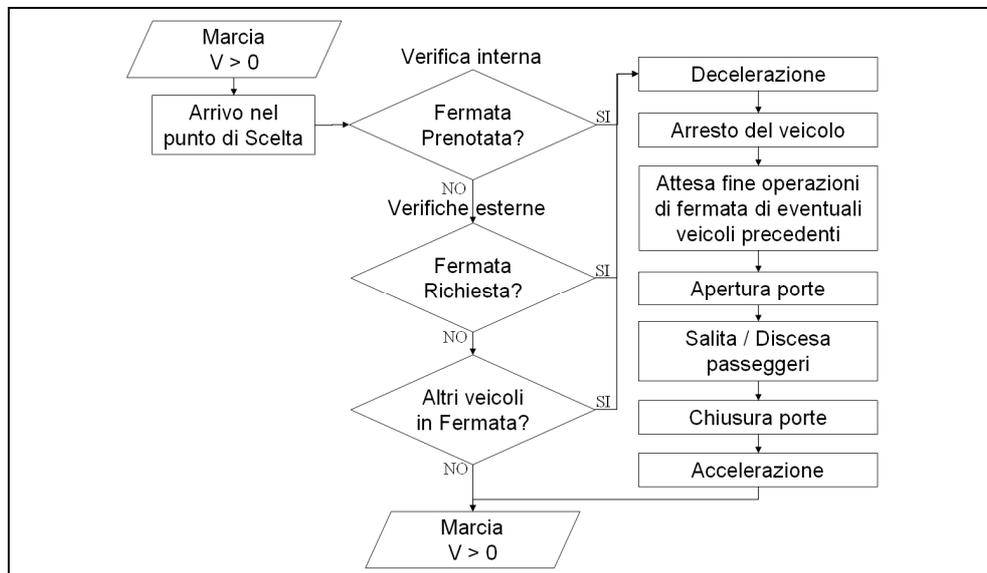


Figura 11: Fase di Scelta in corrispondenza di una Stazione di Fermata passeggeri

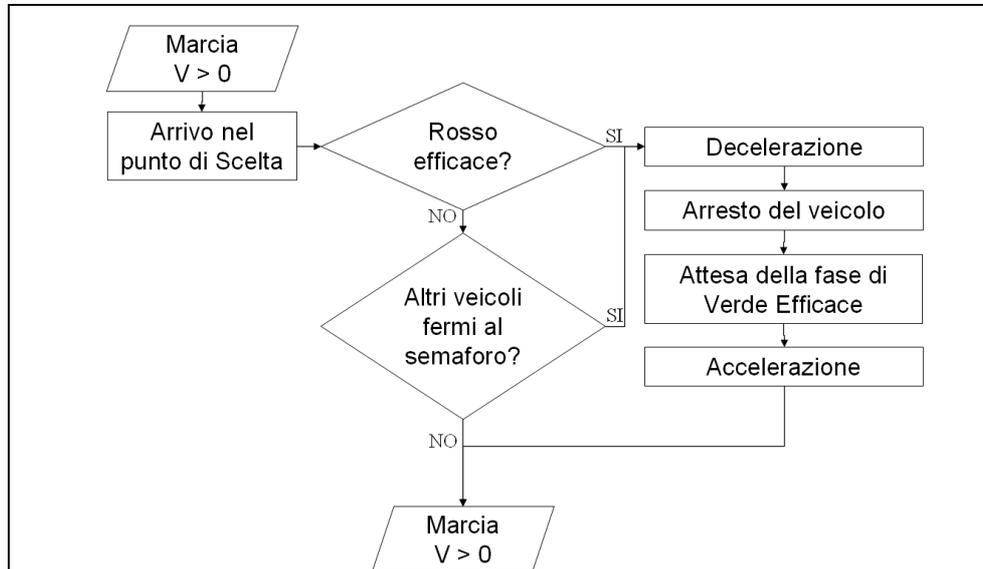


Figura 12: Schema della Fase di Scelta in corrispondenza di un Impianto Semaforico

Nel caso di fermate richieste da utenti a bordo o presenti in banchina, durante l'intervallo di tempo in cui avviene la sosta il veicolo si trova fermo nel punto terminale della tratta. Qui vengono aperte e chiuse le porte, permettendo prima la salita e poi la discesa dei passeggeri, oppure si attende una nuova fase semaforica di verde.

Si è ipotizzato che la banchina permetta lo svolgimento delle operazioni di un solo veicolo alla volta. Pertanto, se questa è già occupata da un veicolo, il successivo dovrà attendere la fine delle operazioni del veicolo precedente per effettuare le proprie.

E' inoltre possibile assegnare una velocità di salita e di discesa per i passeggeri.

Al termine di queste operazioni il mezzo esce dalla Tratta.

L'intervallo di Sosta viene valutato come la differenza tra l'istante in cui termina il moto e l'istante di uscita dalla tratta.

Ogni impianto semaforico è caratterizzato da proprio Tempo di ciclo, suddiviso nelle fasi semaforiche di verde e di rosso e giallo. E' inoltre possibile impostare lo sfasamento relativo all'inizio del ciclo rispetto all'impianto precedente.

Possono essere simulati sia impianti semaforici a ciclo fisso che attuati dal traffico, che permettono di fornire la priorità semaforica al trasporto pubblico.

In ogni caso, ogni volta che un veicolo esce da una tratta vengono immagazzinate tutte le informazioni necessarie a ricostruirne lo spostamento al suo interno.

La rappresentazione di una linea di trasporto collettivo in sede riservata all'interno di un contesto urbano cittadino presenta le maggiori criticità in corrispondenza delle fermate e dei semafori.

In particolare, va posta una speciale attenzione a quelle configurazioni infrastrutturali caratterizzate da successioni ravvicinate di elementi che possono richiedere una fermata del veicolo. Ad esempio, è possibile incontrare delle sequenze tipo:

- Semaforo-Semaforo;
- Semaforo-Fermata;
- Fermata-Semaforo.

In letteratura vengono distinti delle configurazioni infrastrutturali notevoli in funzione del posizionamento della Stazione di Fermata nei confronti degli impianti semaforici. E' possibile distinguere i seguenti casi:

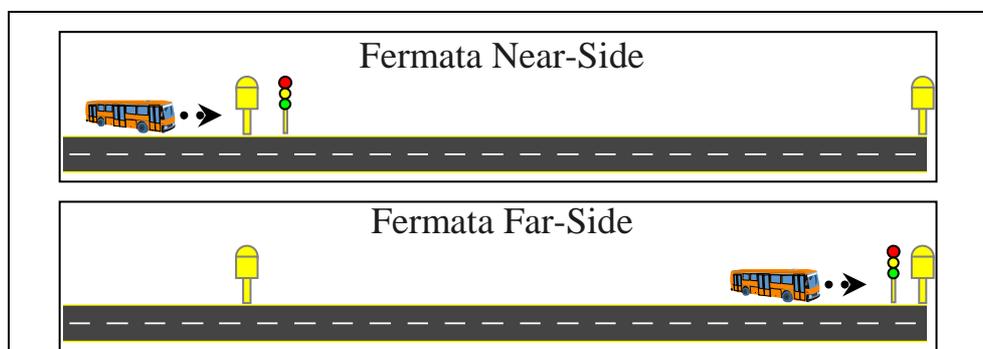


Figura 13: Configurazioni di fermata di tipo Near-side e Far-side

In tali occasioni, infatti, il conducente del veicolo, al fine di assicurarsi un sufficiente spazio di frenatura, potrebbe essergli indispensabile verificare se l'elemento terminale della tratta successiva richieda o meno l'arresto del veicolo.

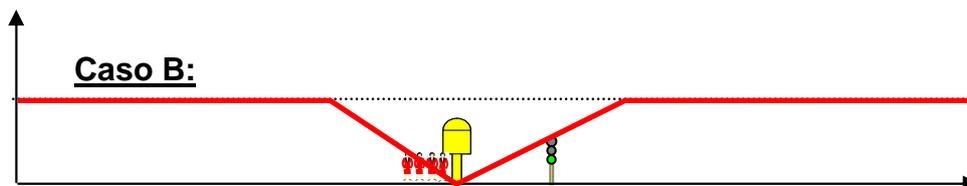
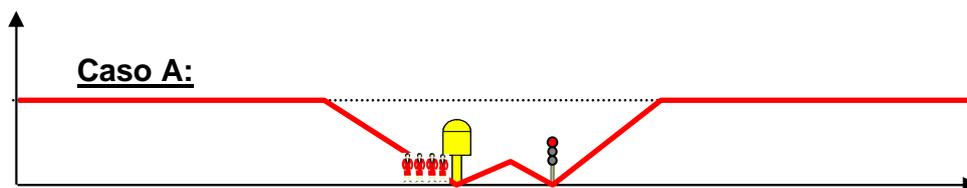
Il TRANSIMT è stato reso in grado di analizzare anche questo tipo di situazioni.

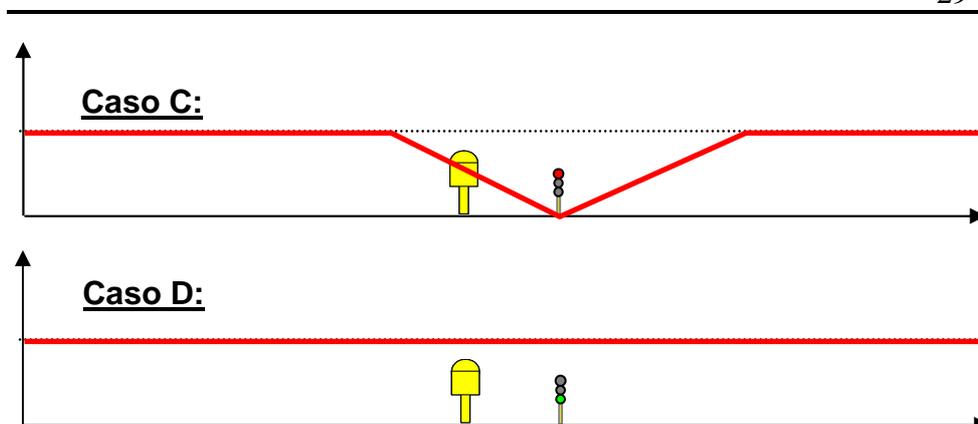
Nel caso di una Fermata Near-Side, ad esempio, si possono avere le combinazioni di eventi descritti nella seguente Tabella 5:

		<i>ROSSO SEMAFORICO</i>	
		<i>SI</i>	<i>NO</i>
<i>Richiesta fermata dagli utenti (a bordo o in banchina)</i>	<i>SI</i>	<i>SI</i> CASO A	<i>SI</i> CASO B
	<i>NO</i>	<i>NO</i> CASO C	<i>NO</i> CASO D

Tabella 5: Combinazioni di Richieste di fermata e di Libero passaggio del veicolo per una Configurazione di Stazione di Fermata Near-Side

Pertanto, l'andamento qualitativo dei diagrammi di marcia per ciascuna delle combinazioni sopra schematizzate è:





Nei casi A e B la fermata passeggeri verrà effettuata indipendentemente dallo stato del sistema semaforo.

Nei casi C e D invece, poichè non c'è richiesta da parte degli utenti, il conducente si comporterà come se la fermata non esistesse e l'andamento della marcia del veicolo verrà determinata solo dallo stato del successivo impianto semaforico.

Inoltre, nel caso C, il conducente del veicolo, entrando nella tratta successiva (in Figura 14 è quella che termina con l'impianto semaforico), effettuerà una nuova verifica sullo stato dell'impianto semaforico e, se questo sarà passato alla fase di verde, il veicolo proseguirà il proprio moto mediante una nuova fase di accelerazione.

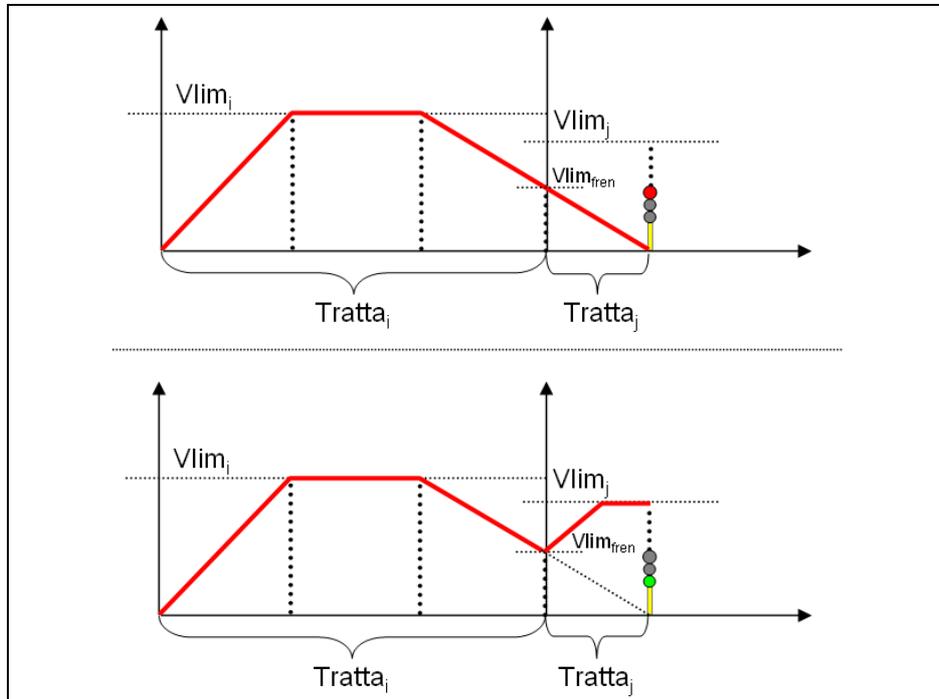


Figura 14: diagrammi di moto nella fase di passaggio da una tratta alla successiva

E' chiaro che tutti i veicoli sono tenuti al rispetto dei limiti di velocità imposti sulle tratte; nel caso in cui i limiti vigenti su tratte contigue siano differenti, è necessario raccordare i diagrammi di moto dei veicoli.

In particolare, si è considerato sia il passaggio da una tratta ad un'altra con limite di velocità maggiore rispetto alla prima (*caso a*), ovvero il caso opposto (*caso b*).

Pertanto, si ha

➤ Caso a: $V_{lim_i} > V_{lim_j}$

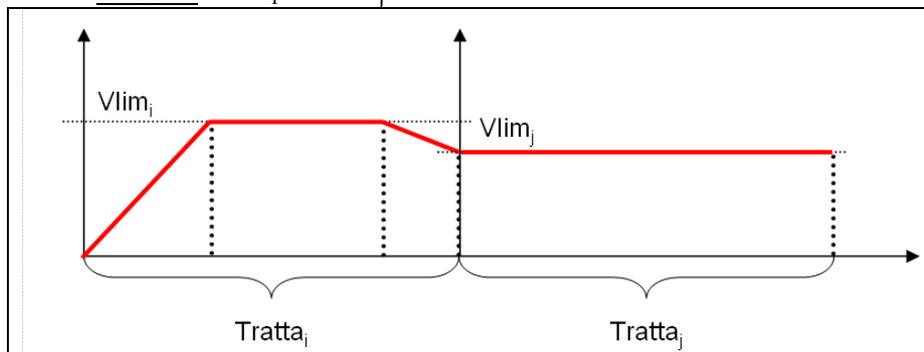


Figura 15: Passaggio da una tratta ad un'altra con limite di velocità più basso

Nel caso a, prima di entrare nella tratta successiva, il veicolo descrive una manovra di decelerazione, al fine del rispetto dei limiti di velocità.

➤ Caso b: $V_{lim_i} \leq V_{lim_j}$

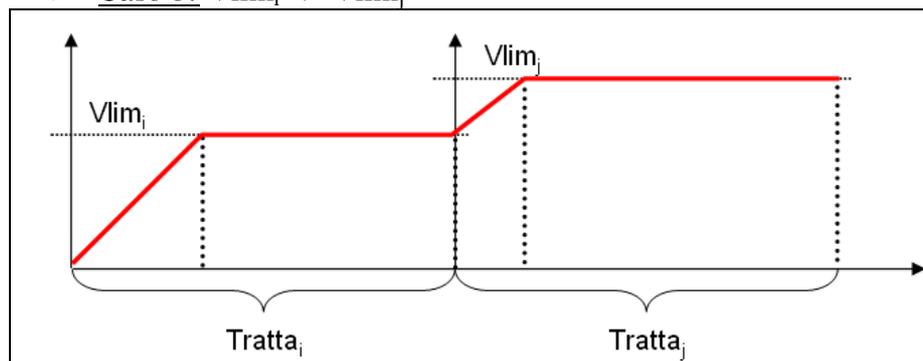


Figura 16: Passaggio da una tratta ad un'altra con limite di velocità più alto

Nel caso b, il veicolo potrà procedere effettuando una nuova manovra di accelerazione, fino a raggiungere la nuova velocità massima consentita. Quando nel passaggio tra tratte successive il limite di velocità è lo stesso, la corsa del veicolo manterrà un andamento costante.

4.3 La modellizzazione degli utenti

La valutazione complessiva di un sistema di trasporto è tanto influenzata dai costi capitali di realizzazione e dai costi di esercizio, quanto dall'efficienza del servizio in termini di tempo di attesa dell'utenza e di affidabilità.

Inoltre, il tempo di attesa dell'utenza in banchina, oltre a dipendere dalla regolarità del servizio di offerta, è influenzato dal bilanciamento tra la scelta della frequenza di servizio e quella della capacità teorica dei veicoli. Infatti, per un utente in attesa in banchina, il passaggio di un bus sovraffollato equivale ad una corsa soppressa, ovvero ad un innalzamento del proprio tempo medio di attesa.

Tuttavia, si evidenzia che i metodi per valutare l'attesa media dell'utenza in banchina oggi presenti in letteratura, basandosi sui tempi di passaggio dei veicoli, effettuano un'analisi di tipo indiretto.

Per tali ragioni il TRANSIMT è stato reso in grado di valutare il tempo di attesa dell'utenza in banchina in modo diretto, simulando l'attesa e lo spostamento di ogni singolo passeggero ed eseguendo una media aritmetica di tutti i valori di attesa misurati, suddividendoli per stazione di fermata di origine.

A ciò si aggiungono le considerazioni sul dimensionamento del servizio, sulla capacità dei mezzi e sulla regolarità del servizio che sono biunivocamente connessi alla domanda.

Per caratterizzare l'utenza è stato necessario definire:

- ✓ Il tasso di arrivo alla stazione di fermata di origine (h);
- ✓ Matrice OD dei passeggeri.

Viene inoltre postulata l'ipotesi semplificativa secondo la quale il veicolo scelto dall'utente per effettuare il proprio spostamento sarà il primo veicolo in arrivo in banchina che gli permetterà di raggiungere la propria destinazione o di avvicinarsi ad essa, senza però superarla.

Il diagramma che descrive le azioni e le scelte dei passeggeri è riportato nella seguente Figura 17.

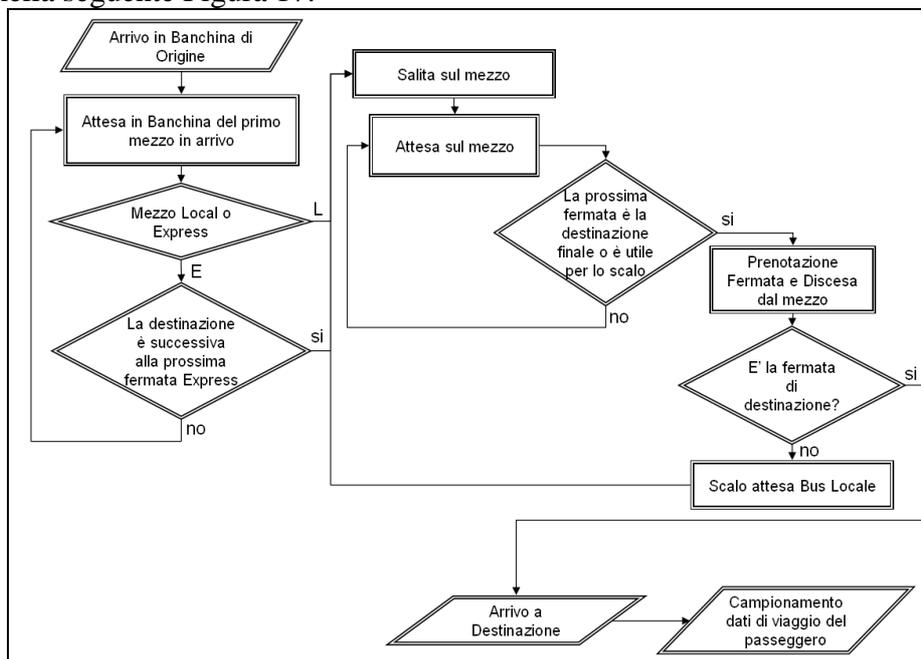


Figura 17: Le attese e le scelte di viaggio del passeggero

Considerando l'ipotesi di sovrapposizione sul percorso di servizi locali e servizi express, per le scelte in fermata di ciascun utente è stato assunto il criterio generale di salire sul primo veicolo in arrivo in banchina (con capacità residua non nulla) che permetta di raggiungere la propria destinazione o di avvicinarsi ad essa, senza però superarla.

Alla luce delle ipotesi fatte, si deduce che ogni utente in partenza dalla propria banchina di origine ha a disposizione tre alternative di viaggio per arrivare a destinazione, due delle quali non prevedono scali intermedi.

La prima alternativa (senza scalo qualunque sia la destinazione finale dell'utente) si verifica quando il primo veicolo utile in arrivo in banchina è Bus che effettua un servizio locale su tutte le fermate (Figura 18).

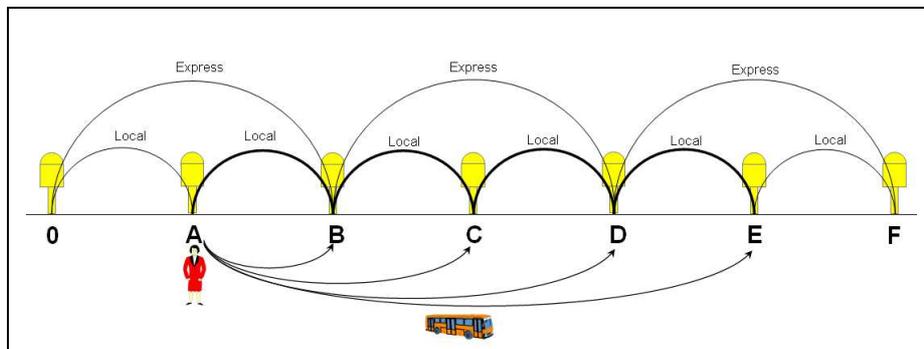


Figura 18: Spostamento senza scalo effettuato con bus a servizio locale

La seconda alternativa (senza scalo) si verifica quando il primo veicolo utile in arrivo in banchina è un bus a servizio Express che ha tra le fermate del proprio programma di esercizio anche quella di destinazione dell'utente (Figura 19).

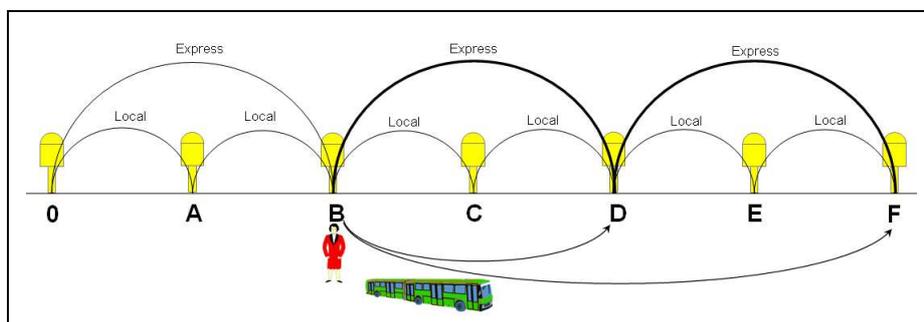


Figura 19: Spostamento senza scalo effettuato con bus a servizio Express

La terza (con scalo) si verifica quando il primo veicolo in arrivo alla banchina di partenza è un bus a servizio Express, che non ha tra le fermate del proprio programma di esercizio quella di destinazione dell'utente. In tal caso, l'utente prenderà il bus express per poi scendere alla fermata precedente più vicina a quella di destinazione, per effettuare uno scalo. L'utente che effettua scalo prenderà il primo bus a servizio locale che lo porterà a destinazione (Figura 20).

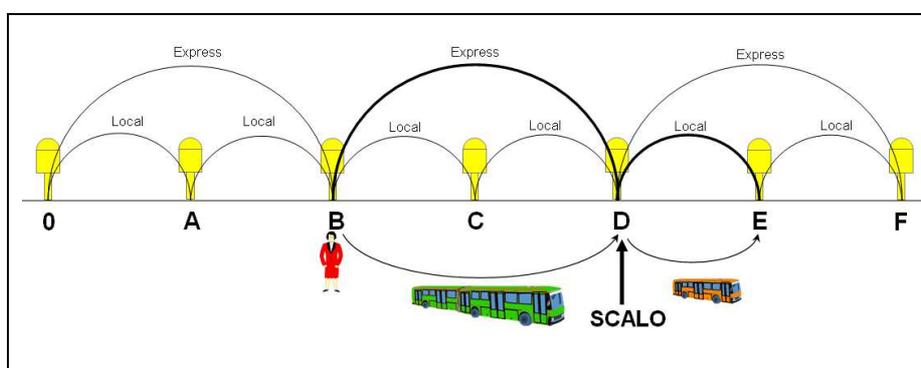


Figura 20: Passaggio da una tratta ad un'altra con limite di velocità più alto

Pertanto, se l'utente non effettua scalo, si ha

$$\Delta T_{\text{Spostamento}} = \Delta T_{\text{Attesa in banchina di Origine}} + \Delta T_{\text{Viaggio a bordo}}$$

Se, invece, l'utente effettua scalo in una stazione di fermata intermedia per arrivare a destinazione, si ha:

$$\Delta T_{\text{Spostamento}} = \Delta T_{\text{Attesa in banchina di Origine}} + \Delta T_{\text{viaggio nel 1° mezzo}} + \Delta T_{\text{Attesa in banchina per lo scalo}} + \Delta T_{\text{viaggio nel 2° mezzo}}$$

4.4 *Gli Input e Gli Output del Modello*

Una peculiarità dei modelli di micro simulazione è quella di poter potenzialmente rappresentare con un dettaglio molto elevato i fenomeni, quindi considerando tanti fattori di natura deterministica o con una componente aleatoria più o meno marcata che possono avere una qualche relazione con gli aspetti oggetto di specifico esame.

Gli input di cui necessita il modello TRANSIMT sono le tutte le informazioni che definiscono e caratterizzano l'infrastruttura, i veicoli, il servizio e la domanda:

Infrastruttura

- ✓ Distanze progressive tra ogni Stazione di Fermata e impianti semaforici
- ✓ Limite di velocità imposto in ogni tratta

Domanda

- ✓ Matrice OD con origini e destinazioni associati alle fermate del sistema BRT
- ✓ Legge di distribuzione nel tempo per l'arrivo dei passeggeri per ciascuna femata di origine degli spostamenti

Veicoli

- ✓ Accelerazione media
- ✓ Decelerazione media
- ✓ Velocità massima raggiunta dal veicolo
- ✓ Orari di partenza delle corse
- ✓ Capacità
- ✓ Tempi di incarrozzamento per passeggero

Impianti semaforici

- ✓ Tipo di regolazio semaforica per ogni impianto: a ciclo fisso o con priorità al trasporto pubblico.
- ✓ Distanze progressive in cui si collocano gli impianti semaforici
- ✓ per gli Impianti semaforici a Ciclo fisso vanno specificati:
 - durata del ciclo
 - fasatura
 - tempi di verde
 - tempi di rosso
 - tempo di tuttorosso
 - Sfasamento iniziale

Servizio

- ✓ Frequenza delle partenze delle corse.

Durante le simulazioni effettuate con il TRANSIMT vengono raccolti i dati necessari a definire gli indicatori di prestazione del servizio offerto. Le successive elaborazioni di tali informazioni permettono di ottenere:

- ✓ Il Tempo totale di viaggio medio e la sua varianza;
- ✓ Velocità commerciale media;
- ✓ Coefficiente di riempimento medio e massimo;
- ✓ I diagrammi spazio-tempo;
- ✓ Le curve di riempimento;
- ✓ Analisi prestazionale degli Impianti Semaforici;
- ✓ L'analisi dei distanziamenti temporali tra veicoli successivi;
- ✓ Tempo medio di attesa dell'utenza in banchina;
- ✓ Classificazione % dei Tattesa in bachina dei passeggeri (Normale, Eccessivo ed Inaccettabile);
- ✓ Istogramma delle Velocità commerciali medie di spostamento dell'utenza al variare della fermata di Origine per raggiungere la propria destinazione.

Si tratta di analisi che possono essere svolte anche su aspetti puntuali con le possibilità di reciproca correlazione e le disaggregazioni per tipologia, fasce orarie ed ambiti spaziali.

5 Validazione del Modello

Per validare il TRANSIMT si è preso come riferimento i risultati riportati nell'articolo intitolato "*Evaluation framework for Bus Rapid Transit systems performance*", (Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M. Conferenza "The capacity of Transport Systems: arcs, nodes, services and technologies" Università IUAV di Venezia 2009). In tale articolo, mediante l'applicazione di modelli teorici disaggregati, sono state valutate le prestazioni di un servizio di tipo locale (tutte le fermate) su una infrastruttura dalle caratteristiche ideali, caratterizzata da un distanziamento costante tra le stazioni di fermata e dall'assenza di impianti semaforici. Tale scenario di seguito verrà denominato Configurazione A.

Inoltre, per verificare la capacità del TRANSIMT di valutare le prestazioni di servizio di una linea in presenza di impianti semaforici, è stato costruito un secondo scenario, denominato Configurazione B, che verrà ottenuto da uno scenario con Configurazione di tipo A, inserendo tra ogni stazione di fermata passeggeri e la successiva un impianto semaforico a ciclo fisso.

Pertanto la Configurazione A sarà:

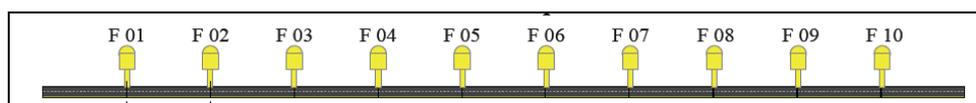


Figura 21: Infrastruttura con Configurazione di tipo A

Mentre la Configurazione B sarà:

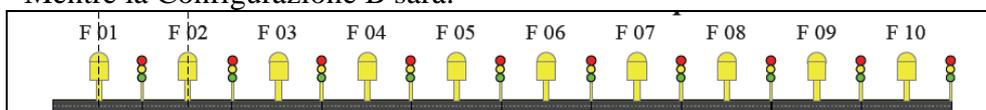


Figura 22: Infrastruttura con Configurazione di tipo B

5.1 Gli scenari di domanda e di offerta

Entrambi gli scenari di servizio di riferimento sono caratterizzati da un servizio di offerta composto da soli bus di capacità pari a 100 posti,

circolanti su di un tracciato su cui sono state disposte, in modo equidistante l'una dall'altra, 10 stazioni di fermata passeggeri.

Il numero di mezzi che sono stati fatti circolare sull'intero tracciato è pari a 30.

Per la Configurazione B tutti gli impianti semaforici sono caratterizzati da un ciclo fisso con Rosso+Giallo= 80 sec; Verde = 40 sec; sfasamento = 120 sec.

Sono state effettuate diverse simulazioni variando, per ogni configurazione, la distanza tra le fermate (D), intervallo di tempo tra l'arrivo di un passeggero ed il successivo in fermata (h), il distanziamento temporale tra bus successivi (H), secondo i seguenti valori:

- ✓ $D = \{200 \text{ m}; 400 \text{ m}; 800 \text{ m}; 1200 \text{ m}\}$;
- ✓ $h = \{16,2 \text{ sec}; 27 \text{ sec}; 54 \text{ sec}\}$;
- ✓ $H = \{120 \text{ sec}; 180 \text{ sec}; 300 \text{ sec}; 600 \text{ sec}\}$.

5.2 I risultati

Simulato l'esercizio con l'intera flotta (complessivamente 30 bus) in servizio, è stata valutata la velocità commerciale media.

Per ciascuna configurazione di infrastruttura sono state effettuate diverse simulazioni, facendo variare la domanda ed il distanziamento medio fra le stazioni di fermata, in modo da poter tracciare delle curve caratteristiche di velocità commerciale media.

Nei diversi grafici di seguito riportati si rappresenta, per un determinato volume di domanda, 'andamento delle velocità commerciali medie dei veicoli stimate con il TRANSIMT al variare del distanziamento medio fra le fermate e della frequenza del servizio di offerta simulato.

Applicando il TRANSIMT ad una infrastruttura caratterizzata da una Configurazione di tipo A si ottiene:

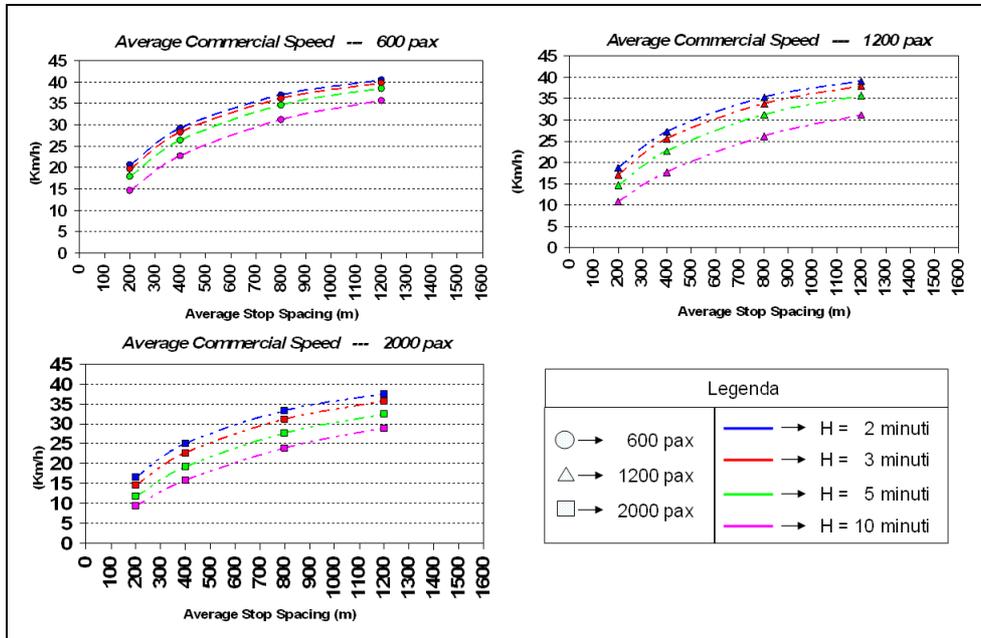
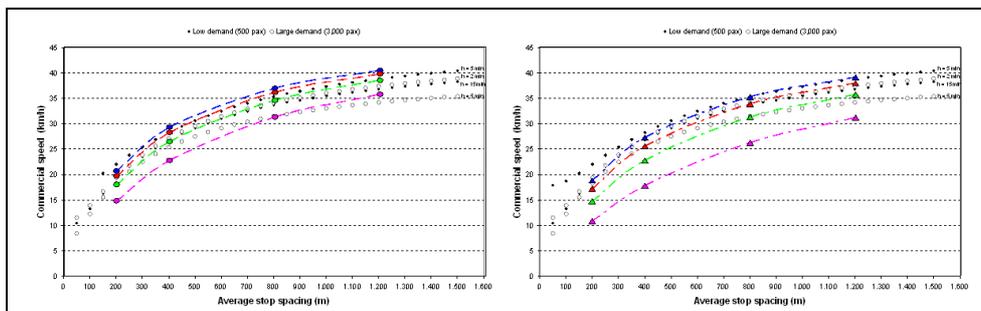


Figura 23: Configurazione A: curve di velocità commerciale media Bus

Sovrapponendo tali risultati a quelli riportati dallo studio “Evaluation framework for Bus Rapid Transit systems performance” per una Configurazione di tipo A, si ha:



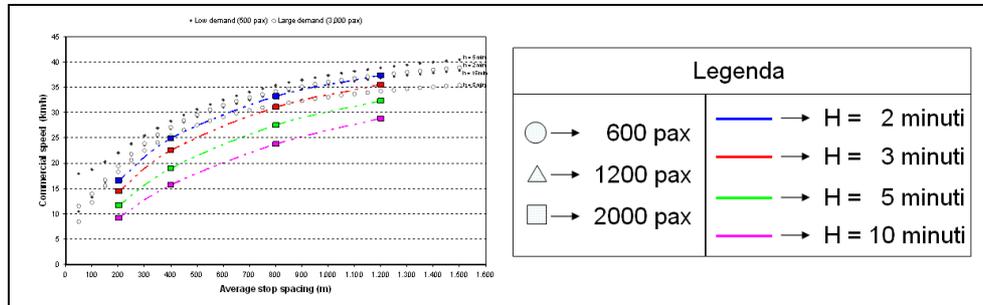
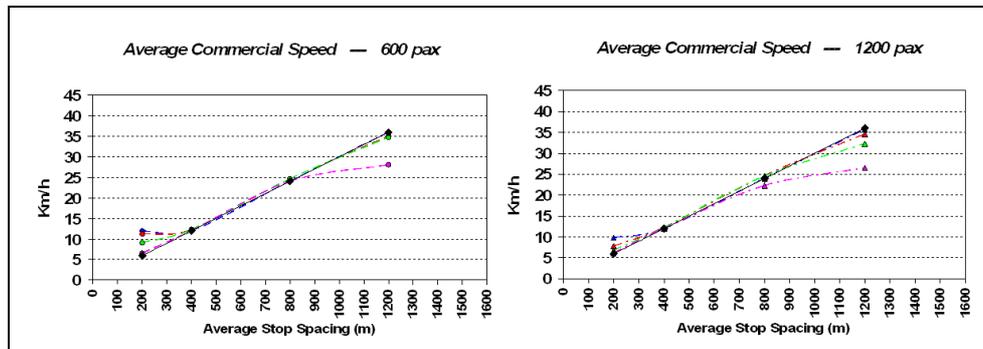


Figura 24: Sovrapposizione risultati TRANSIMT con risultati “*Evaluation framework for Bus Rapid Transit systems performance*” su una Configurazione di tipo A

Confrontando i risultati ottenuti dall’applicazione del modello di simulazione e del modello analitico, applicati alla stessa configurazione di infrastruttura, si evidenzia un andamento simile sia a livello qualitativo sia quantitativo delle velocità commerciali medie stimate.

Un sensibile vantaggio che viene fornito dall’uso del TRANSIMT è quello di poter valutare con semplicità le prestazioni di esercizio anche in presenza di impianti semaforici.

In particolare, di seguito vengono riportati i risultati ottenuti mediante l’applicazione del TRANSIMT ad una configurazione infrastrutturale di tipo B.



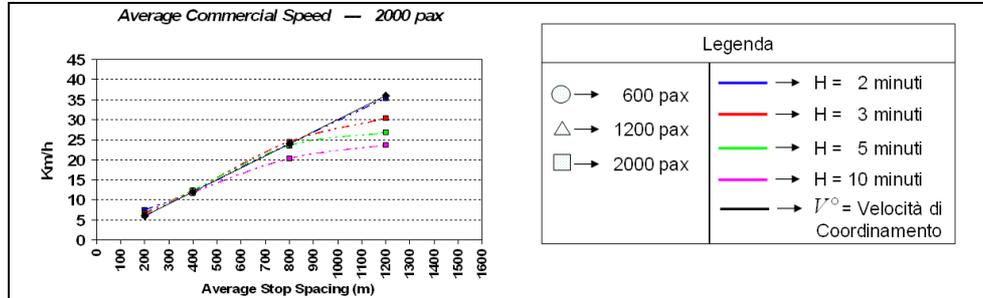


Figura 25: Configurazione B: curve di velocità commerciale media Bus

Viene definita velocità di coordinamento la

$$(3) \quad V^o = 3.6 \cdot \frac{L}{\Sigma} \quad (\text{Montella, B., 1996})$$

dove V^o viene espressa in Km/h, la lunghezza della tratta L in metri e lo sfasamento temporale tra gli impianti semaforici Σ in secondi.

Sovrapponendo i valori delle Velocità Commerciali dei veicoli ottenute nelle Configurazioni A e B, si ottiene:

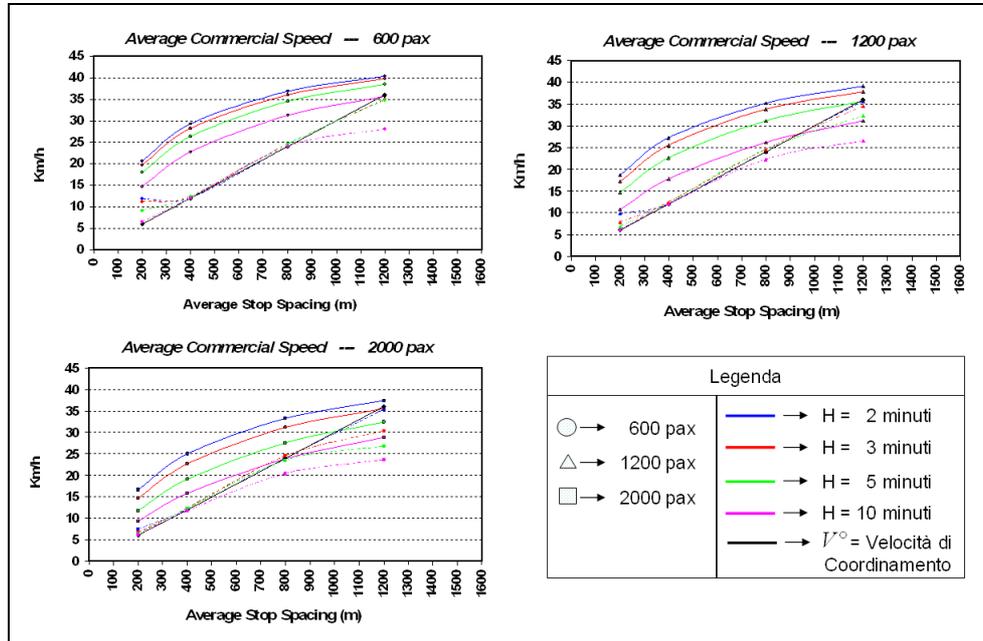


Figura 26: Confronto Configurazione A e B: curve di velocità commerciale Bus

Inoltre, è stata calcolata la velocità commerciale media di spostamento degli utenti nelle varie configurazioni di infrastruttura analizzate:

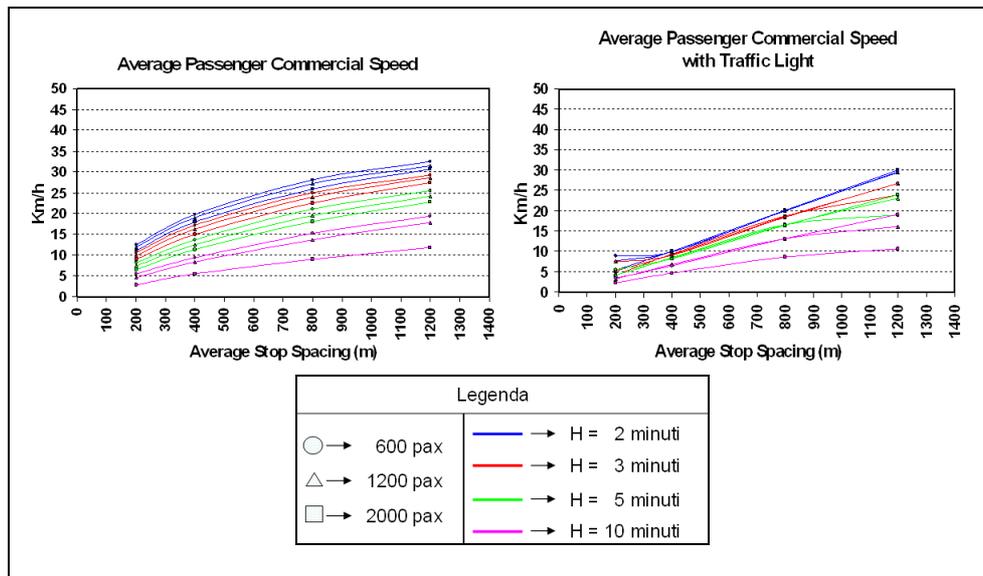


Figura 27: Curve di velocità commerciale nelle Configurazioni A e B per diversi livelli di frequentazione e di frequenza delle corse

6 Applicazione del TRANSIMT ad un caso reale: Il Corridoio Eur Fermi-Torrino a Roma

6.1 Il Corridoio Eur Fermi- Torrino

L'Amministrazione di Roma Capitale, attraverso le indicazioni fornite dal Piano Regolatore Generale, ha inteso delineare le linee guida di sviluppo nel settore della mobilità che dovranno, di qui ai prossimi anni, essere il punto di riferimento anche degli interventi infrastrutturali che saranno realizzati nella capitale.

Tra i vari interventi previsti rientrano a pieno titolo anche i “corridoi del trasporto pubblico” che sono nuove componenti del sistema della mobilità di capacità intermedia tra bus e metro.

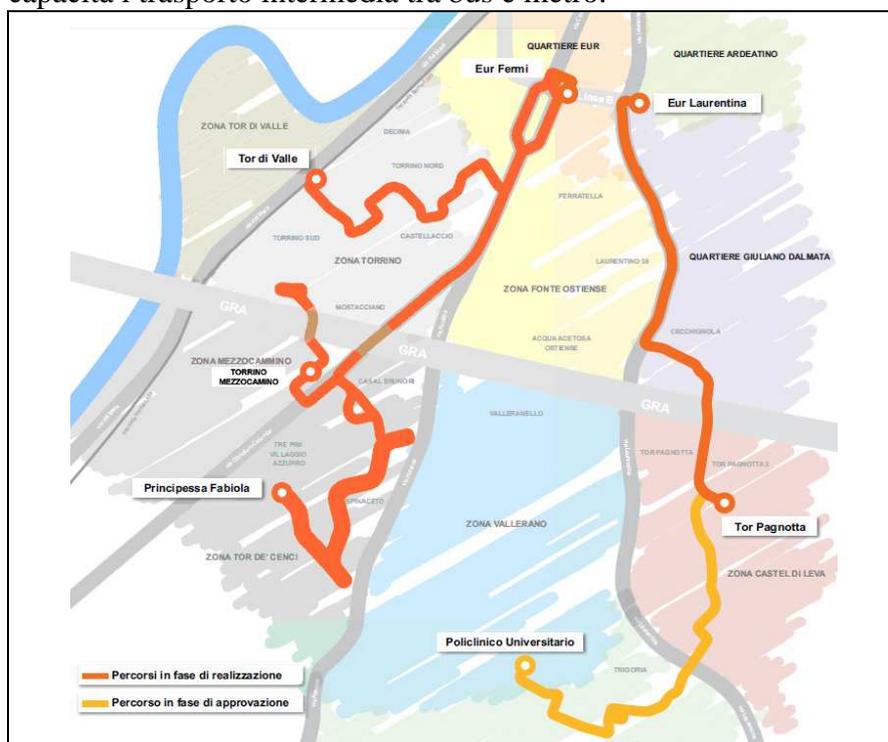


Figura 28: Il Corridoi della mobilità in progetto nel quadrante Sud della città di Roma

Al riguardo, sono attualmente in fase di progetto i seguenti corridoi di trasporto pubblico a servizio del quadrante Sud della Città di Roma:

- ✓ Eur Laurentina-Tor Pagnotta
- ✓ Tor Pagnotta-Trigoria
- ✓ Eur Fermi-Tor de' Cenci
- ✓ Eur Fermi-Torrino
- ✓ Eur Fermi-Tor di Valle

Per verificare le potenzialità del TRANSIMT su una caso reale, si è selezionato il percorso seguito dal corridoio EUR Fermi-Torrino in direzione uscente dal centro città.

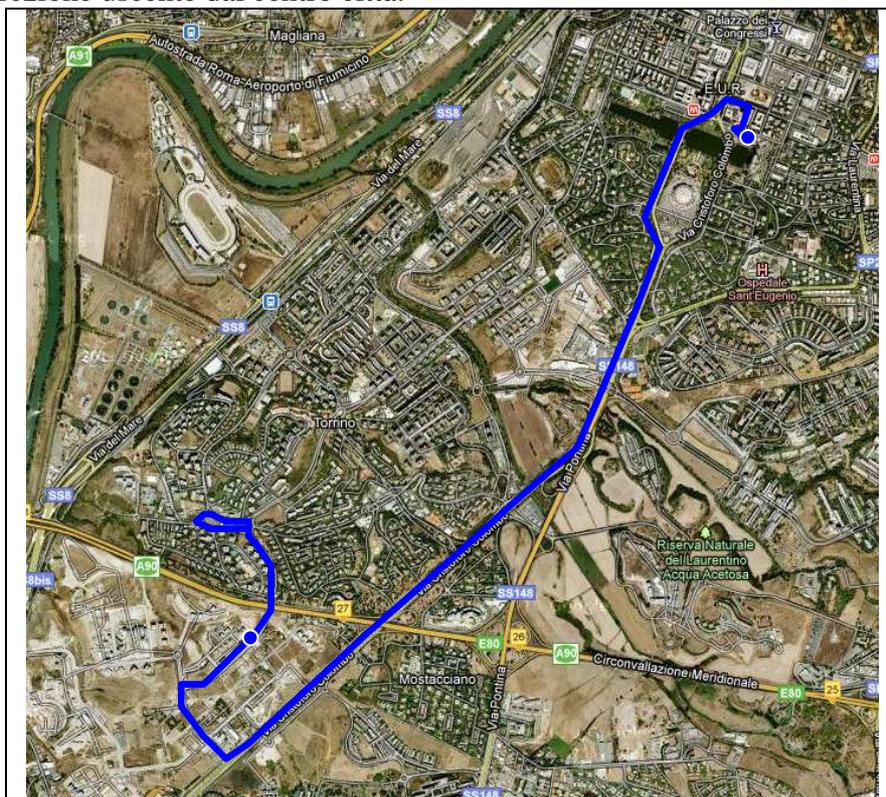


Figura 29: Itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino a Roma

L'obiettivo da raggiungere è quello di fornire gli elementi sufficienti per la valutazione comparativa di alcune proposte di programma di esercizio per il servizio di linea in esame.

6.2 La modellizzazione

Le principali caratteristiche del ramo di corridoio scelto sono:

- ✓ la lunghezza del percorso dal capolinea di partenza EUR Fermi al capolinea di arrivo Torino Mezzocammino è di 9060 metri (100% sede riservata);
- ✓ 14 Stazioni di fermata passeggeri (compresi i 2 capolinea);
- ✓ 5 intersezioni semaforizzate a ciclo fisso.

Caratteristica propria del corridoio è la scelta, in primo luogo per motivazioni ambientali, della trazione elettrica e dell'alimentazione di rete. L'opera comprende la realizzazione e gestione dell'impianto di alimentazione per la trazione elettrica (con relative sottostazioni e linea di contatto), dei semafori preferenziali e l'allestimento delle banchine di fermata.

Si riporta di seguito l'elenco delle Stazioni di fermata e dei capolinea del ramo di scelto, corredato delle rispettive distanze progressive e parziali:

Codice ID	Stazione di Fermata	Prog. (m)	Parz. (m)
A01	EUR FERMI	0	-
A02	EUROPA	540	540
S01		646	106
S02		814	168
A03	LAGHETTO EUR	1143	329
S03		1498	355
A04	NERVI	1705	207
S04		1738	33
A05	OCEANO ATLANTICO	2220	482
S05		2235	15
A06	IFO COLOMBO	4485	2250
A07	CONSORTI	6025	1540
A08	TORRINO MEZZOCAMMINO	6315	290
A09	PECHINO	7002	687
A10	MONTI DI TAI	7283	281
A11	CINA	7535	252
A12	MONTI DI TAI	8052	517
A13	PECHINO	8335	283
A14	TORRINO MEZZOCAMMINO	9060	725

Tabella 6: Elenco delle fermate e degli impianti semaforici dell'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torino

Gli impianti semaforici risultano posizionati principalmente nella parte iniziale del tracciato.

Inoltre, si è rilevato che i tempi di ciclo e le durate delle fasi di interesse assumono i seguenti valori:

	Sem01	Sem02	Sem03	Sem04	Sem05
Δ Verde (sec)	55	104	82	94	66
Δ Giallo (sec)	4	4	4	4	4
Δ Rosso (sec)	96	32	54	42	70
Tempo di Ciclo (sec)	155	140	140	140	140
Sfasamento iniziale (sec)	0	122	137	140	140

Tabella 7: Tempi di ciclo e delle fasi degli impianti semaforici dell'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino

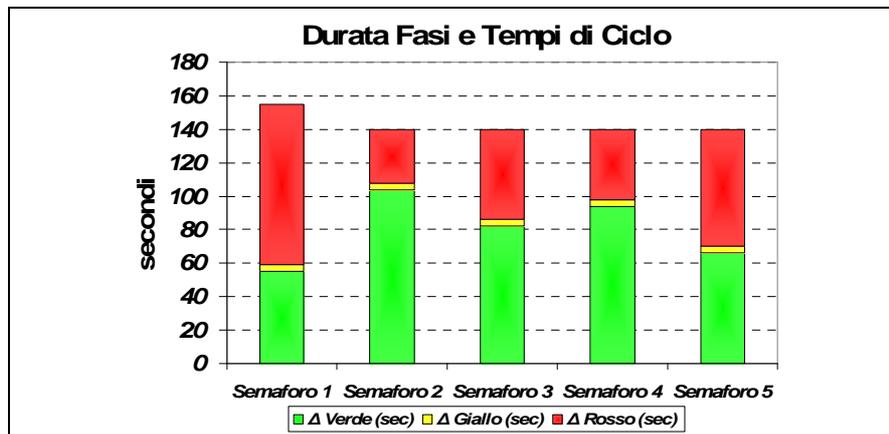


Figura 30: Grafici dei Tempi di ciclo e delle fasi degli impianti semaforici dell'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino

6.3 La modellizzazione della domanda

Con l'obiettivo di simulare la fascia oraria di punta della pomeriggio, la matrice OD degli spostamenti è stata estratta da quella complessiva per l'intera città di Roma in uso in un modello di macrosimulazione e stimata sulla base di indagini campionarie e rilievi di traffico.

Dal modello di macrosimulazione opportunamente aggiornato inserendovi il nuovo sistema di trasporto si sono ottenuti i saliti e discesi alle diverse fermate come rappresentati nella tabella e nella figura seguenti.

Nome Fermata	Saliti	Discesi
EUR FERMI	1094	0
EUROPA	196	0
LAGHETTO EUR	0	0
NERVI	8	14
OCEANO ATLANTICO	16	18
IFO COLOMBO	22	394
CONSORTI	0	94
TORRINO MEZZOCAMINO	14	57
PECHINO	0	155
MONTIDITAI	0	270
CINA	0	348
MONTIDITAI	0	0
PECHINO	0	0
TORRINO MEZZOCAMINO	0	0
Tot.	1350	1350

Tabella 8: Domanda di trasporto nell'ora di punta pomeridiana lungo l'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino

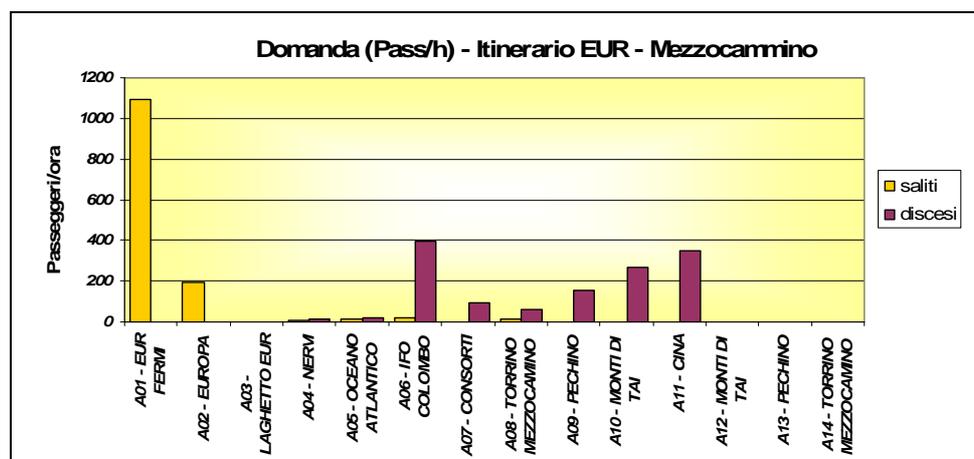


Figura 31: Grafici della domanda di trasporto nell'ora di punta pomeridiana lungo l'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torrino

Ancora l'applicazione della funzione di riconoscimento delle coppie OD sui singoli archi del modello opportunamente individuati ha consentito la ricostruzione della matrice Origine-Destinazione dei passeggeri:

Mat. OD	A 01	A 02	A 03	A 04	A 05	A 06	A 07	A 08	A 09	A 10	A 11	A 12	A 13	A 14	Gi
A01	0	0	0	11.87	15.17	327.9	76.34	46.29	123.6	215.3	277.5	0	0	0	1094
A02	0	0	0	2.13	2.72	58.75	13.68	8.29	22.14	38.57	49.71	0	0	0	196
A03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A04	0	0	0	0	0.11	2.42	0.56	0.34	0.91	1.59	2.05	0	0	0	8
A05	0	0	0	0	0	4.92	1.14	0.69	1.85	3.23	4.16	0	0	0	16
A06	0	0	0	0	0	0	2.27	1.38	3.68	6.41	8.26	0	0	0	22
A07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A08	0	0	0	0	0	0	0	0	2.81	4.89	6.3	0	0	0	14
A09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aj	0	0	0	14	18	394	94	57	155	270	348	0	0	0	

Tabella 9: Matrice OD dei passeggeri nell'ora di punta pomeridiana lungo l'itinerario di andata del Corridoio Eur Fermi-Torino

Il carattere della domanda fornita dal modello di macrosimulazione rispecchia l'utilizzo che l'utenza fa di tale linea di trasporto nell'ora di punta pomeridiana. Infatti, in tale fascia oraria, la domanda che utilizza il sistema di trasporto in analisi sarà composta in larga parte da una componente che, provenendo dalla fermata della metropolitana EUR Fermi, lo utilizza per raggiungere la propria abitazione, evitando l'uso del mezzo privato.

Infatti, le stazioni A01 ed A02 sono caratterizzate da una domanda di spostamento composta di soli utenti in partenza, essendo queste le prime due fermate del percorso più vicine alla fermata della metropolitana che vengono effettuate; viceversa nelle stazioni A07, A09, A10 ed A11 la domanda è di soli utenti in arrivo in quanto, essendo prossime al capolinea finale; infine, le fermate che non hanno utenza ne in partenza ne in arrivo sono la A03 (che collega un'area in si svolgono attività che in tale fascia oraria non producono domanda ne attraggono il bacino di utenza che utilizza la linea di trasporto in questa direzione), la A12, la A13 e la A14 (che saranno maggiormente utilizzate la mattina, quando l'utenza, partendo da casa, è interessata a raggiungere il centro della città).

La fermata a maggior richiesta di spostamento, quindi, è la A01, il capolinea terminale in direzione centro, a conferma della forte direzionalità centripeta della domanda dell'ora di punta pomeridiana e dell'integrazione del nuovo sistema nella rete consolidata del trasporto pubblico che all'Eur fermi conta su un importante nodo di scambio con la stazione della Metro B esistente.

6.4 Calibrazione del Modello

Il TRANSIMT permette di tener conto a livello qualitativo e quantitativo della componente aleatoria di molte delle grandezze che compongono il fenomeno.

Il modello consente di specificare tale componente singolarmente per ciascuna grandezza ed applicazione specifica, individuando la legge di distribuzione più confacente e calibrandola su dati storici disponibili.

Tali grandezze sono riassunte nella seguente tabella:

Grandezza	Tipo di Distribuzione	Rappresentazione grafica	Valore dei parametri
Accelerazione del veicolo	Triangolare		$\bar{a} = 1,13 \text{ m/s}^2$
Decelerazione del veicolo	Triangolare		$\bar{a}' = 2,26 \text{ m/s}^2$
Velocità massima raggiunta dal veicolo	Triangolare		$V_{\text{lim}} = 50 \text{ Km/h}$

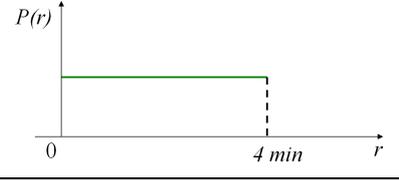
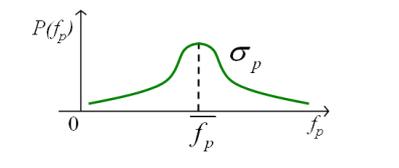
Ritardo/ Anticipo alla partenza del veicolo	Uniforme		$r_{max} = 4 \text{ min}$
Tasso di arrivo dei passeggeri in fermata	Normale		$\bar{f}_p = \text{variabile}$ secondo la fermata; $\sigma_p = 5 \text{ secondi}$ $\forall \text{ fermata.}$

Tabella 10: Componenti aleatorie da calibrare considerate nel TRANSIMT.

In questo studio si è scelto di applicare a tutte le corse un ritardo variabile r compreso tra 0 a 4 minuti, ovvero si è ipotizzato che ogni corsa si discosti dall'orario programmato di una quantità variabile di ± 2 minuti (partenze in anticipo o in ritardo).

Il valore medio tipico dell'accelerazione di un veicolo in pianura, che verrà ritenuta costante in questo studio, è di $1,5 \text{ m/s}^2$ per autobus nuovi. Per quanto riguarda la decelerazione del bus, al contrario dell'accelerazione, essa è limitata dal comfort dei passeggeri piuttosto che dalle caratteristiche meccaniche del mezzo. In questo studio si assume una decelerazione costante di $2,26 \text{ m/s}^2$ (Furth, P. G., 2006).

La velocità di salita e discesa dal veicolo degli utenti è stata considerata pari al valore di 1 passeggero/secondo sulla base di osservazioni sperimentali.

I veicoli considerati sono di due tipologie differenti:

- bus di lunghezza di 12 metri e capacità di trasporto 100 passeggeri,
- bus articolati di lunghezza 18 metri e capacità di trasporto 150 passeggeri

6.5 Scenari di simulazione

Si è ipotizzato un servizio di offerta con un programma di esercizio a frequenza costante che prevede partenze cadenzate dal capolinea di EUR FERMI ogni 4 minuti.

A parità di domanda di trasporto e programma di esercizio, sono stati simulati diversi scenari di servizio che si differenziano per la capacità dei veicoli utilizzati, la regolazione semaforica adottata ed il numero di stazioni di fermata per passeggeri presenti lungo la linea.

Le caratteristiche degli scenari considerati sono le seguenti:

- SCENARIO I) Capacità veicoli $C_v=100$ pax;
Regolazione semaforica a Ciclo fisso;
Numero fermate (per le corse in direzione centro): 14;
- SCENARIO II) Capacità veicoli $C_v=150$ pax;
Regolazione semaforica a Ciclo fisso;
Numero fermate (per le corse in direzione centro): 14;
- SCENARIO III) Capacità veicoli $C_v=150$ pax;
Regolazione semaforica a Ciclo fisso;
Numero fermate (per le corse in direzione centro): 13;
Eliminata dall'itinerario originale la stazione A10-Monti di Tai.
- SCENARIO IV) Capacità veicoli $C_v=150$ pax;
Regolazione semaforica con priorità al trasporto pubblico;
Numero fermate (per le corse in direzione centro): 14;

Nello SCENARIO III, è stata eliminata dal programma di esercizio la stazione di fermata A10–Monti di Tai, e la relativa utenza, caratterizzata mediamente da soli 270 utenti/ora in discesa, è stata distribuita in modo uguale tra la fermata precedente e quella successiva.

Nello SCENARIO IV, viene introdotta la priorità semaforica per il trasporto pubblico alle intersezioni. Si tratta di uno scenario quindi migliorativo per l'efficienza e l'efficacia del trasporto pubblico considerando che ciascuna intersezione semaforizzata non attuata posta lungo il percorso determina una riduzione della velocità commerciale della linea. Il modello agevola nella scelta del tipo di regolazione semaforica permettendo una analisi non solo qualitativa del fenomeno ma anche comparativa.

6.6 I risultati

Una prima analisi dei risultati delle simulazioni applicate agli scenari predetti si è articolata a partire dai seguenti indicatori di prestazione:

\overline{T}_{tot} =	Tempo che mediamente viene impiegato dal veicolo a percorrere l'intero itinerario;
$\sigma(\overline{T}_{tot})$ =	Deviazione Standard del Tempo che mediamente viene impiegato dal veicolo a percorrere l'intero itinerario;
\overline{V}_c =	Velocità commerciale media di esercizio;
$\overline{\alpha}$ =	Coefficiente di riempimento medio del veicolo durante l'esercizio;
α_{max} =	Coefficiente di riempimento massimo raggiunto dalle vetture durante l'esercizio;

Vengono riportati i risultati delle simulazioni effettuate per i quattro scenari considerati:

	\overline{T}_{tot}	$\sigma(\overline{T}_{tot})$	\overline{V}_c	$\overline{\alpha}$	α_{max}
SCENARIO I	19.5	78	27.8	38	100.0
SCENARIO II	20.5	104	26.5	34	95.3
SCENARIO III	20.4	97	26.7	34	94.7
SCENARIO IV	18.0	66	30.2	35	95.3
	min	sec	Km/h	%	%

Tabella 11: Indicatori di prestazione risultanti dalle simulazioni degli scenari effettuate

Gli indicatori di prestazione riportati in Tabella 11 mostrano che

- Dal confronto delle \overline{T}_{tot} si nota che, con regolazione semaforica a ciclo fisso, il servizio che necessita di minor tempo a percorrere l'intero itinerario è quello che utilizza vetture con capacità di 100 posti. Ciò è dovuto al minor tempo complessivo impegnato per la salita e la discesa degli utenti dal veicolo avendo assunto il medesimo tempo di imbarco per passeggero in tutti gli scenari. Nello SCENARIO IV, in cui vengono utilizzati mezzi a capacità 150 passeggeri, tale divario viene però compensato dall'effetto della priorità semaforica al trasporto pubblico.

- Analoga considerazione di cui sopra può essere fatta per la variabilità del tempo totale di viaggio, confrontando i valori della colonna $\sigma(\overline{T_{tot}})$;
- Viceversa, per lo stesso motivo, la velocità commerciale $\overline{V_c}$, nell'ordine:
 - risulta maggiore nello SCENARIO IV rispetto, allo SCENARIO I, per effetto della priorità semaforica;
 - risulta maggiore nello SCENARIO I rispetto, allo SCENARIO III, per effetto del minor numero di utenti che possono essere serviti da ciascun veicolo data la minor capacità delle vetture utilizzate;
 - risulta maggiore nello SCENARIO III rispetto, allo SCENARIO II, avendo eliminato la fermata A10-Monti di Tai ed i relativi tempi di manovra ad essa dedicati.
- L'indicatore α_{max} è determinante nella valutazione degli scenari poichè segnala se il servizio come dimensionato è sufficiente o meno a soddisfare il volume di domanda che deve effettuare il proprio spostamento. Infatti se $\alpha_{max} < 100$ allora nessuna vettura avrà saturato la propria capacità e di conseguenza nessun passeggero sarà rimasto a terra per assenza di spazio sul veicolo. Nel presente studio ciò non avviene soltanto nello SCENARIO I.

Le variazioni percentuali degli indicatori di prestazione prendendo come scenario di riferimento lo SCENARIO I sono:

	$\overline{T_{tot}}$	$\sigma(\overline{T_{tot}})$	$\overline{V_c}$	$\overline{\alpha}$	α_{max}
SCENARIO I	0%	0%	0%	0%	0%
SCENARIO II	5.1%	33.2%	-4.8%	-10.2%	-4.7%
SCENARIO III	4.3%	24.4%	-4.1%	-9.6%	-5.3%
SCENARIO IV	-7.9%	-15.2%	8.6%	-8.3%	-4.7%

Tabella 12: Variazione degli indicatori rispetto allo SCENARIO I

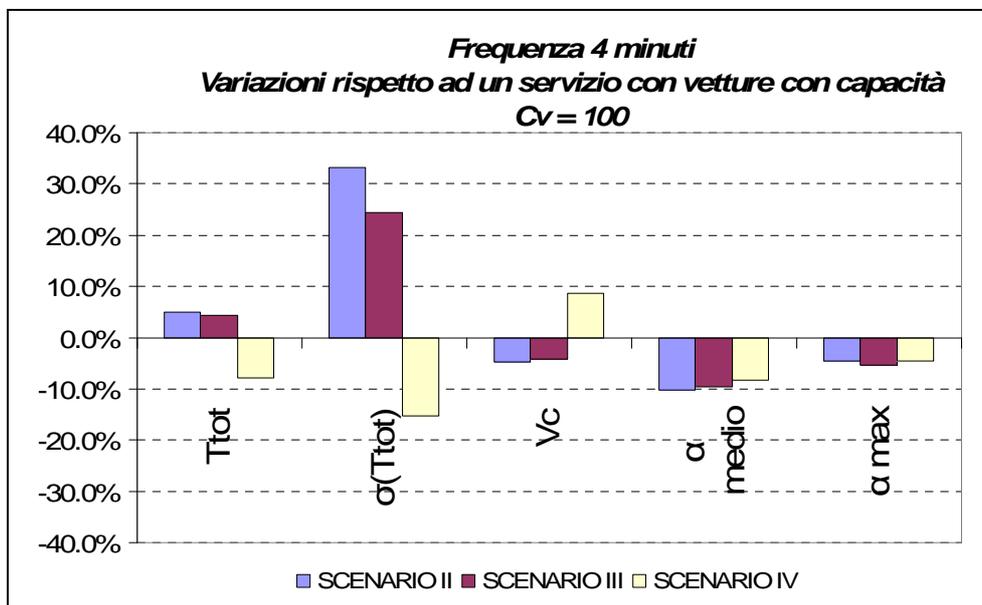


Figura 32: Rappresentazione grafica delle variazioni degli indicatori rispetto allo SCENARIO I

Il grafico di Figura 32 fornisce una valutazione quantitativa dei benefici indotti dalla scelta di un servizio alternativo rispetto allo SCENARIO I. Lo SCENARIO IV, grazie alla priorità semaforica, è quello che, ancorchè garantisca il soddisfacimento pieno della domanda di trasporto ($\alpha_{max} < 100$), evidenzia i maggiori vantaggi in termini di $\overline{T_{tot}}$, $\sigma(\overline{T_{tot}})$ e $\overline{V_c}$.

Va inoltre ricordato che gli effetti della priorità semaforica, oltre al miglioramento del servizio in termini di maggiore regolarità del servizio e minore di tempo di attesa dell'utenza in banchina, possono comportare una netta diminuzione dei costi di investimento e di esercizio.

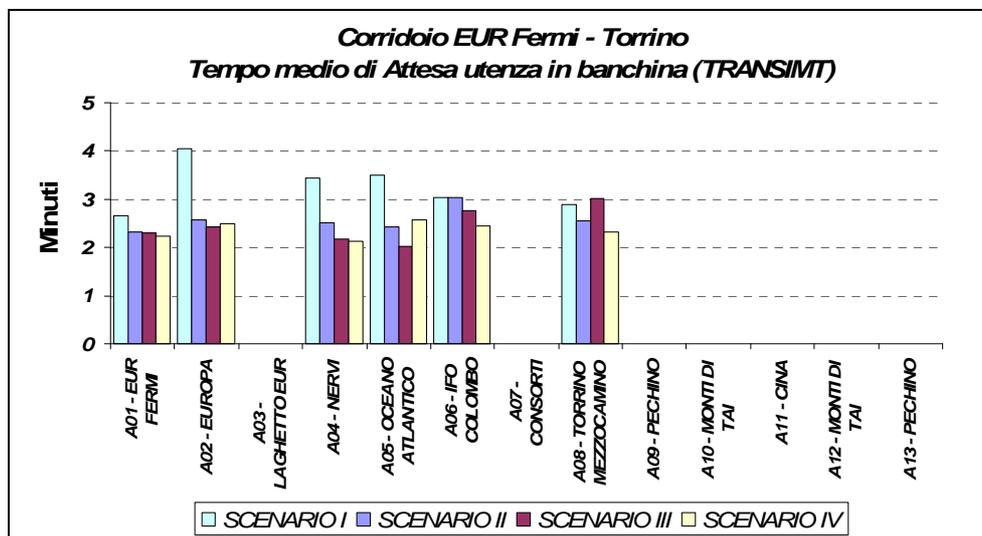


Figura 33: Rappresentazione grafica delle variazioni degli indicatori rispetto allo SCENARIO I

La Figura 33 fornisce un raffronto dei tempi di attesa in fermata degli utenti calcolati mediante il TRANSIMT per i quattro scenari di esercizio considerati. Si può notare come per la priorità semaforica al trasporto pubblico, a differenza degli altri casi, il tempo di attesa tende a rimanere contenuto durante tutto l'itinerario e vicino al valore ottimale di 2 minuti.

Inoltre per ogni scenario di offerta considerato sono state effettuate delle specifiche analisi che permettono di valutare la bontà del programma di esercizio scelto in funzione della domanda da servire.

In particolare, mediante i dati forniti dalle simulazioni, oltre agli indicatori di prestazione sopra illustrati, è possibile determinare:

- I diagrammi spazio-tempo;
- Le curve di riempimento;
- Analisi prestazionale degli Impianti Semaforici;
- L'analisi dei distanziamenti temporali tra veicoli successivi;
- Tempo medio di attesa dell'utenza in banchina;
- Classificazione % dei Tattesa in banchina dei passeggeri (Normale, Eccessivo ed Inaccettabile);
- Istogramma delle Velocità commerciali medie di spostamento dell'utenza al variare della fermata di Origine per raggiungere la propria destinazione.

A titolo esemplificativo vengono di seguito riportati alcuni risultati di tali analisi relativamente ai vari scenari.

- I diagrammi spazio-tempo;

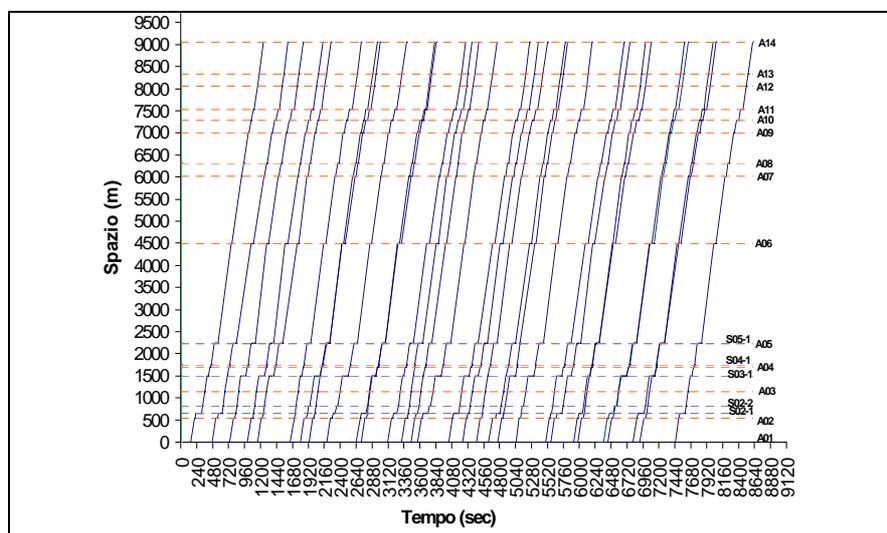


Figura 34: Diagramma Spazio-Tempo relativi allo SCENARIO I

Dal diagramma Spazio Tempo è possibile evidenziare l'andamento delle singole corse, le eventuali anomalie del servizio, i ritardi e gli anticipi

rispetto al programma di esercizio programmato e gli eventuali accoppiamenti delle corse verificati durante l'esercizio.

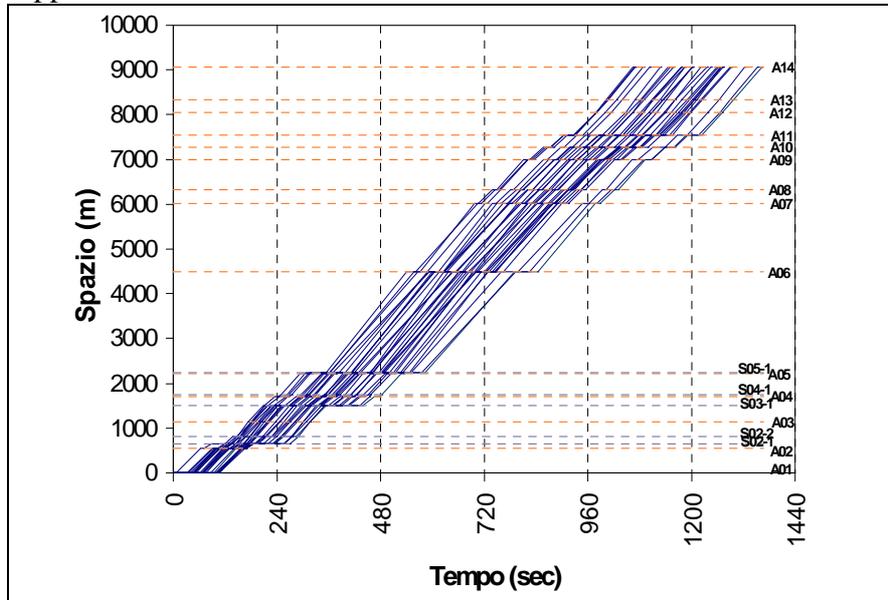
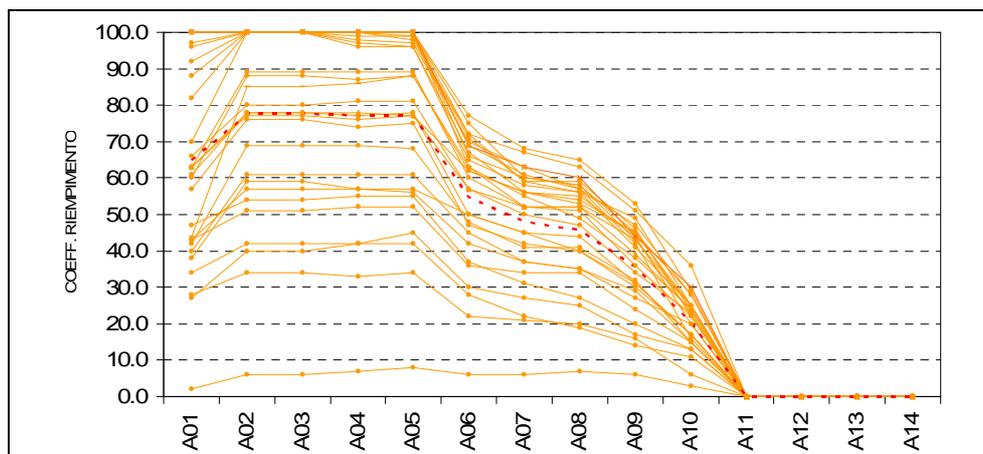


Figura 35: Diagrammi Spazio-Tempo con inizio traslato nell'origine, relativi allo SCENARIO I

Traslando nell'origine degli assi il punto di inizio delle curve spazio-tempo che descrivono il moto dei veicoli è possibile determinare un programma di esercizio ottimale in relazione alle fermate dell'itinerario.

- Le curve di riempimento dei veicoli;



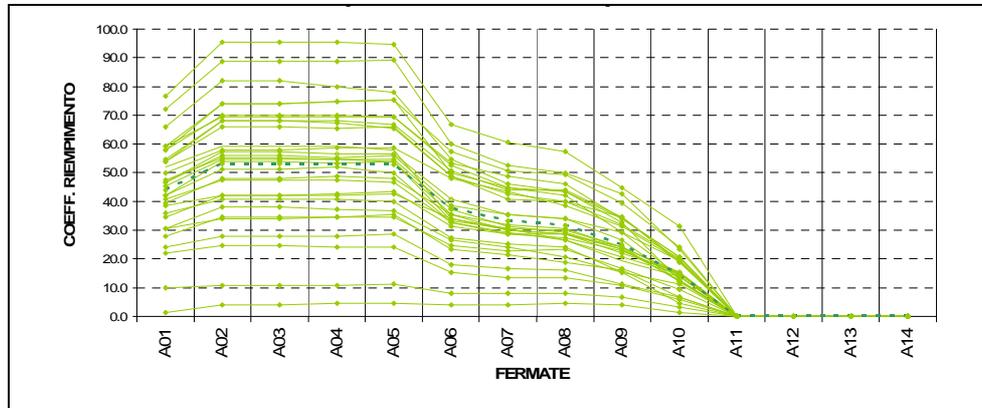


Figura 36: Curve di riempimento dei veicoli nello SCENARIO I e SCENARIO IV

Le curve di riempimento permettono di evidenziare le fermate che soffrono maggiormente del sovraffollamento delle vetture.

Nel caso dello SCENARIO I si nota che le vetture in corrispondenza delle fermate A01, A02, A03, A04 ed A05 presentano dei problemi nel servire l'utenza in banchina in quanto spesso arrivano già a pieno carico. Da ciò si può dedurre che per un servizio con frequenza di 4 minuti le vetture con capacità $C_v = 100$ non sono sufficienti a soddisfare la domanda di trasporto dell'ora di punta pomeridiana.

- Analisi prestazionale degli Impianti Semaforici;

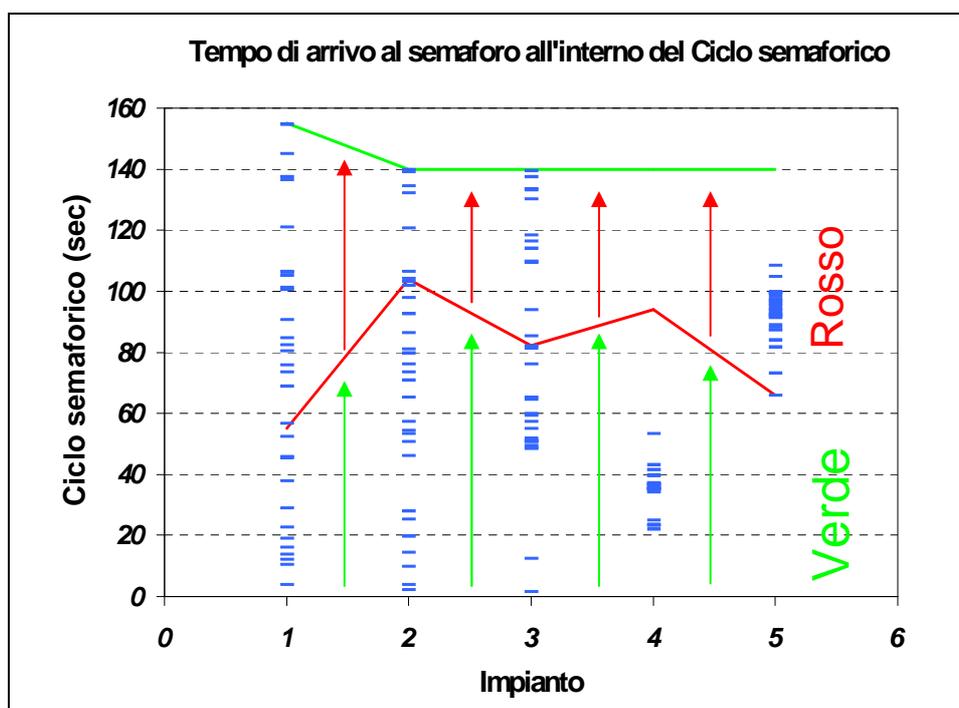


Figura 37: Istante di Ciclo in cui i veicoli arrivano all'approccio dell'intersezione semaforizzata nello SCENARIO I

	S01	S02	S03	S04	S05
Ciclo (sec)	155	140	140	140	140
Verde efficace (sec)	55	104	82	94	66
Verde efficace/Ciclo (sec)	0.355	0.743	0.586	0.671	0.471
Tempo di Rosso (sec)	100	36	58	46	74
Attesa media all'approccio (sec)	28.8	4.2	48.8	0.0	44.8
deviaz standard attesa (sec)	32.3	8.7	34.2	0.0	10.9
Aliquota di Rosso media (Attesa media/ Tempo di Rosso)	28.8%	11.7%	84.2%	0.0%	60.5%

Tabella 13: Analisi delle prestazioni degli impianti semaforici relative allo SCENARIO I

La Figura 37 illustra per ogni impianto l'istante all'interno del ciclo semaforico nel quale la vettura raggiunge l'approccio dell'intersezione

semaforizzata. Tale diagramma può essere utile a stabilire come modificare gli sfasamenti tra gli impianti semaforici per fluidificare il flusso veicolare. In particolare dalla Figura 37 si può verificare il buon funzionamento del coordinamento semaforico esistente tra il semaforo 03 ed il semaforo 04 e che, mediante una modifica dello sfasamento temporale tra i cicli degli impianti, è possibile ottenere un coordinamento semaforico tra i semafori 04 e 05.

La Tabella 13, in particolare, riporta la quota del Tempo di Rosso mediamente passato in attesa dalle vetture all'appoggio dell'intersezione in attesa del Verde.

- L'analisi dei distanziamenti temporali tra veicoli successivi;

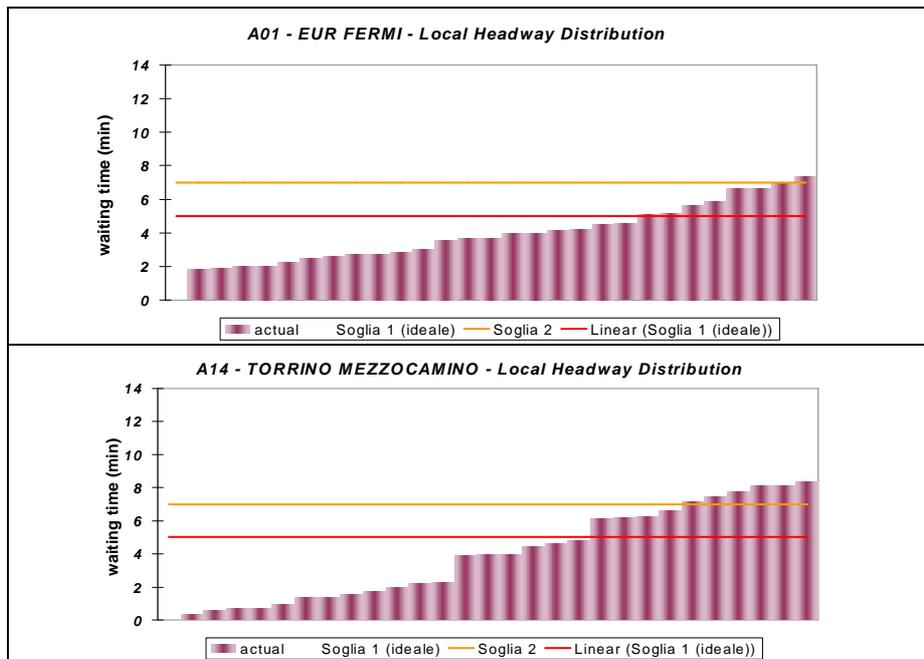
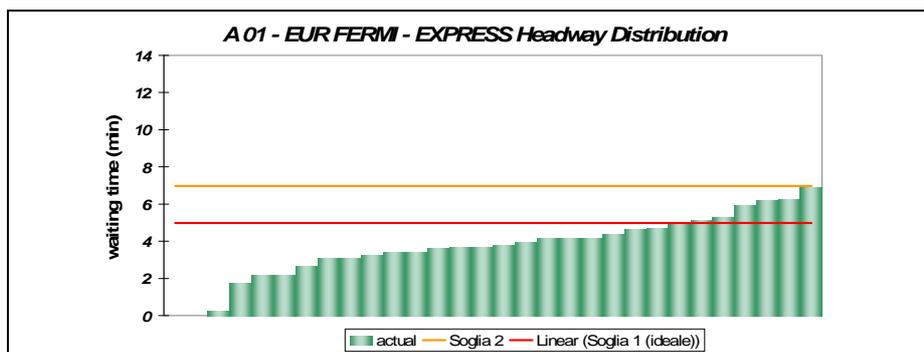


Figura 38: Analisi dei distanziamenti temporali tra veicoli successivi nella prima e nell'ultima stazione di fermata relativamente allo SCENARIO I



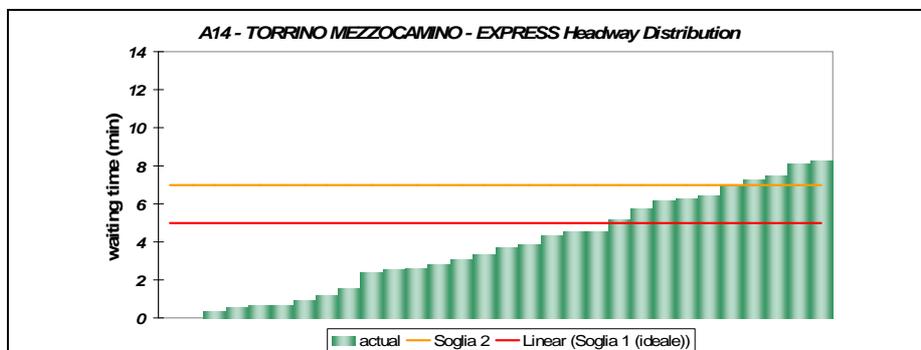


Figura 39: Analisi dei distanziamenti temporali tra veicoli successivi nella prima e nell'ultima stazione di fermata relativamente allo SCENARIO IV

In Figura 38 e Figura 39 si riportano i grafici che illustrano distanziamenti temporali tra veicoli successivi relativi ai capolinea di partenza e di arrivo rispettivamente per lo SCENARIO I e lo SCENARIO IV. Tali grafici mostrano come la variabilità di tale distanziamento aumenta lungo l'itinerario.

Dal confronto dei grafici relativi al capolinea di arrivo per i due scenari si può notare come nel caso della regolazione degli impianti con priorità semaforica i distanziamenti temporali tra i veicoli tendono maggiormente a mantenere valori prossimi a quelli dei partenza (mediamente 4 minuti). Nei grafici sono riportate anche due soglie, la prima per determinare il limite superiore per i tempi di attesa accettabili (5 minuti) e la seconda per determinare il limite inferiore dei tempi di attesa inaccettabili (7 minuti). Calibrate rispetto alla frequenza media dei passaggi di 4' input iniziale.

- Tempo medio di attesa dell'utenza in banchina;

Se il tempo di attesa in banchina è uno degli indicatori più significativi per valutare l'efficacia del sistema e, indirettamente, la capacità di questo di incidere sulla ripartizione modale, per valutarlo si è considerato uno storico modello analitico più che consolidato, da confrontare con il modello di microsimulazione.

La formula analitica generalmente utilizzata per il calcolo del tempo medio di attesa dell'utente in banchina è

$$(4) \quad E[W] = \frac{E[H]}{2} \cdot \left(1 + \frac{Var[H]}{E^2[H]} \right) = \frac{E[H]}{2} \cdot (1 + cv_H^2) \quad (\text{Welding, P.I., 1957})$$

Si noti che la frequenza delle partenze del servizio simulato è mediamente di 4 minuti e pertanto, nelle ipotesi della equazione (4), in assenza di variabilità del servizio, l'utente dovrà attendere in banchina mediamente 2 minuti.

In questo studio il tempo di attesa in banchina è stato stimato sia mediante calcolo analitico che attraverso le simulazioni del TRANSIMT.

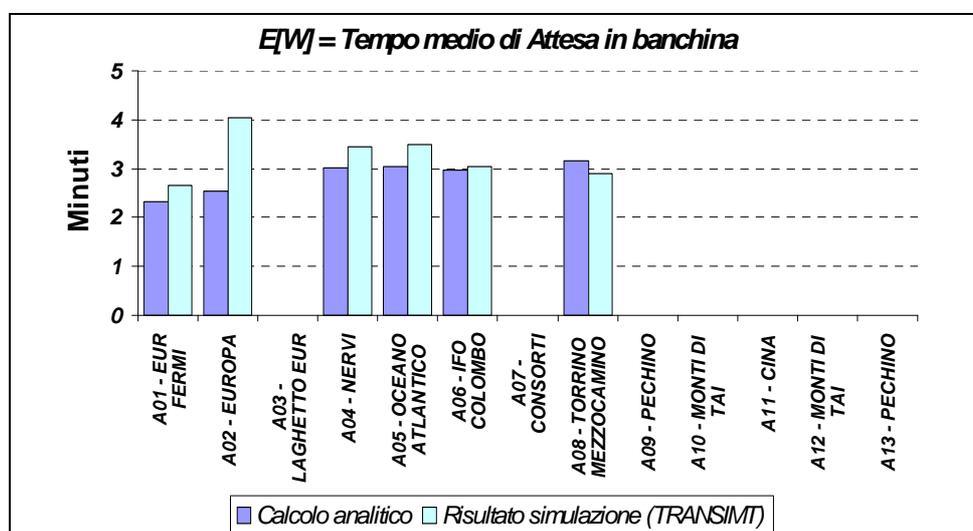


Figura 40: Tempo medio di attesa in banchina degli utenti per lo SCENARIO I

Dalla Figura 40 si evidenzia come il TRANSIMT permette di considerare il passaggio di vetture sovraffollate in fermata A02-Europa che non consentono la salita di tutti gli utenti in attesa. Questi infatti dovranno

attendere in banchina il passaggio di un successivo veicolo per poter salire a bordo.

Ciò è dovuto al fatto che l'equazione (4) usa delle grandezze relative ai veicoli per stimare l'attesa del passeggero, mentre il TRANSIMT valuta direttamente l'attesa di ogni singolo utente all'interno del sistema.

In tutte le altre stazioni di fermata le stime del tempo di attesa effettuate con i due metodi di calcolo differiscono di poco.

- Classificazione % dei Tattesa in bachina dei passeggeri (Normale, Eccessivo ed Inaccettabile);

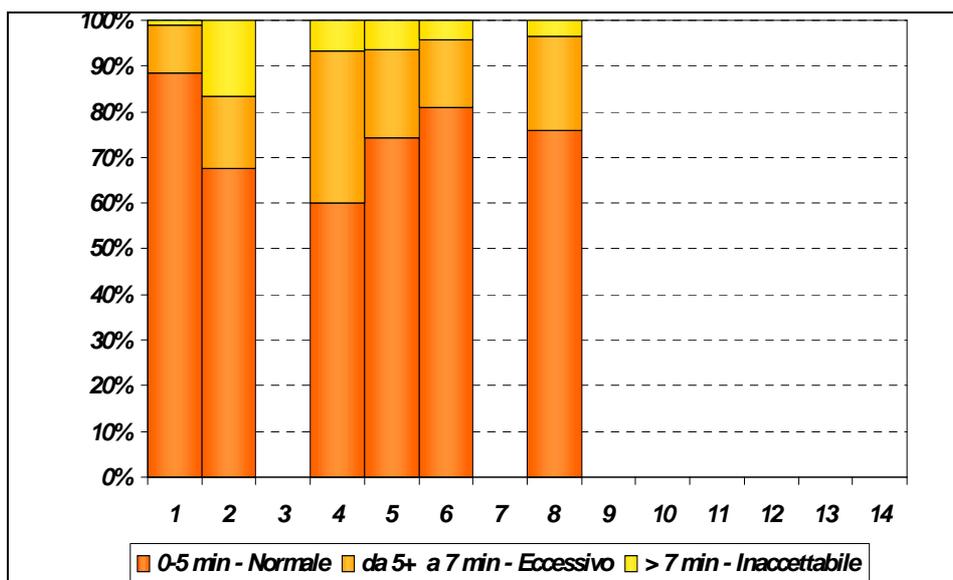
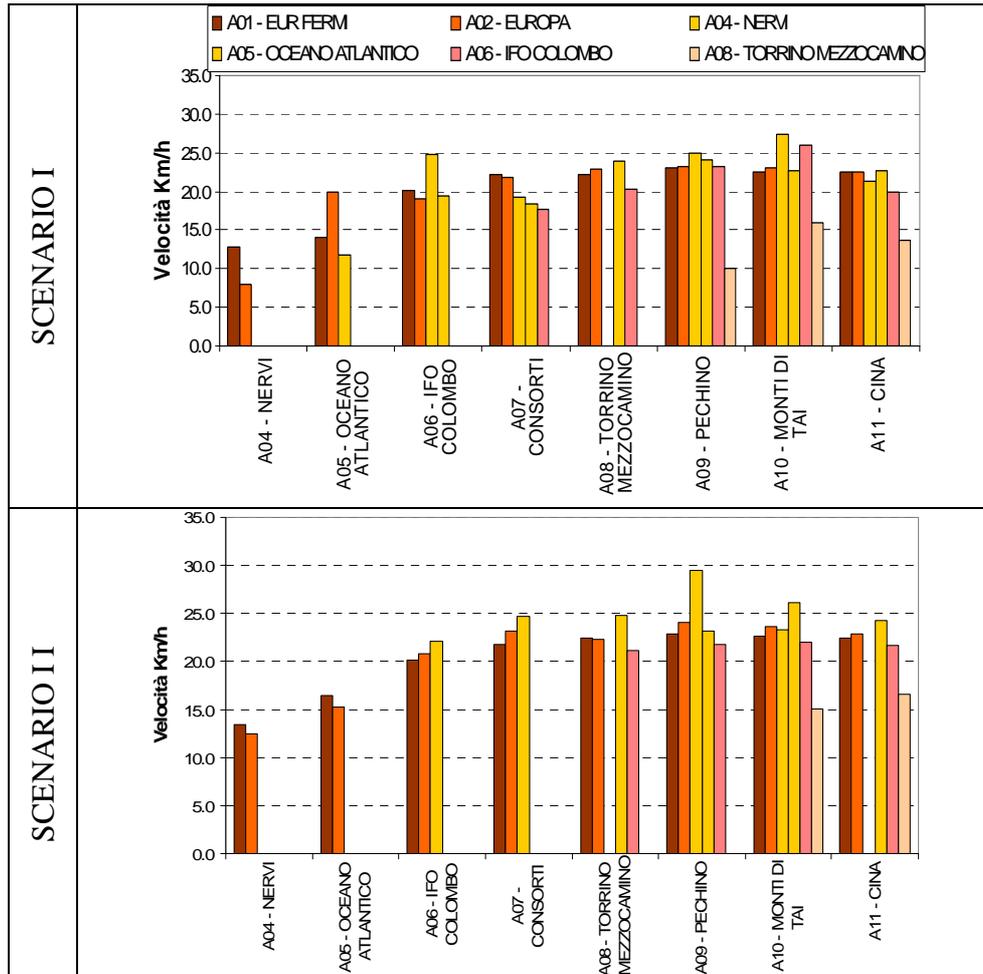


Figura 41: Classificazione % dei Tattesa in bachina dei passeggeri (Normale, Eccessivo ed Inaccettabile) per lo SCENARIO I

La classificazione percentuale dei Tempi di attesa in banchina dei passeggeri viene effettuata individuando due soglie, la prima per determinare il limite superiore per i tempi di attesa accettabili (5 minuti) e la seconda per determinare il limite inferiore dei tempi di attesa inaccettabili (7 minuti). I tempi di attesa degli utenti che si trovano tra le due soglie sopra definite vengono definiti eccessivi.

- Istogramma delle Velocità commerciali medie di spostamento dell'utenza al variare della fermata di Origine per raggiungere la propria destinazione.



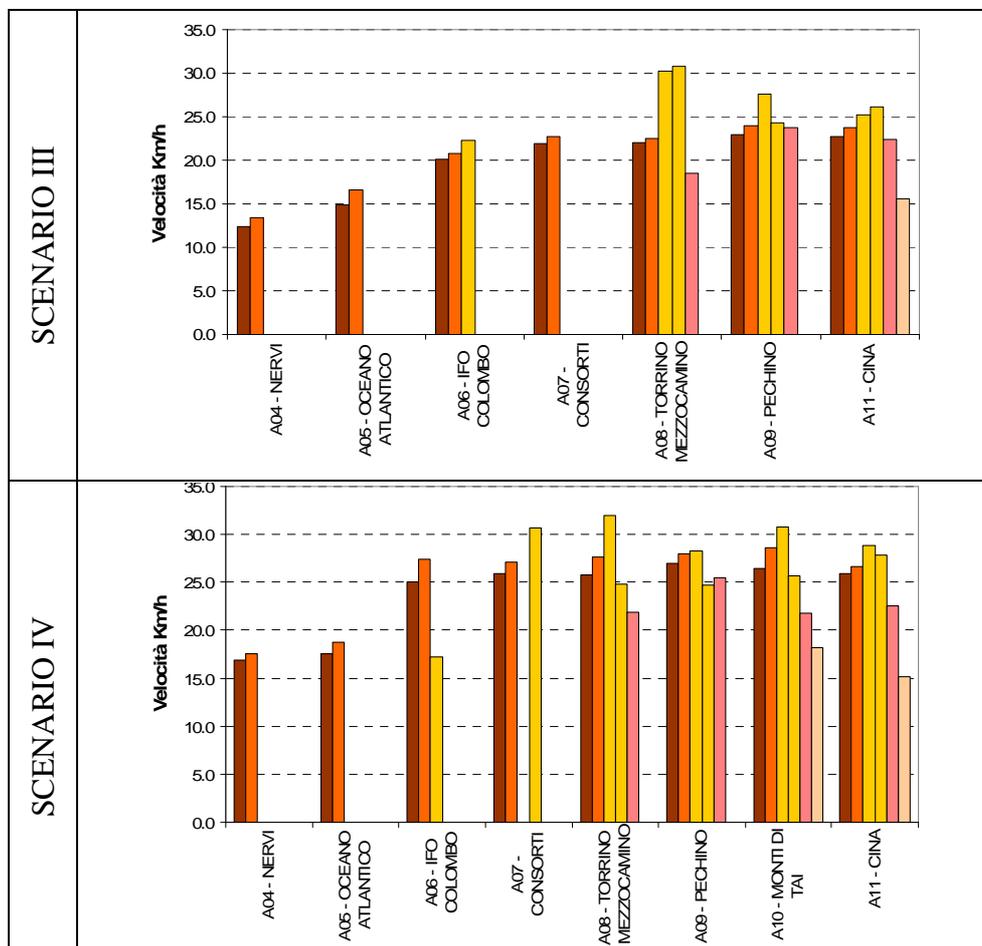


Figura 42: Velocità commerciale media dell'Utenza per fermata di Origine

Da tale grafico si può notare come diminuisce la velocità commerciale dei spostamenti dell'utenza al diminuire della distanza da percorrere. Ciò dipende dal fatto che maggiore è la distanza percorsa a bordo del veicolo e più l'attesa nella banchina di partenza viene ammortizzata.

7 Conclusioni

I BRT sono sistemi di trasporto pubblico di superficie su gomma che integrano più sottosistemi, dalla infrastruttura stradale ai veicoli in esercizio, ai sistemi ITS, le cui caratteristiche geometriche o funzionali sono definite e calibrate per massimizzare l'efficacia e l'efficienza del sistema così da scostarsi in misura assolutamente significativa rispetto al trasporto di superficie ordinario migliorando complessivamente la velocità, l'affidabilità e l'identità del trasporto bus con potenziali vantaggi di costi di investimento ed operativi.

I sistemi BRT sono interessati da un grande sviluppo in tutto il mondo, sia in paesi in via di sviluppo che in quelli già sviluppati caratterizzati da grandi differenze in termini economici e di pianificazione urbanistica.

La diffusione del concetto della "Mobilità Sostenibile", anche in termini di nuovo paradigma, svolge un ruolo importante:

- ✓ l'obiettivo chiave delle regolamentazioni urbane diventa il ragionevole tempo di viaggio, prendendo il posto della sua minimizzazione;
- ✓ gli utenti sono già consapevoli di quanto tempo hanno bisogno per raggiungere la propria destinazione con un ragionevole grado di certezza. E' l'affidabilità del sistema a divenire cruciale;
- ✓ la qualità della vita è collegata all'"ambiente in cui si vive" che deve essere il più possibile libero da veicoli a motore. Inoltre, gli investimenti nelle diverse modalità di trasporto dovrebbero essere prioritari in modo inversamente proporzionale alla velocità di spostamento che garantiscono (prima i pedoni, poi le infrastrutture per la ciclabilità, dopo il trasporto pubblico ed in fine i veicoli privati).

Una prima fase dello studio che ha portato ad una estesa rassegna dei sistemi in esercizio nel mondo, ha evidenziato da un lato l'ampio spettro delle configurazioni e infrastrutturali e gestionali che è possibile conferire al sistema. Si è rilevato peraltro la necessità di una definizione di tali caratteristiche efficienti e quindi la modellistica più o meno avanzata rappresenta uno straordinario strumento di supporto cui ricorrere.

La rassegna sui modelli per l'analisi dei parametri di servizio disponibili mette in luce le differenze sostanziali esistenti tra modelli sperimentali, analitici e di microsimulazione.

In particolare, i modelli aggregati calibrati su base di dati sperimentali mal si prestano ad essere applicati su casi con caratteristiche significativamente differenti da quelli di calibrazione (ciò rappresenta un limite per l'utilizzo di tali strumenti in quanto le caratteristiche dei BRT per adattarsi ai diversi contesti urbani devono godere di ampia variabilità). Per tale motivo questi modelli possono rivelarsi poco affidabili nell'esame e nel confronto di soluzioni alternative che presentino marcate variazioni nelle caratteristiche rilevanti sia tra loro sia rispetto allo scenario di calibrazione.

L'analisi delle prestazioni di un sistema BRT effettuata attraverso il modello di microsimulazione TRANSIMT ha permesso di evidenziare alcuni aspetti determinanti come l'eventuale sovraffollamento delle corse, l'efficienza della regolazione semaforica riferita al trasporto pubblico, la regolarità del servizio offerto e la stima del tempo di attesa in banchina dell'utenza.

L'applicazione del TRANSIMT al corridoio EUR Fermi-Torino in progetto a Roma, è stata condotta su diversi scenari tipo, individuati per evidenziare l'effetto sulle prestazioni del sistema di un parametro o di una caratteristica del sistema piuttosto che un'altra.

L'analisi condotta in termini di valutazione dei principali indicatori di prestazione, ha permesso di evidenziare i limiti di alcuni programmi di esercizio e le potenzialità del modello per esaminare quantitativamente delle soluzioni alternative. Inoltre, la procedura di valutazione comparativa adottata ha permesso individuare il miglior programma di esercizio per il corridoio in esame (Capacità veicoli $C_v=150$ passeggeri; Regolazione semaforica con priorità al trasporto pubblico; Itinerario composto da tutte le quattordici fermate).

Ricordando che il numero di vetture necessarie per effettuare un servizio sufficiente è pari a

$$N = \left\lceil \frac{T}{H} \right\rceil$$

dove

T = tempo di giro,

H = headway di esercizio,

$\lceil \dots \rceil$ = funzione parte intera superiore,

la simulazione svolta con il TRANSIMT sulla linea ha evidenziato che, se la riduzione del tempo di percorrenza \overline{T}_{tot} è sufficientemente elevata, la priorità semaforica può anche portare ad una riduzione del parco macchine necessario per effettuare il servizio. Ciò rappresenterebbe un vantaggio sia nel breve periodo, in termini di costo di investimento iniziale, sia nel lungo periodo, in termini di regolarità del servizio, di minor tempo di attesa dell'utenza in banchina e manutenzione dei veicoli. Infine, osservando che le valutazioni qui riportate derivano dall'applicazione combinata di modelli matematici e di microsimulazione, va detto che un approccio teorico è un valido supporto per le decisioni da prendere per contesti reali. Le ultime valutazioni riguardano la regolarità del servizio, di sostanziale importanza per il contesto romano, ma già disponibile in altri contesti e che trae vantaggio dalle moderne tecnologie di controllo del traffico.

Gli ulteriori sviluppi della ricerca sono molteplici, ad esempio diretti alla valutazione dell'effetto rete di più linee di trasporto per soddisfare la domanda in contesti urbanizzati, ai criteri utilizzati dall'utenza riguardo le proprie scelte di viaggio o alla valutazione dell'incidenza dell'introduzione di sistemi di informazione ai passeggeri a bordo e a terra.

Il modello di simulazione si presta ad essere ulteriormente sviluppato per rappresentare ed analizzare con maggiore fedeltà ulteriori aspetti e dotazioni caratterizzanti un sistema BRT soprattutto in considerazione della sovrapposizione di servizi express e locali. Tra tali caratteristiche si possono considerare la configurazione geometrica e funzionale delle fermate e delle corsie di marcia valutando la possibilità e i vantaggi ad esempio di consentire la fermata contemporanea di più veicoli e il sorpasso tra veicoli, sistemi di informazione agli utenti alle fermate o accessibili direttamente dai singoli utenti grazie a particolari dotazioni personali i cui effetti si ritrovano nella scelta alla fermata del vettore express o locale stimando per entrambi i tempi di viaggio.

Bibliografia & Sitografia

Balaker, T., Staley, S.	"The road more travelled"	Rowman & Littlefield, New York, 2006.
Banister, D.	"The sustainable mobility paradigm"	ELSEVIER – Transport Policy 15, 73-80, 2008.
Banister, D.	"Unsustainable Transport: City Transport in the New Century"	Routledge, London, 2005.
Banister, D.	"Transport, urban form and economic growth"	Paper presented ad the ECMT Regional Round Table 137, Berkeley, 2006
Cain, A., Darido, G., Baltes, M. R., Rodriguez, P., e Barrios, J. C.	"Applicability of TransitMilenio Bus Rapid Transit System of Bogotá, Colombia, to the United States"	Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.2034, TRBNA, WASHINGTON, D.C., 2007, pp.45-54.
Cain, A., Darido, G., Baltes, M.R., Rodriguez, P., Barrios, J.C.	"Applicability of TransMilenio Bus Rapid Transit System of Bogotá, Colombia, to the United States"	Transportation Research Record, 2034, pp. 45-54, 2007.
Carrese, S.	"Interazione tra i parametri caratteristici di una linea di trasporto pubblico"	Dottorato di ricerca in Ingegneria dei Trasporti VII Ciclo Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 1995.
Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M.	"Evaluation framework for Bus Rapid Transit systems performance"	Paper presented to The capacity of Transport Systems: arcs, nodes, services and technologies. International Conference, November 5 th - 6 th , Venice, IT. Organized from TTL Unit of IUAV, 2009.
Cohen, S.	"Indicateurs d'allure et de consommation d'un autobus en exploitation"	Recherche Transport Sécurité - Janvier, pp. 16-22, 1984.
European Cooperation in Science and Technology (COST) n° TU0603	Bus with a High Level of Service	Disponibile su www.bhls.eu . Accesso del 26 marzo 2010.

Fernández, R.	"Evaluacion Ex-post de la Operacion de la Via Exclusiva para Buses de Avenida Grecia"	<i>Informe Final, Comision de Planificacion de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Secreteria Ejecutiva (SECTRA), Santiago, 1996.</i>
Fernández, R. e Valenzuela, E.	"A model to predict bus commercial speed"	<i>Traffic Engineering and Control 44(2), 67-71., February, 2003.</i>
Fernández, R., Osses, M., Valenzuela, E.	"A model to predict bus commercial speed to estimate public transport emissions"	<i>Presented at the 11th International Symposium on Trasport and Air Pollution, Grazer, Austria, 19-21 June 2002.</i>
Furth, P. G., Hemily, B., Muller, T. H. J., Strathman, J. G..	Transit Cooperation Research Program Report 113 - "Using Archived AVL-APC Data to Improve Transit Performance and Management"	<i>Transportation Research Board of the National Academies, WASHINGTON, D.C. , 2006.</i>
Furth, P. G., SanClemente, J. L.	"Near Side, Far Side, Uphill, Downhill. Impact of Bus Stop Location on Bus Delay"	<i>Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1971, TRBNA, WASHINGTON, D.C., 2006, pp.66-73.</i>
Gibson, J., Baleza, I., Willumsen, L.G.	"Bus-stop, congestion and congested bus-stop"	<i>Traffic Engineering and Control, 30(6), 291-302, 1989.</i>
Hall, P., Pain, K.	"The Polycentric Metropolis: Learning from Mega-City Regions in Europe"	<i>Earthscan, London, United Kingdom, 2006.</i>
Heddebaut, O., Finn, B., Rabuel, S. e Rambaud, F.	Bus Rapid Transit: A Public Transport Renaissance. "The European Bus with a High Level of Service (BHLS): Concept and Practice"	<i>Built Environment, Vol. 36, No. 3, pp. 307-316, 2010.</i>
Kikuchi, S., Vuchic, V.R.	"Transit vehicle stopping regimes and spacing"	<i>Transportation Scieince, 16, pp.311-331, 1982.</i>
Levinson, H., Zimmerman, S., Clinger, J., Rutherford, S., Smith, R. L., Cracknell, J. e Soberman, R.	Transit Cooperation Research Program Report 90 - "Bus Rapid Transit, Volume 1: Case Studies in Bus Rapid Transit"	<i>Transportation Research Board of the National Academies, WASHINGTON, D.C., 2003.</i>

Montella, B.	“Simulazione di una linea di trasporto collettivo per determinare l’influenza dei parametric del tempo di giro”	<i>Ingegneria Ferroviaria – febbraio 1994, p. 79.</i>
Montella, B.	“Pianificazione e controllo del traffico urbano: modelli e metodi”	<i>Cuen Editore, 1996.</i>
Noland, R., Polak, J.	“Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues”	<i>Transport Review, 22(1), pp. 39-54, 2002.</i>
Osses, M., Gherardelli, C., Fresard, F.	“A model to determinate primary air pollutant emissions from urban buses in Santiago de Chile”	<i>Proceedings of the 7th International Conference on Urban Transport and the Environment, Lemnos Island, Greece, 2001.</i>
Valenzuela, E., Baeza, I.	“Influencia del diseno del bus, paradero y modalidad de operacion sobre la duracion de la detencion de buses”	<i>Actas del V Congreso Chileno de Ingegneria de Transporte, 453-468, Santiago, 1991.</i>
Welding, P.I.	“The Instability of a Close-Interval Service”	<i>Operation Research, 8:133-142, 1957.</i>
Wickham, J.	“Gridlock: Dublin’s transport crisis and the future of the city”	<i>New Island Books, Dublin, 2006.</i>

www.arenasimulation.com/
www.atac.roma.it/
www.bhls.eu
www.comune.roma.it/
www.nbrti.org/
www.romametropolitane.it/

RINGRAZIAMENTI

Un profondo ringraziamento al Prof. Leopoldo Franco, coordinatore del corso, e al Prof. Stefano Gori, mio tutore, per avermi accordato la loro fiducia fin dall'inizio di questo lavoro ed avermi dato la possibilità, con la loro esperienza, di portare a termine questo ciclo di studi.

Un grazie speciale all'ing. Marco Petrelli, mio co-tutore, e all'ing. Vincenzo Ancora, per i proficui confronti di idee in diverse fasi della ricerca.

Sempre riconoscente al Prof. Stefano Carrese, già relatore della mia tesi di laurea magistrale; importante riferimento e fonte di preziosi consigli.

Devo ricordare fra tutti alcune dottorande, in particolare Livia Mannini e Valentina Lombardi, con le quali è stato piacevole e costruttivo condividere questo breve percorso di vita.

Ed infine, ringrazio i miei genitori e mia sorella per essermi stati sempre vicini; ringrazio altresì la mia amica Giuliana Salfa per avermi trasmesso i suoi profondi valori morali ed anche la Sig.ra Teresa Rossi che, sebbene indirettamente, ha avuto un ruolo determinante nella riuscita del presente lavoro.