

Coordinato da



Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Organizzato da

ASSOCIAZIONE ITALIANA  
per l'INGEGNERIA  
del TRAFFICO  
e dei TRASPORTI



**CIFI** Collegio  
Ingegneri  
Ferroviari  
Italiani



**Area tematica n. 2: TRAM, METRO E TRENI NELLE AREE METROPOLITANE**

## TRAM O METROPOLITANA: IL DILEMMA DA APPROFONDIRE

Autore: Roberto Di Maria

Ente di Appartenenza: Libero Professionista

Contatti: 3282213062 [robertodimaria@inwind.it](mailto:robertodimaria@inwind.it)

– [rdingegneria@email.it](mailto:rdingegneria@email.it) –

[www.rdingegneria.com](http://www.rdingegneria.com)

### PREMESSA

La cronica tendenza ad estremizzare le discussioni pubbliche fa sì che, spesso, anche i sistemi di trasporto collettivo diventino occasione per schierarsi a favore o contro. In questo ambito vanno inquadrare le diatribe a cui capita di assistere a proposito della programmazione e realizzazione di sistemi innovativi, concepiti come alternativi se non competitivi fra loro.

Uno dei casi più eclatanti in tal senso è quello della città di Palermo, dove si dibatte da decenni sulla scelta fra tram e metropolitana. Prendiamo spunto da questo caso per uno studio di approfondimento sulle caratteristiche peculiari dei due sistemi e sui criteri da seguire per una scelta che dia le migliori risposte alla domanda di trasporto pubblico urbano.

#### 1. IL CASO PALERMO: IL SISTEMA TRANVIARIO

Il sistema tranviario attualmente in servizio a Palermo è costituito da 4 linee tranviarie LRT, entrate in esercizio il 30 dicembre 2015. La loro lunghezza complessiva, è pari a 23,3 km, con un totale di 44 fermate. La rete è dotata di due depositi: infatti, a causa della discontinuità tra le 4 linee, non esiste collegamento tra la linea 1, afferente al deposito Roccella, e le linee 2,3 e 4, afferenti al deposito Castellana. Le vetture in servizio sono 17, la frequenza massima garantita è di un convoglio ogni 7':30" nella linea 1.

Sulle ali dell'indubbio successo di pubblico riscosso, l'Amministrazione Comunale ha recentemente affidato la progettazione della estensione del sistema tranviario, attraverso la realizzazione di 7 nuove linee tranviarie. La rete sarà quindi estesa a tutto il territorio urbano, e non collegherà soltanto alcune zone periferiche al centro come avviene attualmente. Nella

figura 1 riportiamo in rosso la rete esistente, in azzurro l'estensione di prima fase, in giallo quella di seconda fase.

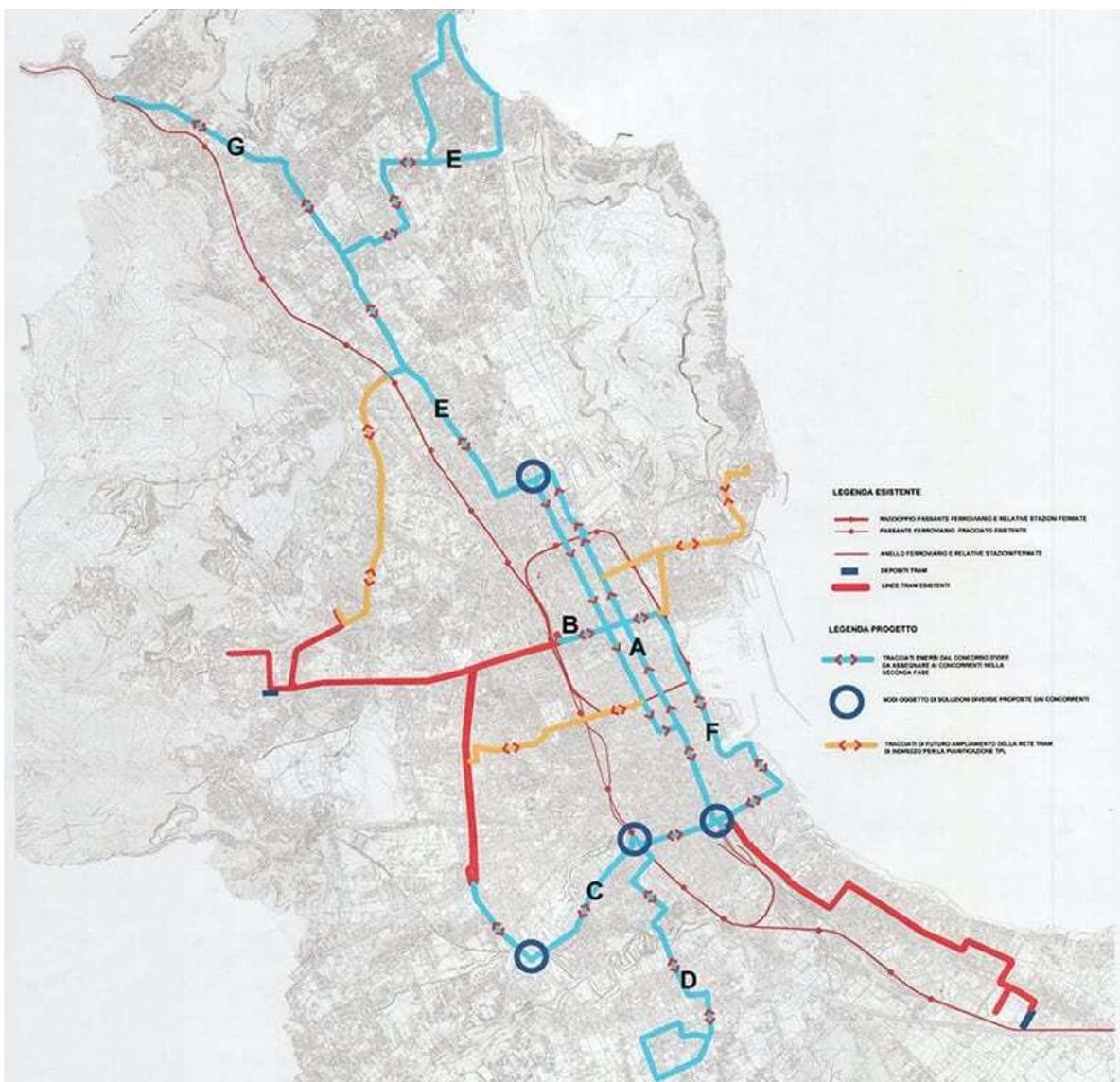


Figura 1: Rete tranviaria di Palermo, attuale ed in progettazione; fonte <https://cityrailways.com/la-fase-2-del-tram-di-palermo/>

## 1.1. IL PROGETTO MAL

Il progetto di Metropolitana Automatica Leggera (MAL) per la città di Palermo prevede una sola linea che percorre l'asse fondamentale degli spostamenti in città, orientato in senso sud-ovest-nord-est, lungo le vie Oreto-Roma-Libertà-Sciuti-Strasburgo, fino alla località balneare di Mondello. Il sistema, caratterizzato da alte frequenze dei convogli, sarebbe totalmente automatizzato, con assenza del conducente a bordo e porte di banchina alle fermate. Il progetto preliminare della rete è stato approvato nell'aprile 2014.

I flussi massimi stimati dai progettisti sono valutati intorno ai 13.000 passeggeri/ora per direzione: valori tali da giustificare l'ipotesi di convogli a composizione doppia rispetto allo standard dei sistemi automatici leggeri, caratterizzati da basso ingombro laterale (larghezza dei convogli di poco superiore ai 2 m) e longitudinale con composizione standard intorno ai 26 m.

LAVORI PER LA REALIZZAZIONE DELLA METROPOLITANA AUTOMATICA LEGGERA RA  
 DELLA CITTA' DI PALERMO "PRIMA LINEA - ORETO / NOTARBARTOLO"

SCHEDA ECONOMICA DELL'INTERVENTO

| LAVORI  |                        |                        |
|---|------------------------|------------------------|
|   | Sistema a min ingombro | Sistema a max ingombro |
| TOTALE OO.CC. E IMPIANTI NON DI SISTEMA (a)                 | € 410.200.296,86       | € 449.290.156,32       |
| TOTALE IMPIANTI DI SISTEMA E MATERIALE ROTABILE (b) (stima) | € 200.450.000,00       | € 248.350.000,00       |
| A) TOTALE LAVORI ( a+b)                                     | € 610.650.296,86       | € 697.640.156,32       |
| B) ONERI DI SICUREZZA presunti (non soggetti a ribasso)     | € 30.532.514,84        | € 34.393.659,71        |
| IMPORTO SOGGETTO A RIBASSO (A -B)                           | € 580.117.782,02       | € 663.246496,61        |
| IMPORTO TOTALE A BASE D'ASTA (C)                            | 610.650.296,86         | €                      |
| Somme a disposizione dell'Amministrazione (D)               | € 191.394.963,31       | € 209.345.929,74       |
| TOTALE ( C+D)   | € 802.045.260,17       | € 906.986.086,06       |

Il sistema sarebbe interamente ubicato in galleria, con due canne distinte per le due direzioni di marcia. Il costo dell'intervento sarebbe compreso tra 802 e 907 milioni di € per la sola prima tratta funzionale della lunghezza di 6 km con 9 stazioni. I due valori sono relativi a due ipotesi di ingombro della linea, dipendenti dalla soluzione tecnologica da adottare, non definita in fase preliminare.

Tabella 1: : Quadro economico progetto preliminare MAL; fonte [https://www.comune.palermo.it/grandi\\_opere\\_metro\\_leggera.php](https://www.comune.palermo.it/grandi_opere_metro_leggera.php)

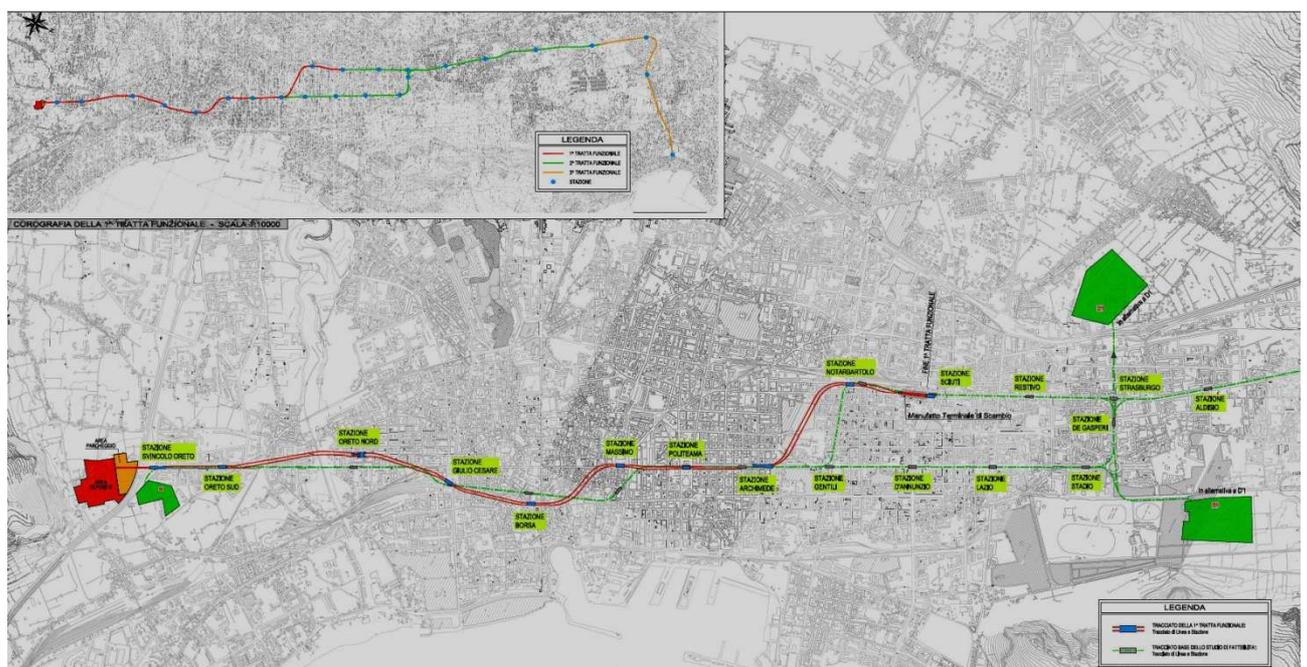


Figura 2: Planimetria MAL, 1° tratta funzionale; fonte: [https://www.comune.palermo.it/grandi\\_opere\\_metro\\_leggera.php](https://www.comune.palermo.it/grandi_opere_metro_leggera.php)

## 1.2. LA SCELTA CONFLITTUALE

Come sopra rammentato, l'estensione della rete tranviaria di Palermo prevede 7 nuove linee a copertura di tutta l'area urbana. Una di queste, la linea A, ha un tracciato per larga parte sovrapponibile a quello della linea MAL: questa circostanza ha suscitato in città non poche polemiche, dal momento che sembrerebbe, di fatto, una scelta a favore del tram con la conseguente bocciatura dell'opzione metropolitana leggera. La scelta è stata più volte motivata dal minor costo del sistema tranviario, a fronte della maggiore estensione del servizio sul territorio; il progetto MAL, rimane comunque ufficialmente nella programmazione comunale delle OO.PP., ma ad un livello di priorità inferiore.

L'obiezione a questa scelta è motivata soprattutto da considerazioni relative alla capacità dei due sistemi. Atteso che la domanda prevista si attesta su flussi massimi di 13.000 passeggeri/h, e che la capacità di linea tranviaria al massimo delle sue possibilità è di 3.500/4.000 pax/h, si comprende come questo sistema non abbia la possibilità di garantire un'offerta di trasporto tale

da coprire la domanda nella direttrice cittadina fondamentale. Cosa che ben riesce, invece, con un sistema metropolitano automatico leggero a 4 vetture con marciapiedi di soli 55 m. di lunghezza, capace di garantire 15.000 posti/h per direzione.

Un'altra obiezione riguarda la maggiore invasività del sistema tranviario rispetto alla viabilità di superficie, già penalizzata da sezioni stradali tanto più limitate quanto più ci si avvicina al centro storico. Il riutilizzo di queste aree non soltanto per deflusso veicolare, ma anche per la riqualificazione dell'ambiente urbano vedrebbe la presenza della linea tranviaria come un elemento difficilmente gestibile. Un sistema sotterraneo, invece, consentirebbe la massima libertà nelle scelte di rimodulazione delle strade esistenti.

## 2. IL PROBLEMA DELLA SCELTA TRA DIVERSI SISTEMI E L'IMPORTANZA DELLA RIPARTIZIONE MODALE

Il caso Palermo, emblematico di situazioni simili in molte città del mondo, ci offre lo spunto per una riflessione sulla scelta dei sistemi di trasporto pubblico più adatti all'effettivo fabbisogno di mobilità dei centri urbani. In particolare, ci si chiede quali possano essere i fattori più adatti ad individuare l'idoneità di un sistema a far fronte alla domanda di mobilità di un'area urbana.

### 2.1. CAPACITA' DEI SISTEMI E VELOCITA' COMMERCIALE

Uno dei requisiti più sottovalutati nel confronto tra i due sistemi, a Palermo come in altre realtà, è quello della velocità commerciale. Mediamente, quella di un sistema tranviario tipo LRT (Light Rapid Transit), è compresa tra 13 e 18 km/h, anche se in determinate situazioni, caratterizzate da poche interferenze con il traffico in superficie possono raggiungersi i 20 km/h. Nel caso di Palermo i dati riscontrati nei primi tre anni di esercizio comportano una media di 15 km/h.

Una metropolitana leggera automatica tipo AGT (Automated Guided Transit) presenta velocità commerciali comprese tra i 30 e di i 35 km/h. Valori potenzialmente più che doppi rispetto ad un sistema tranviario, e che influenzano non poco l'attrattività del mezzo di trasporto.

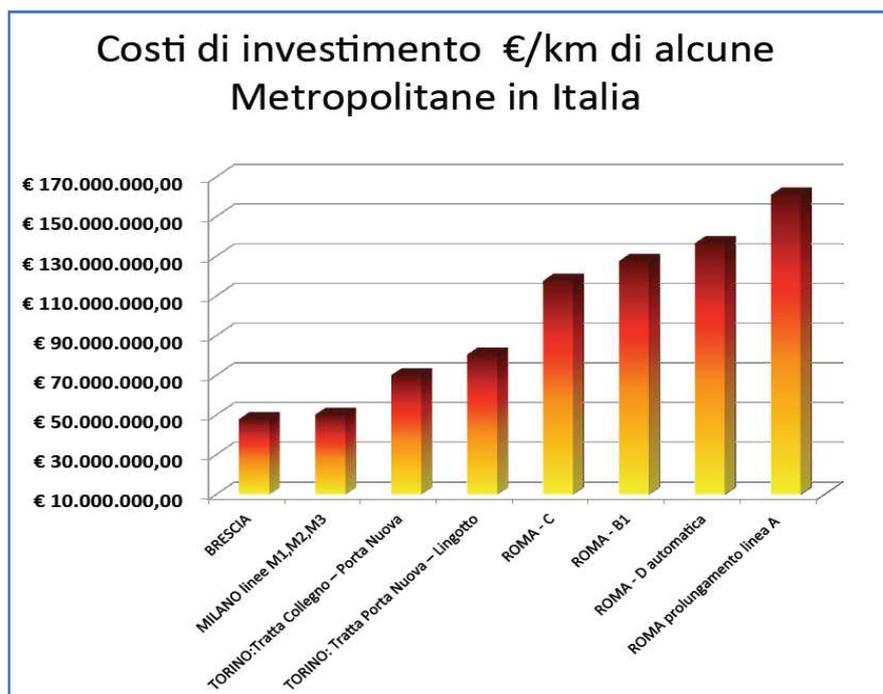


Figura 3: confronto tra i costi di costruzioni di alcune linee di metropolitane; fonte: Cappelli, le prestazioni dei sistemi di trasporto, <http://www.iuav.it/>

E' evidente che parità di costo, il cittadino ritiene più conveniente servirsi di un sistema più rapido, tanto da compensare i tempi impiegati per raggiungere le stazioni o fermate.

Tempi generalmente paragonabili a quelli per l'utilizzo dell'auto privata, che a fronte di una presenza prossima all'abitazione, sconta la ricerca di un parcheggio il più vicino possibile alla destinazione: operazione complicata oltre che costosa, se effettuata nel centro cittadino. In tal senso, la metropolitana non ha confronti, specie

nei viaggi più lunghi, dall'area suburbana o dalla lontana periferia al centro, e viceversa.

Tuttavia, i costi di costruzioni di un siffatto sistema suggeriscono la massima cautela nella scelta, in quanto, con tutta evidenza, il tasso di riempimento dei convogli deve essere opportunamente elevato per giustificare un costo iniziale che si aggira, mediamente, nell'ordine del centinaio di milioni di € a km.

Per la riuscita del sistema in termini di elevazione della qualità urbana e del benessere collettivo, occorre modificare a favore del mezzo pubblico ed a scapito dell'auto privata il "transfert modale", ovvero lo spostamento delle percentuali di utilizzo dei vari modi di trasporto a favore di quello più conveniente.

Con la metropolitana, il trasferimento di utenti sarebbe a favore di quest'ultima, con drastica riduzione dell'utilizzo dell'auto privata, grazie alla maggiore comodità del mezzo pubblico. Avviene la stessa cosa per una linea tranviaria, ma in misura considerevolmente inferiore a causa della minore velocità commerciale: il risparmio in termini di tempo incide molto sulla convenienza ad utilizzare il servizio.

## 2.2. LA CAPACITA' DI MOVIMENTO

Uno strumento che aiuta a comprendere come diversi sistemi possano offrire diversa risposta alla domanda di trasporto è la "capacità di movimento"<sup>1</sup>.

In termini semplici, si definisce come il prodotto del numero di spostamenti prodotti per il quadrato della velocità, secondo la formula:

$$C = qv = nv^2/d = kv^2$$

dove n è il numero di passeggeri presenti a bordo o il numero di posti offerti a veicolo, v è la velocità media sul percorso ovvero la velocità commerciale e d è la distanza fra elementi corrispondenti di due veicoli susseguentisi (testa-testa o coda-coda).

La capacità di movimento esalta la maggiore attrattività di sistemi veloci rispetto a sistemi lenti. In altre parole, il fattore tiene conto dei limiti fisici della "massa viaggiante" che trasporta se stessa, ovvero:

- la larghezza (della strada o della generica infrastruttura), come limite fisico imposto dalla struttura di trasporto esistente;
- la velocità v (a piedi o del veicolo) che è determinata dalle capacità massime di prestazione del veicolo di trasporto (o della persona);
- la distanza minima d è il limite determinato dalle condizioni di sicurezza per il movimento.

Un termine che pone la metropolitana davanti a tutti gli altri sistemi, senza ombra di dubbio. In termini semplificati, a conti fatti per i valori mediamente tipici dei due sistemi, il rapporto tra la capacità di movimento di una linea AGT rispetto ad una LRT si aggira intorno ad un fattore 8. In tal senso, si riportano i dati di calcolo in tabella per i due sistemi.

| SISTEMA           | Velocità comm. in m/sec (v) | Velocità comm. in km/h | intervallo temporale (t) | numero posti a veicolo (n) | Flusso max Q pax/h | Capacità di Movimento vxn/t |
|-------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Metropolitana AGT | 9                           | 32,5                   | 72"                      | 400                        | 20.000             | 50,1                        |
| Tram LRT          | 5                           | 18                     | 180"                     | 200                        | 4.000              | 5,6                         |

Tabella 2: confronto sistemi AGT ed LRT - Fonte: elaborazione propria

<sup>1</sup> : Necessità di approfondimento ed estensione dei parametri vetture x km e vetture/ora per cogliere la produttività di un Sistema di Trasporto (nella pianificazione delle reti e la programmazione dei servizi) - Autori: ing. Massimo Montebello (\*) – prof. ing. Franco Accattatis (\*\*)

---

Il dato, di per sé estremamente generalizzato, va confrontato con la realtà locale, ovvero il contesto urbano in cui il sistema si inserisce. Vedremo nel seguito come questo fattore di valutazione possa offrire buoni elementi di spunto per una valutazione complessiva.

### **3. L'INTERAZIONE CON L'AMBITO URBANO**

L'ambiente in cui si colloca l'infrastruttura di trasporto pubblico di massa è un fattore imprescindibile rispetto alla scelta del sistema più adatto. In termini di rapporto costi/benefici, risulta indispensabile capire non solo l'entità della domanda di trasporto, ma anche come la stessa interagisca con il sistema proposto, valutando le diverse alternative sul campo.

Per meglio comprendere queste interazioni, si è fatto ricorso alle tecniche di simulazione per valutare i meccanismi di interazione tra i sistemi oggetto dello studio nell'ambito dell'area urbana attraversata. Situazioni che possono essere le più diverse, sia tra una città e l'altra, che all'interno di una stessa realtà urbana, con particolare riferimento ai "bacini di utenza" ed alle loro condizioni socio-economiche, oltre che demografiche.

#### **3.1. SIMULAZIONE DI LINEE DI TRASPORTO PUBBLICO URBANO E CONFRONTO TRAM-METROPOLITANA LEGGERA**

Per valutare la ripartizione modale tra diversi sistemi, occorre innanzitutto considerare le possibili alternative modali per un percorso tra due punti posti ad una certa distanza. Per la generica relazione, si è operato il confronto dei risultati considerando la presenza contemporanea soltanto di due sistemi; gli scenari prefigurati sono stati quindi, per la scelta modale:

a) *automobile e metropolitana leggera automatica AGT*

b) *automobile e tram LRT*

La finalità è quella di verificare quale tra le due condizioni sia foriera di maggiori vantaggi in termini di beneficio complessivo, con particolare attenzione alla riduzione del traffico veicolare e dell'impatto complessivo sull'ambiente.

Stabilite le voci che determinano il costo complessivo del trasporto per ogni modo, si verifica come esso cambi con il variare della distanza percorsa; quindi, attraverso un modello comportamentale, di tipo logit si è simulata la ripartizione modale tra i diversi sistemi.

Per i due modi di trasporto, la probabilità di scelta sarà data da:

$$P_1 = \frac{e^{-\lambda c_1}}{e^{-\lambda c_1} + e^{-\lambda c_2}}; \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{e^{-\lambda c_2}}{e^{-\lambda c_1} + e^{-\lambda c_2}} \quad (2)$$

Dove  $C_1$  e  $C_2$  sono le funzioni di costo dei modi di trasporto 1 e 2.

Le voci di costo considerate sono le seguenti:

*Automobile:*

costo del viaggio: dipendente dalla distanza, dovuto al tempo impiegato per raggiungere la destinazione

- costo di accesso: dovuto al tempo necessario ad accedere al veicolo, ma che considera anche quello necessari a trovare un parcheggio a destinazione

- costo di parcheggio: fisso, anche se di difficile valutazione a seconda dell'ambito in cui ci si muove.
- costo del carburante: fissati i consumi medi, è dipendente dalla distanza percorsa. Non sono stati considerati altri costi connessi all'utilizzo del veicolo privato, dovuti all'assicurazione, al bollo e alla manutenzione. Questo perché il costo percepito da parte dell'utente è tipicamente solo quello dovuto al carburante, mentre i costi dovuti ad assicurazione, bollo e manutenzione non sono percepiti come costi direttamente connessi al viaggio.

*Tram o metropolitana:*

- costo del viaggio: dipendente dalla distanza, dovuto al tempo impiegato per raggiungere la destinazione
- costo di accesso: dovuto al tempo necessario ad accedere alla fermata/stazione; nei due casi, si è scelto di applicare tempi analoghi, pari ad un quarto d'ora medio.
- tariffa di viaggio: si è scelto di prevederla uguale per i due modi di trasporto

| Costi da sostenere per vari modi di trasporto |                     |                      |                  |                      |                      |         |            |
|---|---------------------|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|---------|------------|
| Mezzo di trasporto                            | Velocità comm. Km/h | Carburante costo /km | Costo viaggio/km | Tempo di accesso (h) | Costo di accesso (€) | Tariffa | Parcheggio |
| Metro AGT                                     | 35                  | --                   | 0,57 €           | 0,25                 | 5,00 €               | 1,50 €  | --         |
| Tram LRT                                      | 15                  | --                   | 1,33 €           | 0,25                 | 5,00 €               | 1,50 €  | --         |
| Automobile                                    | 8                   | 0,14 €               | 2,50 €           | 0,25                 | 5,00 €               | ---     | 3,00 €     |

Tabella 3, elaborazione propria

Non avendo a disposizione un esempio reale, il modello è stato calibrato sulla base di una applicazione nota per una città di medie dimensioni.<sup>2</sup>

L'approssimazione viene considerata trascurabile, poiché, in questo ambito, ci si prefigge di confrontare più sistemi a parità di condizioni a contorno, ovvero all'interno della stessa realtà urbana. Nella fig. 4 è visibile la sintesi dei risultati forniti dal modello applicato secondo le formule 1 e 2 in funzione delle distanze da percorrere.

Il risultato più rilevante nel confronto tra l'auto privata ed il sistema di trasporto pubblico è che esso, lungo la stessa tratta, è sempre a favore di quest'ultimo. E che la velocità commerciale influisce sempre più sensibilmente sul dato complessivo con l'aumentare delle distanze. Ciò fa sì che il sistema metropolitana risulti più attraente di quello tranviario sulle lunghe distanze, mentre sulle distanze

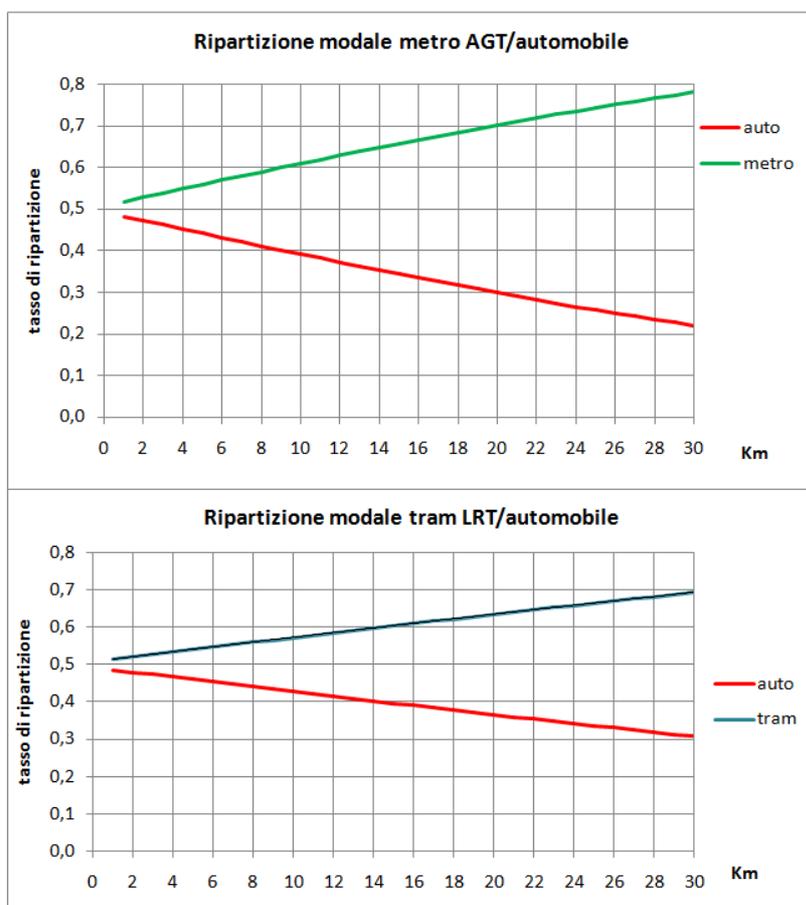


Figura 4: confronto delle ripartizioni modali sistema AGT/automobile e sistema LRT/automobile; elab. propria

• <sup>2</sup> Univ. Cagliari - [people.unica.it/italomeloni/files/2012/04/Cap.-6-II-modello-di-scelta-modale.ppt](http://people.unica.it/italomeloni/files/2012/04/Cap.-6-II-modello-di-scelta-modale.ppt)

---

medio-piccole le differenze nella ripartizione modale sono più contenute. Il passaggio successivo, nella simulazione, è lo studio dell'andamento del flusso di traffico lungo una ipotetica linea di trasporto pubblico.

### **3.2. INFLUENZA DELL'AMBIENTE SULLA DOMANDA DI TRASPORTO**

La ripartizione modale nell'ambito di un determinato bacino di utenza dipende principalmente, come si è detto sopra, dalla lunghezza del percorso da effettuare. Per ipotizzare il carico presente lungo una linea di una certa lunghezza occorre pertanto conoscere la lunghezza di ogni spostamento effettuato al suo interno, dalla quale dipende direttamente la ripartizione modale. Da questa possono essere calcolati, applicando il coefficiente alla popolazione del bacino di utenza che necessita dello spostamento verso destinazioni situate lungo lo stesso bacino, i flussi che si registreranno tra diversi punti della stessa linea. In tal modo si potrà determinare, tramite l'accumulo di tali flussi, il flusso massimo a cui fare fronte.

La stima di questo valore, effettuata per ognuno dei sistemi studiati, ci può consentire di effettuare un confronto sull'efficacia degli stessi in termini di benefici all'utenza. Sarà utile, a tal proposito, ipotizzare scenari diversi, che comportino l'avvicinarsi, o meno, ai limiti fisici dell'infrastruttura.

La stima di tutti gli spostamenti possibili nell'ambito della stessa linea di trasporto pubblico dipende, come sappiamo, dalla densità di poli generativi e della compresenza, sulla stessa relazione, di poli attrattori. Un esame che richiede una complessa attività di studio sul campo, ma che ci siamo sforzati, in questa sede, di sintetizzare.

Sappiamo che la presenza di poli attrattivi e generativi si distribuisce in maniera disuniforme lungo il tracciato, anche se la condizione più caratteristica, per linee di trasporto che attraversano da parte a parte una città, è quella di vedere i poli generativi alle estremità e quelli attrattivi verso il centro. Diversamente, per linee periferia-centro, avremo i poli generativi ad un'estremità e quelli attrattivi all'altra. L'ipotesi più semplice, ai fini del calcolo, per la condizione di distribuzione dei poli, seguirebbe la seguente approssimazione:

- *poli distribuiti equamente lungo la tratta, con una domanda di trasporto generata tra coppie o/d presenti all'interno del bacino di utenza sempre costante e pari alla media complessiva (ipotesi 0).*

In sintesi, è come se indistintamente ogni stazione/fermata della linea generasse lo stesso numero di spostamenti all'interno della tratta; questo flusso sarà pari alla media degli spostamenti complessivi registrati su tutta la linea. Una condizione difficilmente riscontrabile in realtà, ma tanto più reale quanto più il valore degli spostamenti lungo la tratta si manterrà vicino alla media di flusso generato per unità di misura della linea (ad esempio per km).

Il caso opposto, che corrisponde ad una maggiore rispondenza a casi reali per una tipica linea di trasporto pubblico, è il verificarsi di un andamento variabile della presenza di poli attrattivi e generativi dei flussi lungo la tratta; la funzione ipotizzata deve rendere conto delle variazioni esistenti nell'area a partire da un valore prefissato, che individueremo nel flusso orario interno al bacino di utenza generato da ogni chilometro di linea. La migliore schematizzazione in tal senso è stata individuata in una legge ad andamento sinusoidale, con un massimo ed un minimo all'interno della tratta, sia per quanto riguarda la generazione che per quanto concerne l'attrazione dei flussi. Per la precisione, un andamento che segue una sinusoide quadratica. La condizione simulata è pertanto;

- *poli generativi ed attrattivi distribuiti secondo una legge sinusoidale lungo la tratta, con una "media" prefissata di spostamenti generati per km di estensione della linea.*

La legge ipotizzata per la distribuzione del flusso generato in funzione della posizione  $x$  sulla linea è:

$$F(x) = 2\bar{F} \cdot \text{sen}^2(\pi \cdot (\frac{x}{L} + k_1))$$

Con  $\bar{F}$  pari al valore ipotizzato del flusso medio, L la lunghezza complessiva della linea,  $k_1$  un coefficiente che consente lo spostamento della senoide sull'asse delle ascisse, determinando il posizionamento del picco massimo di flusso generato.

Per quanto concerne la distribuzione della capacità attrattiva, nell'ipotesi di partenza che considera il flusso generato esclusivamente diretto verso poli attrattivi ricadenti nell'area di influenza della linea, serve soltanto indicare quale percentuale della attrattività complessiva ricade dentro l'area di ogni nodo. Il flusso generato da ogni nodo si distribuisce sugli altri nodi presenti in linea in ragione della percentuale di attrattività assegnata ad ognuno di loro. Utilizzeremo, a questo scopo, una legge di distribuzione analoga a quella ipotizzata per la generazione, che consentirà ad ogni nodo di assegnare un valore compreso tra 0 ed 1, rappresentativo della percentuale di cui sopra. La legge ipotizzata, pertanto, è la seguente:

$$A(x) = \text{sen}^2(\pi \cdot (\frac{x}{L} + k_2))$$

con analogo significato dei fattori.

Sapendo che la ripartizione modale di ogni nodo della tratta dipenderà dalla lunghezza dello spostamento, si determina il cumulo degli spostamenti effettuabili dalla fermata, ognuno calcolato sulla base della ripartizione modale assegnata alla sua lunghezza.

In altri termini, indicando con  $p_m$  la probabilità di servirsi del modo m, in generale si ha che

$p_{m,ij} = f(|x_i - x_j|)$  con  $x_i$  posizione dell'origine ed  $x_j$  posizione della destinazione dal nodo.

detto  $S_i$  il numero degli spostamenti generati dal nodo i verso uno qualsiasi degli altri nodi della tratta, che saranno in totale N, ed avendo a disposizione M modi di trasporto, avremo:

$$S_i = \sum_{m=1}^M S_{m,i} = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N p_{m,ij} S_{ij}$$

con  $s_{ij}$  pari all'aliquota di flusso totale che dall'area di influenza del nodo i si dirige verso il nodo j. La ripartizione modale tipica di ogni nodo della tratta dipenderà quindi da ogni singola destinazione a partire dal nodo. Poichè ci interessa isolare la ripartizione di uno dei modi possibili, avremo un numero di spostamenti sul modo m pari a:

$$S_{m,i} = \sum_{j=1}^N p_{m,ij} S_{ij}$$

Nella funzione possiamo calcolare il coefficiente di ripartizione modale p in funzione della distanza tra i nodi i e j secondo il modello logit di cui alle formule (1) e (2). Se conosciamo anche gli spostamenti totali S a partire dal nodo i, in funzione della sua capacità generativa complessiva, serve soltanto quantificare gli spostamenti origine/destinazione  $s_{ij}$  assegnati ad ogni possibile itinerario; ovvero, più semplicemente, la legge di distribuzione  $s(x)$  lungo la linea.

Se ci atteniamo all'ipotesi 0 di un valore costante delle capacità generativo/attrattive della linea, potremmo semplicemente ipotizzare che tutti i possibili spostamenti dal nodo i-esimo si distribuiscano uniformemente sui rimanenti nodi presenti nella tratta. In altre parole, si potrà ipotizzare che il flusso totale  $S_i$  si suddivida uniformemente per i possibili N-1 itinerari, dove N è il numero delle stazioni/fermate presenti in linea: porremo quindi  $s_{ij} = S_i/(N-1)$  costante per ogni valore di i e j. In tal modo, lo spostamento medio registrato per il nodo i-esimo avrà una ripartizione modale fornita dal modello logit :

$$S_{m,i} = p_{m,i} S_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} S_{ij} \quad p_{m,i} = \frac{\sum_j^N p_{ij} S_{ij}}{S_i}$$

Ma essendo  $s_{ij}$  un valore costante, si può porre all'esterno della serie; quindi, ricordando che :  $\frac{s_{ij}}{S} = \frac{1}{N-1}$ , possiamo scrivere:

$$p_{m,i} = \frac{\sum_j^N p_{ij} s_{ij}}{S_i} = \frac{s_{ij}}{S} \sum_{j=1}^N p_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^N p_{ij}}{N-1}$$

Ponendo la ripartizione modale di un generico nodo  $i$  pari semplicemente alla media dei valori di  $p_{ij}$  per ogni itinerario a partire dal generico nodo  $i$ .

Diversamente, nel caso di andamento sinusoidale delle distribuzioni della generazione e dell'attrazione, la ripartizione modale a partire dal nodo  $i$ -esimo (e con essa, come vedremo, l'entità del flusso massimo) è fortemente condizionata dalla legge assegnata. In particolare, adottando sia per la generazione che per l'attrazione leggi ad andamento sinusoidale, il fattore determinante è lo sfalsamento tra queste due leggi: tanto più lontani sono i massimi delle due curve, tanto maggiore è la quantità complessiva dei flussi di traffico presenti in linea.

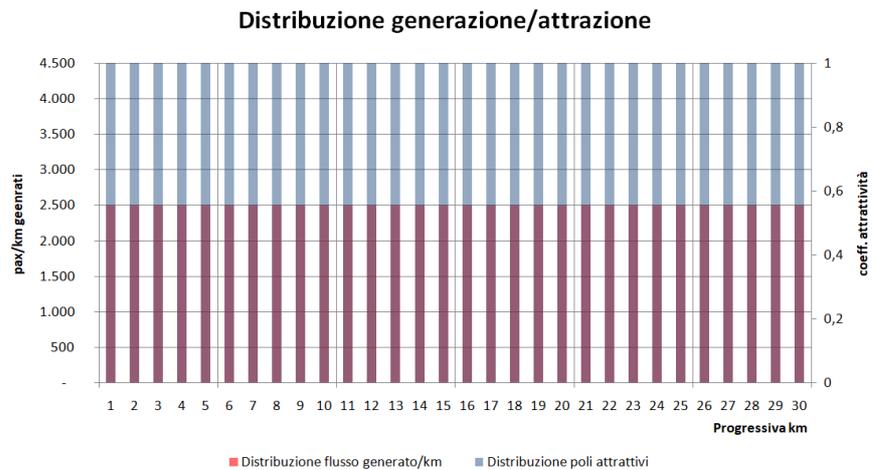


Figura 5: condizione di generazione/attrazione costante (IPOTESI 0)- elaborazione propria

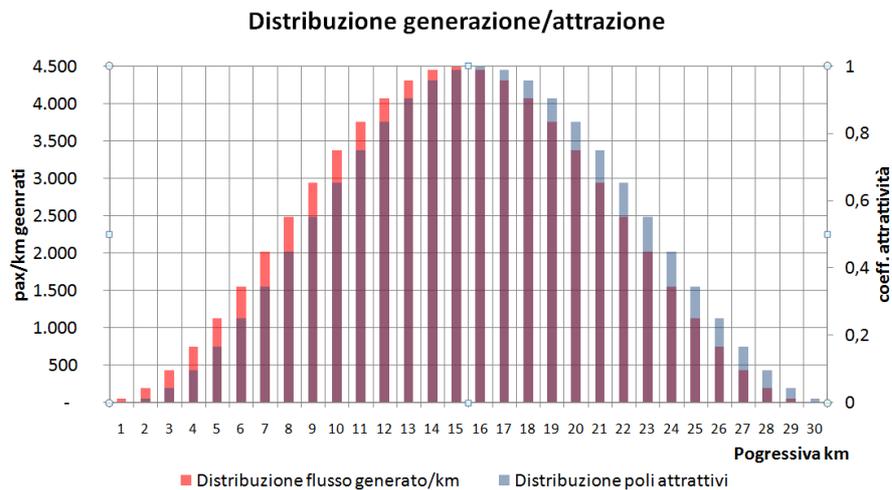


Figura 6: condizione di generazione/attrazione di massima correlazione  $c=1$  e minimo flusso; elab. propria

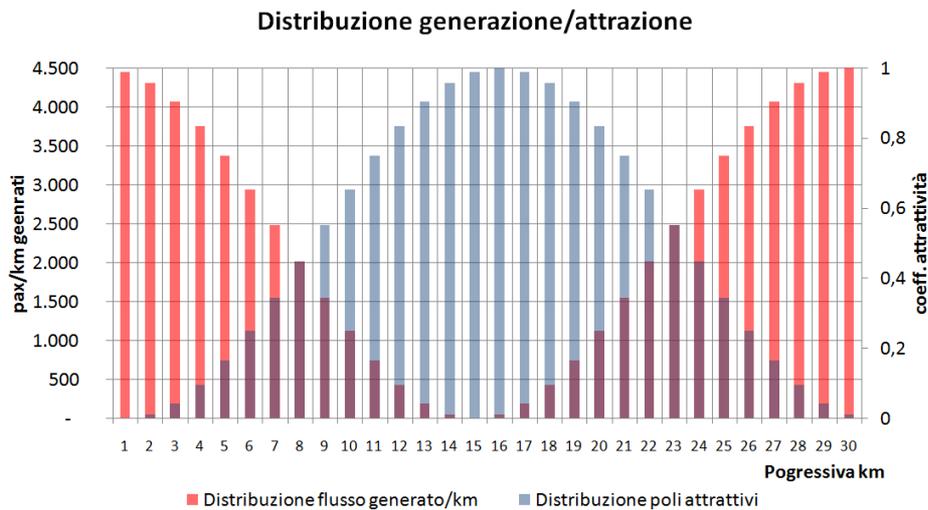


Figura 7: condizione intermedia  $c=-1$ ,  $\Delta k=1/2$ ; elab. propria

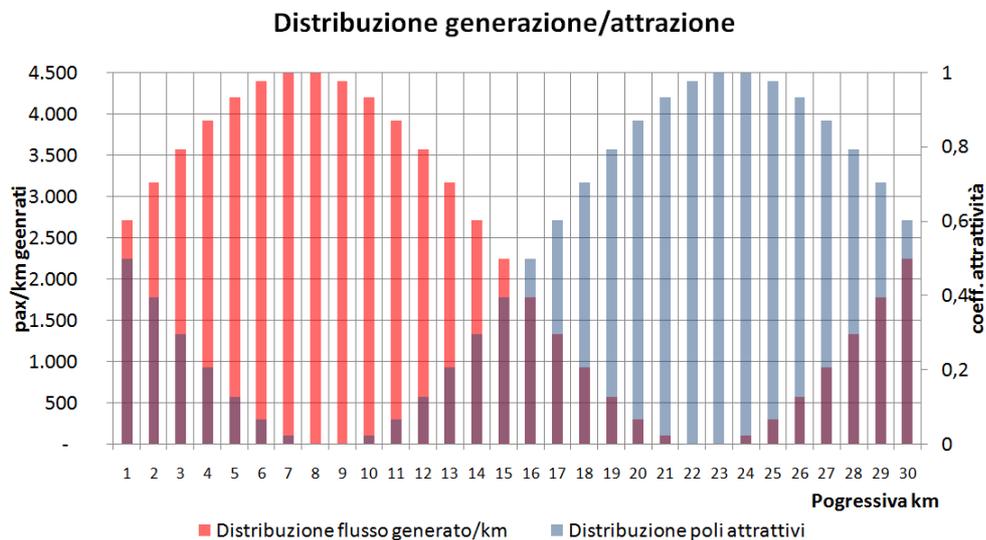


Figura 8 condizione di massimo flusso  $c=-1$ ,  $\Delta k=1/2$ ,  $k_1=1/4$  (IPOTESI 1) - elab. propria

In tal senso, un fattore di semplice applicazione che può aiutarci a confrontare le diverse tipologie di distribuzione delle due variabili (generazione ed attrazione) lungo il tracciato è l'indice di correlazione ( $c$ )<sup>3</sup>. Un indice statistico che assume valori compresi tra -1 (variabili inversamente correlate) e 1 (variabili correlate) a seconda della similitudine nell'andamento delle distribuzioni delle variabili che abbiamo ipotizzato lungo il tracciato.

Dalle comparazioni effettuate in fase di perfezionamento dell'algoritmo di calcolo, a parità di flusso medio generato per km, si riscontra l'aumento dei flussi di traffico al diminuire dell'indice di correlazione, con la condizione più sfavorevole per  $c=-1$  (fig. 8). Tale valore si determina per  $k_2 - k_1 = \Delta k = 1/2$  ovvero sfalsamenti di  $\pi/2$  fra le due sinusoidi; viceversa, per sfalsamento nullo ( $k_2 = k_1$ ) si ottiene il valore di correlazione più alto, pari a 1 (fig.6). In tal caso, i flussi massimi risulteranno molto più bassi a parità di capacità di flusso medio lungo la tratta.

<sup>3</sup> Date due variabili statistiche X e Y, l'indice di correlazione di Pearson è definito come la loro covarianza divisa per il prodotto delle deviazioni standard delle due variabili:  $\frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$  dove  $\sigma_{XY}$  è la covarianza tra X ed Y e  $\sigma_X$  e  $\sigma_Y$  sono le due deviazioni standard.

Tuttavia, in quest'ultimo caso, come si percepisce bene in grafica, la distribuzione dei poli generativi ed attrattivi e del tutto improbabile, con scarsissima concentrazione di entrambi per ampie tratte della linea. Pertanto, piuttosto che prendere in considerazione tale situazione, si è preferito considerare, come meno favorevole all'accumulo di flussi elevati di viaggiatori, la situazione preliminarmente accennata, di poli distribuiti equamente lungo la tratta (ipotesi 0, fig. 4).

Ma ciò non basta. A parità di coefficiente di correlazione, e quindi di sfalsamento tra le due sinusoidi, è importante definire la posizione del picco massimo della sinusoidi che rappresenta la generazione di flusso. La simulazione dimostra che il posizionamento che più esalta il flusso massimo è determinato da un fattore  $k_1 = 0.25$  che posiziona il picco massimo del flusso generatore a distanza  $L/4$  dalla progressiva 0. Questo caso, più sfavorevole per le prestazioni della generica linea di trasporto, è stato scelto come limite estremo a parità di lunghezza e di flusso chilometrico generato: lo denomineremo ipotesi 1.

L'**ipotesi 1** si caratterizza pertanto da:

$$k_1 = 0.25, \Delta k = 1/2 \text{ e } c = -1$$

### 3.2. DISTRIBUZIONE DEI NODI/FERMATE

Va precisato, in questa fase, che per le due modalità di trasporto collettivo le considerazioni riguardo la distribuzione dei nodi lungo la tratta sono state trascurate. Infatti, nella presente analisi si può prescindere dal loro legame con le stazioni/fermate presenti lungo il percorso.

Se infatti si ragiona in termini di flusso generato per km di linea, che viene attratto dai poli ricadenti nel suo bacino di utenza, si può considerare lo stesso invariante sulla base di una corretta distribuzione delle fermate lungo la linea: ad esempio, si può considerare che una interdistanza di fermate compresa tra 600 ed 800 m nel caso della metro, sia in prima approssimazione sufficiente ad intercettare il flusso di cui sopra nell'ambito della linea, chilometro per chilometro. Allo stesso modo avverrebbe per una linea tranviaria, caratterizzata peraltro da interdistanze generalmente inferiori. Ciò sulla base dei rispettivi raggi dei bacini di influenza (400/500 m in entrambi i casi) .

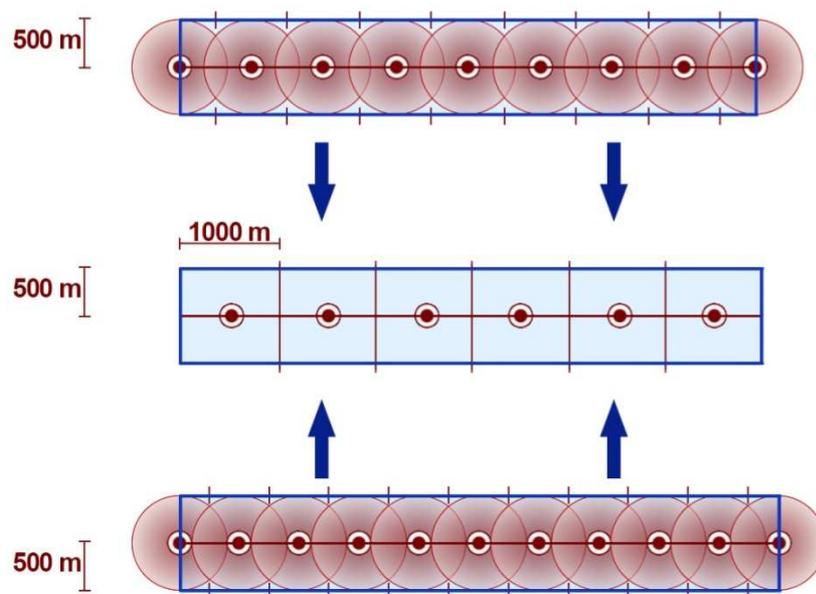


Figura 9: indifferenza della distribuzione dei nodi ai fini della simulazione; elab. propria

Ai fini della simulazione, pertanto, in entrambi i casi (Tram/metro) si è considerata la presenza soltanto di un nodo "fittizio" di accesso/uscita per ogni chilometro di tratta. Ad esso si associa il ruolo di dare accesso a tutti i possibili viaggiatori presenti nell'area di influenza ricadente lungo un km di tracciato. In sintesi, dal momento che solitamente si assegna al raggio dell'area di influenza un valore di 500 m., potremmo stabilire che in ogni nodo fittizio ricade un kmq di area di influenza (v. fig. 9). A tal proposito, ricordiamo che il ragionamento finora fatto

riguarda i flussi che da questa area si rivolgono alla rimanente zona di influenza della linea di trasporto. Il ragionamento può essere esteso al numero di utenti potenziali di trasporto, presenti per kmq, da e verso tutta l'area urbana indagata. Essi si

confrontano con quelli interni alla linea in ragione del rapporto esistente fra la capacità attrattiva presente, in totale, in tutta l'area urbana e quella interna alla sua area di influenza.

#### 4. RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

Una volta schematizzato l'algoritmo di simulazione, con l'ausilio di un foglio di calcolo si è stimato l'andamento dei flussi massimi considerando, a parità di fattori di costo e, quindi, di ripartizione dei flussi tra le coppie di sistemi ipotizzati (auto/tram auto/metro) la variazione dei fattori:

- flusso generato per km di linea mediamente nell'ora di punta, diretto da un punto all'altro dello stesso bacino di utenza con tutti i modi possibili di trasporto: si sono stimati valori variabili tra 500 e 3.500 viaggiatori/h per km.
- lunghezza della linea in km: si sono fissati valori variabili tra 2 e 30 km.
- leggi di distribuzione della capacità generativa e della capacità attrattiva rispondenti alle ipotesi 0 ed 1

Flusso massimo orario calcolato in dipendenza di flusso interno medio generato/km e lunghezza della linea

**Ipotesi 1**

|       | Flusso medio interno gen x km | Lunghezza linea in km |       |       |        |        |        |        |        |
|-------|-------------------------------|-----------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       |                               | 2                     | 3     | 5     | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     |
| Metro | 3.500                         | 1.220                 | 3.773 | 6.438 | 13.109 | 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 |
|       | 3.000                         | 1.046                 | 3.234 | 5.518 | 11.236 | 17.900 | 20.000 | 20.000 | 20.000 |
|       | 2.500                         | 872                   | 2.695 | 4.598 | 9.363  | 14.917 | 20.000 | 20.000 | 20.000 |
|       | 2.000                         | 697                   | 2.156 | 3.679 | 7.491  | 11.933 | 16.443 | 20.000 | 20.000 |
|       | 1.500                         | 523                   | 1.617 | 2.759 | 5.618  | 8.950  | 12.332 | 16.069 | 19.904 |
|       | 1.000                         | 349                   | 1.078 | 1.839 | 3.745  | 5.967  | 8.221  | 10.712 | 13.270 |
|       | 500                           | 174                   | 539   | 920   | 1.873  | 2.983  | 4.111  | 5.356  | 6.635  |
| Tram  | 3.500                         | 1.207                 | 3.787 | 4.000 | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 3.000                         | 1.035                 | 3.246 | 4.000 | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 2.500                         | 862                   | 2.705 | 4.000 | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 2.000                         | 690                   | 2.164 | 3.817 | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 1.500                         | 517                   | 1.623 | 2.862 | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 1.000                         | 345                   | 1.082 | 1.908 | 3.613  | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 500                           | 172                   | 541   | 954   | 1.806  | 2.837  | 3.859  | 4.000  | 4.000  |

|       | Flusso medio interno gen x km | Lunghezza linea in km |       |       |       |       |        |        |        |
|-------|-------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
|       |                               | 2                     | 3     | 5     | 10    | 15    | 20     | 25     | 30     |
| Metro | 3.500                         | 1.830                 | 2.464 | 3.449 | 6.022 | 8.791 | 11.986 | 15.059 | 18.453 |
|       | 3.000                         | 1.569                 | 2.112 | 2.956 | 5.162 | 7.535 | 10.274 | 12.908 | 15.817 |
|       | 2.500                         | 1.307                 | 1.760 | 2.464 | 4.301 | 6.279 | 8.561  | 10.756 | 13.181 |
|       | 2.000                         | 1.046                 | 1.408 | 1.971 | 3.441 | 5.024 | 6.849  | 8.605  | 10.545 |
|       | 1.500                         | 784                   | 1.056 | 1.478 | 2.581 | 3.768 | 5.137  | 6.454  | 7.908  |
|       | 1.000                         | 523                   | 704   | 985   | 1.721 | 2.512 | 3.425  | 4.303  | 5.272  |
|       | 500                           | 261                   | 352   | 493   | 860   | 1.256 | 1.712  | 2.151  | 2.636  |
| Tram  | 3.500                         | 1.810                 | 2.429 | 3.320 | 4.000 | 4.000 | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 3.000                         | 1.552                 | 2.082 | 2.846 | 4.000 | 4.000 | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 2.500                         | 1.293                 | 1.735 | 2.371 | 4.000 | 4.000 | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 2.000                         | 1.035                 | 1.388 | 1.897 | 3.259 | 4.000 | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 1.500                         | 776                   | 1.041 | 1.423 | 2.444 | 3.579 | 4.000  | 4.000  | 4.000  |
|       | 1.000                         | 517                   | 694   | 949   | 1.629 | 2.386 | 3.198  | 3.993  | 4.000  |
|       | 500                           | 259                   | 347   | 474   | 815   | 1.193 | 1.599  | 1.996  | 2.424  |

Tabella 4: risultati delle simulazioni per sistemi AGT ed LRT, ipotesi 1 e 0; elaborazione propria

superiore a 2.500 viagg./km, una linea tranviaria di lunghezza medio-bassa (tra i 3 ed i 5 km) vada in crisi per eccesso di domanda. Evento evidenziato, in rosso, dal raggiungimento della capacità del sistema che abbiamo fissato in 4.000 viagg/h per direzione. La situazione cambia, ed in maniera considerevole se la distribuzione dei poli è uniforme lungo il tracciato (ipotesi 0): in tal caso, la "lunghezza critica" della linea, corrispondente al raggiungimento della saturazione, a parità di capacità generativa di flusso risulta praticamente raddoppiata.

La simulazione mostra inoltre, per quanto concerne il sistema AGT, maggiore capacità di adattamento a condizioni di maggiore capacità generativa di flusso delle aree attraversate. Le condizioni di saturazione, infatti, si raggiungono in pochi casi estremi anche nell'ipotesi 1, ma non riguardano mai linee di lunghezza inferiore ai 15 km.

Alla luce di queste prime valutazioni, occorre precisare che:

1. oltre alla capacità del sistema, che è un limite massimo per i flussi di traffico, occorre considerare, come limite minimo, il *valore di traffico economicamente accettabile per la sopravvivenza del sistema*;

2. Tra l'ipotesi 0 e l'ipotesi 1 possono essere presenti, in ambito urbano, tutte le possibili variabili, dipendenti dalla condizione socioeconomica, ancorchè demografica, delle aree interessate.

Il punto 1 suggerisce pertanto come i due sistemi possano essere complementari fra loro: se il sistema tranviario si rivela utile a far fronte a flussi massimi compresi tra 2.500 e 4.000 spostamenti orari, al di sopra di quest'ultimo valore si rivela più adatto un sistema di metropolitana automatica leggera. Infatti, posto 20.000 viaggi/h il flusso di capacità per un sistema due convogli accoppiati, si può scendere a 10.000 se si considera un sistema ad un solo convoglio.

Una flessibilità, anche in termini di modulazione della frequenza dei convogli in linea, che renderebbe più accettabile la presenza di flussi massimi appena superiori a quelli limite per la capacità del sistema tranviario: il valore si essi, anche di poco superiori al limite per una linea LRT, corrisponderebbe alla metà della capacità del sistema AGT (5.000-6.000 veic/h per direzione). Esso sarebbe comunque caratterizzato da una capacità di trasporto superiore a quella del tram, in dipendenza della maggiore velocità commerciale.

Il punto 2 ci fa comprendere come l'analisi condotta in questa sede, su termini astratti rispetto alla realtà, deve comunque considerarsi rappresentativa di una condizione limite della domanda (ipotesi 1) che può essere presa in considerazione come massima sovrastima della domanda associata al sistema; l'ipotesi 0 rappresenta invece l'estremo opposto raggiungibile per la stessa condizione al contorno. Nelle valutazioni che occorre compiere rispetto alla condizione locale, si rivelerà utile stimare l'approssimazione con la quale essa si colloca tra le ipotesi 1 e 0, invero estreme.

Nei grafici, realizzati nell'ambito dei valori fissati per il nostro studio (tra 500 e 3.500

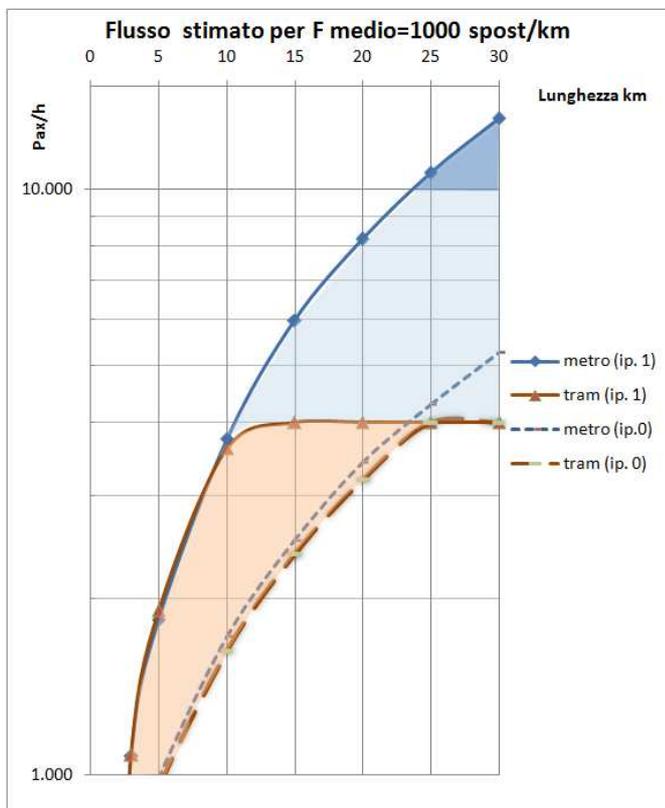


Figura 11– Campi di convenienza per F= 1000 sp./km - Elabor. propria

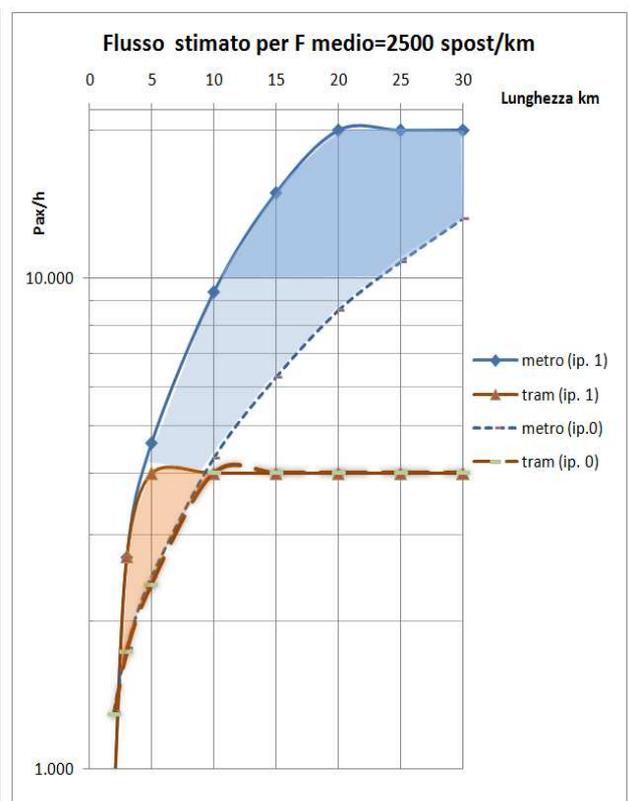


Figura 10– Campi di convenienza per F=2500 sp./km- Elabor. propria

spostamenti medi a km nell'area di influenza) si possono individuare i campi di esistenza dei due sistemi nelle diverse condizioni al contorno, in scala logaritmica: essi sono visualizzabili attraverso l'area contenuta tra le curve relative all'ipotesi 0 ed all'ipotesi 1. Per valori bassi di flusso medio/km, prevale l'estensione dell'area relativa al sistema LRT (fig. 10), mentre per valori molto alti prevale nettamente l'area sottesa dalle curve rappresentative del sistema AGT (fig. 12).

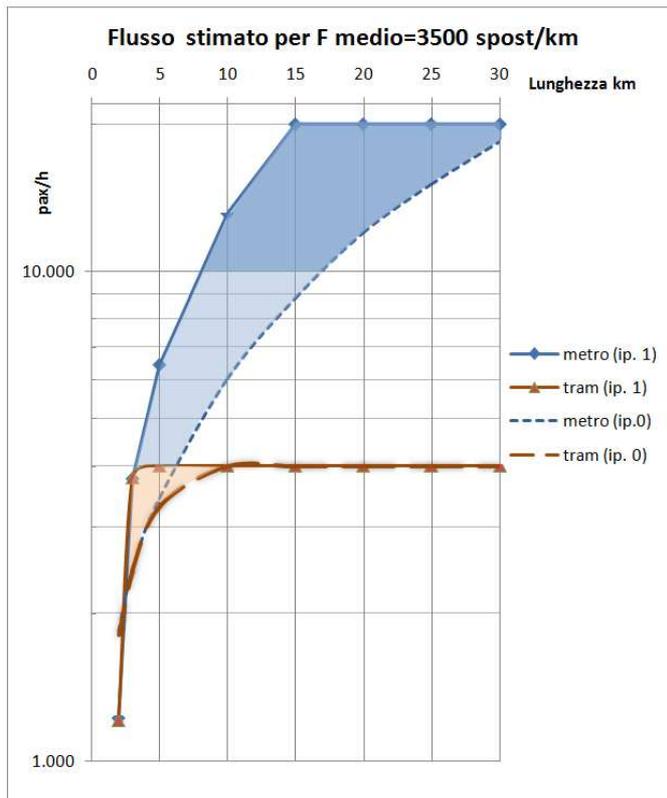


Figura 12 – Campi di convenienza per  $F=3500$  sp./km - Elabor. propria

(fig. 12).

Per valori intermedi, che abbiamo individuato in 2.500 spost/km, le regioni di esistenza dei sistemi (fig.11) rappresentano una situazione di possibile convivenza, o, a limite, scelta alternativa tra i due sistemi. In queste condizioni una linea LRT potrebbe superare la lunghezza di 5 km, a condizione che la correlazione tra generazione ed attrazione di flussi si allontani dal valore minimo, avvicinandosi all'ipotesi 0. Una linea AGT avrebbe invece la possibilità di estendersi fin sopra i 20 km; si potrebbe andare anche oltre, con il crescere della correlazione tra generazione ed attrazione. Una condizione che, peraltro, garantirebbe ai convogli un buon tasso di riempimento.

Viceversa, al di sotto dei 5 km, con valori di flusso del tutto paragonabili a quelli di una linea tranviaria, il sistema AGT non sarebbe più adatto, per motivi di convenienza economica in fase di gestione (basso riempimento dei

Da questa considerazione si ricava facilmente l'impressione della complementarità tra i due sistemi: potrebbero convivere, in un ambito urbano abbastanza esteso e con una generazione di flussi simile a quella sopra ipotizzata, sia linee di tram che di metropolitana, ma con le prime singolarmente di lunghezza inferiore alle seconde. Ovvero, se questa capacità generativa si presentasse in aree limitate, come ad esempio può capitare in centri urbani di media estensione, può essere valutata con favore la realizzazione di sole linee LRT di lunghezza limitata.

Estendendo le valutazioni a tutte le fasce di flusso per km all'interno dell'area di influenza, si è potuto realizzare il grafico di fig.13, in cui si sono evidenziati i campi di esistenza in regime di accettabile convenienza dei sistemi studiati. La colorazione evidenzia che i sistemi AGT ricoprono campi più estesi per valori maggiori di capacità generativa; viceversa, una linea LRT si caratterizza per campi di convenienza più estesi per valori inferiori di quantità di flussi interni.

In fig. 14, per maggiore chiarezza, si è visualizzata a scala ingrandita la condizione di una linea LRT: si noti come per flussi generati molto bassi, nell'ordine dei 500 spostamenti/km, l'estensione critica della linea tranviaria, raggiungendo valori molto alti, comporta flussi massimi insoddisfacenti (inferiori a 1.500 pax/h) per linee tranviarie estese fino a lunghezze considerevoli, nell'ordine degli 8 km. Anche in questo caso, occorre valutare l'utilizzo di sistemi più adatti, con capacità inferiore, per evidenti motivi di convenienza economica in fase gestionale.

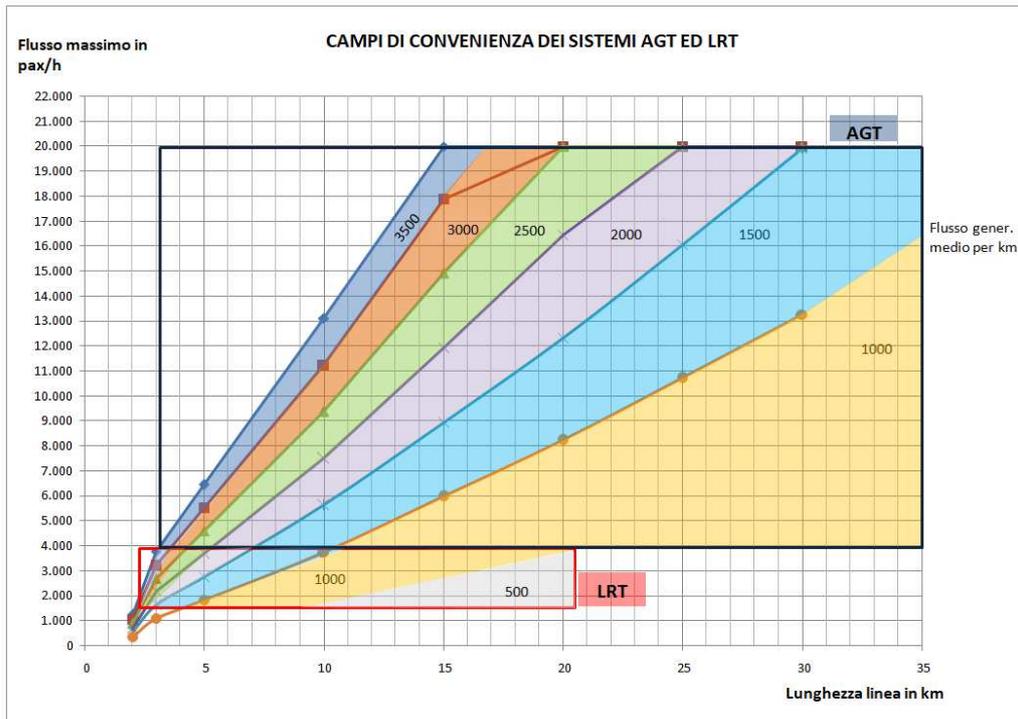


Figura 13: Campi di convenienza AGT-LRT - Elaborazione propria

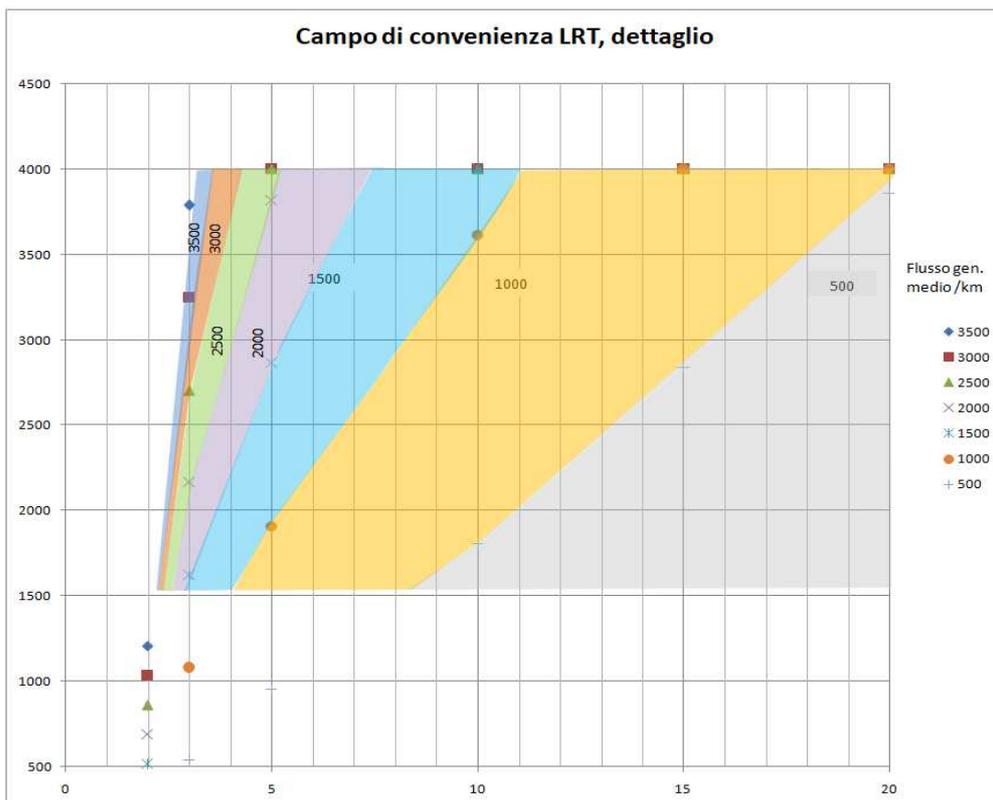


Figura 14: Campi di convenienza LRT - Elaborazione propria

La figura 15, infine, rappresenta in sintesi il grafico flusso generato medio/lunghezza critica della linea, considerando la condizione limite di cui all'ipotesi 1. Anche in questo caso, è evidente come una corretta applicazione dei due sistemi dipenda fortemente dalle condizioni al contorno, che abbiamo sintetizzato nel flusso generato medio per km. Si riscontra in maniera chiara la complementarietà dei sistemi, che è sconsigliabile per valori molto alti del fattore sopra menzionato, dove l'applicazione di sistemi AGT appare più opportuna. Come sopra accennato, al di sotto del valore intermedio di 2.500 spostamenti/h il sistema LRT presenta lunghezze critiche compatibili con un esercizio conveniente.

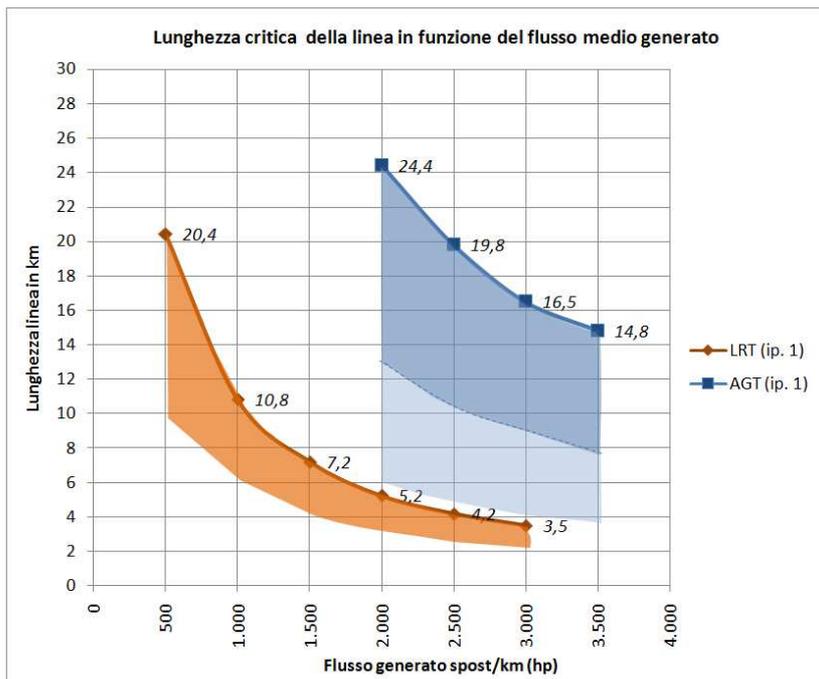


Figura 15: Lunghezze critiche linee AGT-LRT - elaborazione propria

| flusso medio gen/km | Lunghezza di saturazione (km) |            |
|---------------------|-------------------------------|------------|
|                     | LRT (ip.1)                    | AGT (ip.1) |
| 500                 | 20,4                          | ---        |
| 1.000               | 10,8                          | ---        |
| 1.500               | 7,2                           | 30,2       |
| 2.000               | 5,2                           | 24,4       |
| 2.500               | 4,2                           | 19,8       |
| 3.000               | 3,5                           | 16,5       |
| 3.500               | ---                           | 14,8       |

Tabella 5 rapporto lunghezza-flusso medio per i sistemi AGT ed LRT

## 5. LA SCELTA DI SISTEMA ED I COSTI DI GESTIONE

Sappiamo come la scelta del sistema migliore non dipenda soltanto dalla migliore rispondenza di esso alla domanda di trasporto generata, ma anche alla sua sostenibilità nel tempo in termini di costi di gestione e manutenzione.

In tal senso, non si può non rammentare che il sistema tranviario presenta costi di gestione ancora molto elevati per passeggero\*km prodotto. La tecnologia sta invece modificando tale situazione a favore del sistema: è ormai sempre più diffusa la progettazione, se non realizzazione, di sistemi tranviari privi di catenaria di alimentazione. Un supporto non soltanto costoso in termini manutentivi, ma anche oltremodo impattante, specie per linee percorrenti assi stradali situati all'interno di centri storici o aree comunque di pregio.

Va fatto un accenno, in questa sede, anche alla diffusione di sistemi di trasporto tranviario su gomma, destinati, una volta consolidata tale tecnologia, a rivoluzionare del tutto la tipologia del sistema di cui abbiamo trattato. Grazie ai sistemi informatizzati di incarozzamento a riconoscimento di segnaletica orizzontale (il convoglio tranviario si muove semplicemente "leggendo" sulla strada due file di linee bianche tratteggiate) si potranno vedere circolare nelle nostre città tram non solo privi di rotaie, oltre che di catenaria, ma anche senza conducente a bordo. E' il caso del sistema ART recentemente sperimentato in Cina

Per quanto concerne la metropolitana, l'entità degli oneri da sostenere, a fronte di un costo medio generalmente più basso per passeggero\*km, è comunque di non poco conto. Il sistema può pertanto essere giustificato, ancorché valido in termini costi-benefici, soltanto all'interno di città di una certa dimensione, in grado di determinare coefficienti di riempimento relativamente alti. In tal senso, il sistema da solo non basta, essendo ampiamente riscontrata la necessità di realizzare sistemi di supporto in termini di intermodalità. A tal fine sono essenziali:

- parcheggi di interscambio, il più possibile distanti dal centro storico: si è già ampiamente spiegato che il trasporto pubblico è tanto più appetibile rispetto all'auto privata quanto maggiori sono i percorsi da effettuare;
- coordinamento fra sistema di metropolitana e altri sistemi, quali quello ferroviario quello su gomma, attraverso nodi intermodali opportunamente attrezzati.

Quest'ultima valutazione ci fa comprendere come i sistemi tram e metropolitana, lungi dall'essere messi a confronto come alternativi fra loro, possono essere con successo considerati complementari: dagli esempi prima citati, è evidente come in aree urbane con le stesse caratteristiche di distribuzione del traffico, possono convivere linee relativamente corte di tram con linee più lunghe di metropolitana. Se le prime interscambiano alle estremità con le seconde, magari percorrendo ambiti urbani più periferici lasciando alla linea di metropolitana la parte centrale della città, si genera un sistema virtuoso che centra un risultato fondamentale: l'abbandono dell'auto privata da parte degli utenti.

Viceversa, la scelta di un sistema di trasporto insufficiente, per capacità, a recepire la domanda presente all'interno delle città, può comportare come effetto collaterale il mantenimento di un'elevata aliquota appannaggio dell'auto privata. Flusso, quest'ultimo, che dovrebbe incanalarsi lungo strade già in parte occupate proprio dal sistema tranviario LRT che, per garantire una velocità commerciale accettabile, deve circolare in sede esclusiva.

Il risultato, al di là delle conseguenze sul flusso veicolare in superficie, comporterebbe come effetto a regime la riduzione degli spostamenti complessivi da e per le aree interessate, con perdita di interesse da parte dei cittadini verso le stesse. La conseguente perdita di attrattività avrebbe come conseguenza la riduzione delle attività lavorative ivi presenti: un effetto boomerang che comprometterebbe l'immagine del sistema tranviario come elemento di riqualificazione urbana.



Figura 16: Art ( Autonomous rapid transit), il primo tram al mondo a viaggiare senza conducente fonte: <https://www.lettera43.it/>

## CONCLUSIONI

In sintesi, l'esempio di Palermo, da cui abbiamo preso spunto, indica chiaramente come una scelta alternativa netta fra sistema tranviario e sistema metropolitano sia malposta, per le nette differenze tecniche e di prestazioni che li caratterizzano .

La scelta, al di là delle considerazioni preconcepite, non può prescindere da un'attenta conoscenza dell'ambito urbano da servire. In tal senso, lo studio dei bacini di utenza attraversati è essenziale, e deve partire dalla stima del flusso generato all'interno del bacino di utenza di ogni tratta; l'indice di correlazione tra la distribuzione della generazione e quella dell'attrazione dei flussi è molto utile per valutare l'accostarsi alle ipotesi limite di accumulo degli utenti. Dalla stima di questi dati si può procedere alla progettazione del sistema più adatto, che può condurre, tratta per tratta, alla scelta dell'uno o dell'altro. In un sistema a rete, laddove le condizioni al contorno presentano situazioni diversificate, è corretto pensare alla convivenza di entrambi con funzione di complementarità, determinando anche la lunghezza ottimale per ogni linea di trasporto.

Questo approccio, peraltro, può essere esteso a tutti i sistemi di trasporto presenti in un'area metropolitana, tenendo presente il ruolo che deve avere ognuno di essi sulla base della capacità di trasporto; occorre quindi saper integrare, per grandi linee:

- Il sistema ferroviario, con un ruolo di collegamento delle aree suburbane al centro.
- Il sistema tranviario, con il ruolo di collegamento tra le vicine periferie e le aree centrali.

- Il sistema metropolitano leggero e/o pesante (nella città caratterizzati da flussi di traffico superiori ai 15.000 pax/h per direzione) con il compito di attraversare il centro storico o comunque le aree ad alta domanda di trasporto, garantendone l'accessibilità.
- Il sistema di bus su gomma, con il compito di garantire tutte le altre relazioni, nonché i collegamenti con i centri periferici più piccoli e distanti.

Allo stesso modo è necessario focalizzare l'attenzione degli amministratori pubblici sul complesso problema della gestione dei sistemi di trasporto coesistenti nelle aree vaste. Un aspetto troppo spesso sottovalutato dai decisori, con ripercussioni pesantissime sui bilanci della Pubblica Amministrazione durante tutta la fase di esercizio. Gli esempi più riusciti di gestione del trasporto Pubblico Locale sono dati da realtà che hanno saputo far convivere diversi sistemi integrandoli in reti complesse e sviluppandone al massimo l'intermodalità. Elemento essenziale per fare in modo che i flussi viaggiatori si trasferiscano da un sistema all'altro, in maniera tale da ottenere il massimo tasso di riempimento su tutti i vettori coinvolti, rendendo utile la maggior parte dei posti-km prodotti.

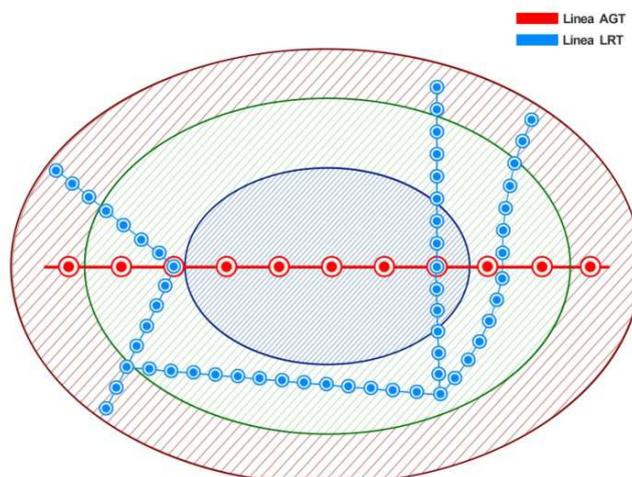


Figura 17: schema ideale per un sistema a rete AGT-LRT

In tal senso, è opportuno affidare la gestione di tutti i sistemi presenti in un'area metropolitana ad un unico Ente, pubblico o privato che sia. In quest'ultimo caso, non deve essere un tabù il ricorso alle procedure ad evidenza pubblica previste dalla Legge, sulla base di un contratto di servizi che stabilisca, in maniera chiara ed omnicomprensiva, patti e condizioni. L'ente proprietario sosterrrebbe in tal modo oneri certi ed invariabili attraverso un canone prefissato, in grado di garantire al gestore privato un utile di impresa, a condizione di massimizzare l'utenza e mantenere alta la qualità del servizio offerto. Un soggetto che possieda caratteristiche tecnico gestionali e professionalità di altissimo profilo, capaci di garantire il funzionamento di ognuno dei sistemi presenti, dal treno all'autobus, dalla metropolitana al tram, nel quadro di un servizio all'insegna della qualità e dell'intermodalità.

---

## BIBLIOGRAFIA

- Astarita V., Giofrè V. – “*Progettare i trasporti, teoria e tecnica*” – Amazon fulfillment
- Barresi G. - Cucuzza S. - Di Maria R. - “*Analisi dei flussi di traffico sulla circonvallazione di Palermo*”, su “*Collana di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie*” n° 2, suppl. 1, maggio 1996, ed. I.P.S.-Roma con il Patrocinio della Società Italiana Infrastrutture Viarie
- Cappelli A. - “*Le prestazioni dei sistemi di trasporto*” - [www.iuav.it](http://www.iuav.it)
- Cascetta E., Gravagnuolo B. - “*Le metropolitane ed il futuro delle città*” – Atti del convegno omonimo, Napoli, 19/02/2013- Clean Edizioni
- Costantino D. - “*Periferie metropolitane e forme insediative a Palermo*” - Università di Palermo, Dipartimento di Progetto e Costruzione Edilizia
- Montebello M. – Accattatis F. - “*Necessità di approfondimento ed estensione dei parametri vetture x km e vetture/ora per cogliere la produttività di un Sistema di Trasporto (nella pianificazione delle reti e la programmazione dei servizi)*” - Atti 3° convegno "sistema su gomma del trasporto passeggeri" coordinato dal M.I.T. . 6-7 giugno 2018
- Pisani F. “*Il sistema sosta in Italia? Si può solo migliorare*” - Traffic Technology and Parking - N. 39
- Ricci S. – “*Tecnica ed economia dei trasporto*” – Hoepli
- Tesoriere G. - Di Maria R. - “*Leggera, automatica ed efficiente*”, su “*Le Strade*” n° 1321, luglio/agosto 1996, ed. La Fiaccola.

## SITOGRAFIA

- Univ. Cagliari [people.unica.it/italomeloni/files/2012/04/Cap.-6-II-modello-di-scelta-modale.ppt](http://people.unica.it/italomeloni/files/2012/04/Cap.-6-II-modello-di-scelta-modale.ppt)
- <http://www.aipark.org/cms/Media/ARTICOLO%20TTP%20N.%2039%20INDAGINE.pdf>
- <https://cityrailways.com/la-fase-2-del-tram-di-palermo/>
- <https://www.lettera43.it/it/articoli/scienza-e-tech/2017/06/07/la-cina-riesce-dove-falli-litalia-ecco-il-primi-tram-senza-binari/211255/>
- [https://www.comune.palermo.it/grandi\\_opere\\_tram.php](https://www.comune.palermo.it/grandi_opere_tram.php)
- <https://www.facebook.com/giovanni.margiotta.1948/videos/986095968247269/>
- <http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Agostino-C/materiali-/2016-17-TR/4.-Prestazioni-e-prog.-Esercizio-2016.pptx>