

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e del Territorio

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Orientamento Infrastrutture di Trasporto



POLITECNICO
MILANO 1863

Adeguamento della rete tranviaria di Milano
funzionale all'esercizio con tram bidirezionali
ed analisi degli effetti sulla domanda di trasporto

Relatore: Chiar.mo Prof. Ing. Roberto MAJA

Correlatore: Ing. Marco PIVI

Tesi di laurea di:

Davide MAZZUCATO

Matr. 964023

Anno accademico 2021/2022

Abstract

Lo scopo di questo Studio è quello di descrivere la rete tranviaria milanese, esaminare gli scenari di sviluppo legati anche al rinnovo della flotta verso mezzi bidirezionali, che anticipano la realizzazione di *hub* tranviari previsti dai piani settoriali di sviluppo della rete (PUMS del Comune di Milano, Programma di Bacino approvato dall’Agenzia TPL e PUMS della Città metropolitana di Milano) e ridefinire gli attraversamenti nell’area centrale, valutando l’efficacia dei provvedimenti dal punto di vista dell’utenza (espressa in termini di livello di servizio offerto) ed incentivando l’impiego di modalità di trasporto leggere compatibili con il contesto urbano, dedicati alla copertura delle brevi distanze.

La presente Ricerca trova le sue radici nelle criticità riscontrate sulla rete tranviaria di Milano dal gestore dei servizi di trasporto pubblico locale (ATM S.p.A.), espresse in termini di squilibri di carico e di offerta di servizio, alle quali ho cercato di porre rimedio proponendo delle strategie di intervento basate sulla segmentazione di linee tranviarie diametrali in transito nell’area centrale e attribuendone una nuova funzione di collegamento radiale ad una sola area periferica, riorganizzando l’assetto di rete a favore di una gestione più flessibile del servizio.

Ringraziamenti

Prima di lasciar spazio alla trattazione, permettetemi di ringraziare chi mi ha sostenuto durante questo percorso di ricerca.

Innanzitutto, ringrazio il mio relatore Prof. Ing. Maja Roberto e il mio correlatore Ing. Pivi Marco (Dirigente Responsabile del Dipartimento di Programmazione del Servizio – DPS – presso l’Azienda Trasporti Milanesi S.p.A) che, con la loro infinita disponibilità, sono stati sempre pronti a darmi le giuste indicazioni in ogni fase della realizzazione dell’elaborato, fin dalla scelta dell’argomento. Grazie a voi ho accresciuto le mie conoscenze e le mie competenze.

Un ringraziamento speciale va al mio tutor aziendale Vazzana Maurizio (Capo Unità Modifiche Rete, Cartografia, Modellistica di ATM) che mi ha aiutato a condurre le ricerche, oggetto dell’elaborato, fornendomi costante assistenza e materiale utile. Ringrazio poi Francesco, grande conoscitore dei sistemi di trasporto, Monica, Roberto, Laura e tutto lo staff della DPS, in cui ho svolto un tirocinio formativo complementare alla redazione della tesi, per l’ospitalità e per le abilità acquisite sul campo.

Introduzione

La mia Tesi riguarda il trasporto collettivo di Milano, in particolare quello tranviario, e si preoccupa di formulare le proposte di segmentazione di alcune linee tranviarie diametrali che attraversano il centro storico in tratti radiali e valutare gli effetti che tali provvedimenti avranno sull'utenza.

In particolare, le domande a cui ho cercato di dar risposta sono frutto degli stimoli provenienti dalle mutevoli necessità di una realtà metropolitana:

- tenuto conto della sensibilità del contesto esaminato, quali strategie di adeguamento devono essere sviluppate per minimizzare l'impatto scaturito da esse sull'ambiente circostante?
- la realizzazione degli attestamenti tronchi in area centrale, funzionali all'impiego di vetture bidirezionali, alleggerirà l'impatto sullo schema viario?
- l'inserimento di raccordi intermedi, con conseguente e progressivo smantellamento degli anelli di capolinea, permetterà di riconvertire e migliorare spazi pubblici, destinandoli alla collettività?
- come si integrano le proposte di intervento con i Piani di Sviluppo di rete e con le rinnovate politiche viabilistiche volte a favorire la mobilità "leggera" a discapito di quella motorizzata individuale?
- quali sono i parametri del livello di servizio interessati dai provvedimenti ipotizzati e che variazioni subiscono?
- quanti sono gli utenti interessati dalla trasformazione dell'assetto di rete?
- come muterà la domanda di trasporto a seguito della segmentazione dei percorsi tranviari?
- ha senso effettuare una tale riorganizzazione della rete tranviaria oppure è preferibile optare verso altre strategie?

Per di più, la presente Ricerca nasce in risposta alla crescente esigenza del Gestore dei trasporti pubblici locali (TPL) di Milano, ATM S.p.A., di regolare l'offerta di servizio agli squilibri di carico evidenziati sulle linee, specialmente nell'ora di punta, e adeguare l'infrastruttura e l'assetto di rete comunale al previsto rinnovo di una quota parte del parco rotabile, con l'acquisizione di nuove vetture bidirezionali.

La Città di Milano rappresenta un caso-studio molto interessante e sfidante da indagare, vista la sua conformazione viabilistica ed urbanistica, contraddistinta da un'area centrale circolare di circa due chilometri di diametro circoscritta dalla Cerchia dei Navigli, nella quale si susseguono beni artistico-culturali di grande qualità da cautelare e valorizzare.

Ciò detto, tenendo conto della configurazione di rete odierna e della sua evoluzione avvenuta nel corso dei decenni, ho elaborato molteplici strategie operative di intervento, analizzando come ciascuna di esse possa influire sugli utilizzatori del servizio di trasporto, quantificando e qualificando gli svantaggi ed i benefici da essi subiti e correlati alla suddetta frammentazione.

L'aspetto innovativo che ho intenzione di presentare in questo elaborato è la formulazione delle strategie di adeguamento infrastrutturale in un'area di pregio, come quella della Cerchia dei Navigli, correlandole all'analisi quantitativa delle conseguenze da esse scaturite sulla domanda di trasporto.

A tal fine è stato necessario elaborare differenti scenari di riferimento sui quali sono stati implementati modelli di simulazione, calibrandoli opportunamente sull'offerta di trasporto collettivo propria di Milano. Ciò non può prescindere da una ricerca dei casi-studio similari, dai quali è stato possibile trarre spunti ed insegnamenti eclatanti e sui quali ho basato il metodo operativo impiegato.

Dopo aver inquadrato il problema di mobilità in generale, svincolandolo dalla realtà del capoluogo lombardo, ho presentato gli elementi salienti dei Piani di Sviluppo della rete urbana di Milano e del programma di rinnovamento della flotta, che rappresentano le fondamenta su cui poi si è strutturata l'attività progettuale e modellistica.

1 – Inquadramento del problema

La configurazione di una rete di trasporto pubblico locale (TPL), unita al livello di servizio offerto all'utenza, incide fortemente sulla domanda di trasporto e, in particolare, sulla scelta del sistema di trasporto, inteso sia come mono-modale oppure multi-modale.

A partire da questa premessa si sviluppa il presente lavoro sperimentale, attraverso il quale mi prefiggo di definire e quantificare la relazione che sussiste fra riassetto di rete ed evoluzione della domanda, soffermandomi sul contesto urbano di Milano.

La scelta del Capoluogo lombardo non è stata casuale, infatti si prevede che la Città subirà notevoli sviluppi e trasformazioni dell'offerta di servizio TPL, alla luce degli squilibri di carico che oggi interessano parte della rete, in particolare quella tranviaria in attraversamento del centro storico.

Tenendo conto delle problematiche evidenziate sulla rete urbana di Milano, svilupperò degli schemi innovativi di sistema, proponendo un modello di rete segmentata che sia in accordo con i Piani di Sviluppo consolidati e, al contempo, compatibile con la progressiva sostituzione del parco veicolare attualmente in circolazione.

Peraltro, l'impiego di moderne vetture bidirezionali, combinato alle proposte di ristrutturazione della rete, faciliterà il dimensionamento di un servizio opportunamente calibrato alla domanda di trasporto. Data l'interdipendenza fra domanda ed offerta di trasporto, evidenzierò la presunta efficacia di tali strategie operative, comparandole con lo scenario di riferimento.

Questo Studio si propone quindi come un utile strumento di analisi e potrà essere preso in considerazione durante la formulazione di scenari esplorativi di rete che prevedano la ristrutturazione della stessa, soprattutto in realtà urbane simili a Milano, e la valutazione degli effetti che inevitabilmente risentirà la domanda di trasporto.

1.1 – Impulsi e questioni sollevate

Dal Secondo Dopoguerra in molti Paesi europei si è assistito a un generale smantellamento delle reti tranviarie nate nell'ottocento, lasciando al trasporto pubblico i servizi su gomma, e prevedendo metropolitane "pesanti" laddove i volumi di traffico richiedevano la presenza di mezzi di trasporto efficienti: in quegli anni i tram, generalmente in sede promiscua, erano visti principalmente come un limite all'avanzata della motorizzazione di massa.

L'imperativo categorico era che le rotaie dovessero sparire dalle strade!

Nel corso dei decenni la mutata percezione della qualità della vita cittadina, dovuta all'aumento della congestione automobilistica e dell'inquinamento, ma anche a stili di vita diversi, ha favorito un'inversione di rotta, tanto che in molte nazioni (non solo europee) si sta manifestando una nuova tendenza, nota come "rinascimento tranviario", non priva di problematiche e contrasti, che hanno portato a rivedere il servizio di trasporto offerto e a proporre nuovi provvedimenti strutturali sull'infrastruttura tranviaria funzionali all'esercizio.

A tal proposito, negli ultimi anni, uno dei temi più importanti, complessi e dibattuti è stato quello del reinserimento di binari tranviari nelle zone centrali delle città e in particolare in quelle storiche, le quali spesso sono caratterizzate da viabilità non ampie e da contesti urbani monumentali o comunque soggette a tutela.

Gli interventi devono essere realizzabili sotto gli aspetti costruttivi e funzionali, senza però ignorare il tema della sostenibilità economica ed il riutilizzo/riconversione dell'infrastruttura preesistente, ragion per cui l'affacciarsi delle prime realizzazioni di attraversamento in superficie di zone pedonalizzate e riqualificate con specifici provvedimenti urbanistici, ha mostrato come fosse un'efficace soluzione a costi contenuti e ben integrata con il contesto.

Fra gli interventi che possono facilitare e rendere prioritarie le modalità di spostamento "dolci", pedonali e ciclabili, a discapito di quelle individuali motorizzate, la segmentazione delle reti tranviarie diametrali passanti per l'area urbana centrale in coppie di linee radiali può rappresentare un'importante alternativa da considerare previo studio della localizzazione degli attestamenti e dei risultati trasportistici che si intendono perseguire, nonché delle modalità finalizzate al raggiungimento di tali risultati (attestamenti tangenti, indipendenti, con tratte sovrapposte o mantenimento della continuità mediante sottoattraversamenti o tunnel tranviari).

Nello specifico, la presente tesi si propone di analizzare in prevalenza gli attestamenti tangenti o indipendenti o comunque non interconnessi tra loro, con finalità di ridurre gli impatti ricadenti sulla viabilità centrale e di recuperare spazi pregiati oggi impegnati dall'infrastruttura.

Ciò porta dietro con sé molti interrogativi, legati in primis alla efficacia del servizio di trasporto, che risulta minore e risentita dagli utenti sottoforma di dilatazione dei tempi di viaggio, causata dall'imposizione, dall'impostazione, dal tempo e dalla modalità dell'interscambio.

1.1.1 – Limitazione di traffico e pedonalizzazione

Il “ritorno ai tram” ha spronato le amministrazioni locali a disincentivare l’uso dei veicoli motorizzati privati, anche con azioni deterrenti quali l’introduzione di zone a traffico interdetto/limitato, provocando conseguentemente un progressivo decongestionamento della viabilità centrale ed la riduzione delle emissioni locali di inquinanti; non solo, i tram spesso hanno rappresentato una vera e propria attrazione turistica, nonché un elemento ben integrato con il paesaggio urbano, anche grazie al loro basso impatto di occupazione del suolo pubblico.

Va da sé che l’attrattività dell’offerta di TPL dipende strettamente dall’affidabilità del servizio, il quale deve quindi essere il più indipendente possibile dai flussi di traffico stradale (da qui la strategia di attuare una forma di separazione orizzontale), dato che la rete di superficie subisce pesantemente i disagi dovuti alla commistione con il traffico veicolare con effetti sono più sensibili per i sistemi a guida vincolata.

La mancanza di corsie riservate su molte tratte, l’angustia delle strade, il numero rilevante di soste abusive, sono fattori che riducono sensibilmente la regolarità dell’esercizio e la velocità dei mezzi di superficie; elementi che si sommano alla già grave situazione del traffico.

La rete stradale è infatti spesso inadeguata e mal sopporta la convivenza delle differenti esigenze di trasporto del traffico privato e dei mezzi pubblici: alcune arterie sono interessate da un rilevante numero di sinistri, a sottolineare l’incapacità della rete di smaltire con sicurezza gli attuali flussi di traffico.

Purtroppo, molte volte gli interventi di separazione del traffico privato da quello pubblico, sia pur difficilmente attuabili, non sono completamente risolutivi; mancano infatti, soprattutto nelle zone centrali, spazi da dedicare alle corsie riservate, che rappresentano la soluzione migliore dal punto di vista della circolazione dei mezzi di trasporto pubblico di superficie.

In particolare, la realizzazione di zone pedonali è giustificata dalla volontà di ridurre/eliminare le pericolose interferenze fra i pedoni, relegati in piccoli spazi, e il crescente traffico motorizzato; è però doveroso evidenziare che le aree pedonali non sono sempre sinonimo di completa interdizione ai mezzi di trasporto, specie se di massa, a patto che il regime di circolazione di quest’ultimi sia adeguatamente disciplinato (con velocità massima pari a 20km/h, con una distanza di visibilità pari almeno a circa 15m). Soprattutto nei paesi del Nord Europa è ormai opinione diffusa infatti la teoria dello *shared-space* piuttosto che la separazione forzata tra le diverse modalità di traffico.

Il dimensionamento di tali spazi a traffico limitato infatti non può prescindere da misure atte a fornire servizi di trasporto essenziali alle aree interessate, ove solitamente è alta la concentrazione di attività commerciali, strutture ricettive e quartieri residenziali. A tal proposito, in Europa sono molteplici gli esempi di realtà urbane in cui servizi di TPL e zone pedonali convivono armoniosamente (Vienna, Praga, ecc.), fermo restando che i percorsi e le fermate dei mezzi siano opportunamente segnalate e, in prevalenza, senza barriere parapetonali cui invece sembra che non si possa farne a meno in Italia.

Garantire la massima accessibilità ai mezzi di superficie, specie nel centro urbano, rappresenta di fatto un'efficace strategia per includere la porzione di utenza anziana e/o a ridotta mobilità, oggi certamente non trascurabile (mediamente pari al 15/20% nell'Eurozona) e che peraltro è prevista in costante aumento nei prossimi anni.

Ciò ha senso solo se la rete è sufficientemente capillare ed estesa, ragion per cui si stanno concentrando gli sforzi sull'ampiamiento della viabilità su rotaia, ma va anche detto che la demolizione dei tracciati tranviari (avvenuta fra gli anni '60 ed '80 del '900), per lo più ereditati dalla prima metà del secolo scorso, non è stata ovunque completa, ragion per cui in molte aree urbane si è partiti proprio da questi per far fronte ad una rinnovata esigenza di mobilità su ferro, rispondendo al bisogno di un servizio altamente efficiente ed al contempo efficace.

Come anticipato, la realizzazione/riqualificazione delle reti tranviarie urbane necessita però di ulteriori interventi volti a disincentivare l'uso della vettura privata e, in generale, abbattere la concorrenza modale; a tal proposito, un'azione valida potrebbe essere quella di erogare servizi di *park & ride* diffusi nella periferia dell'area urbana, così da intercettare gli utenti in provenienza da aree esterne, ove la rete TPL non è significativamente sviluppata.

In questo modo, gli utenti, per lo più pendolari, possono accedere facilmente al sistema di trasporto cittadino senza gravare sulla viabilità centrale che, per i suoi limiti infrastrutturali, è facilmente congestionabile; questa iniziativa non può però slegarsi dall'erogazione di un'offerta di trasporto ad elevato livello di servizio, con l'obiettivo di minimizzare i tempi di interscambio che, altrimenti, sarebbero deterrenti alla multi-modalità.

Per di più, negli ultimi anni si è assistito allo sviluppo di grandi insediamenti residenziali disposti esternamente alla "cintura" storica, facendo sì che in molte città europee nascesse la necessità di collegare tali distretti periferici densamente abitati con il centro; per rispondere a questo bisogno di mobilità sono state realizzate/prolungate numerose linee tranviarie a sviluppo radiale (questa impostazione di rete è, ad esempio, molto comune nei paesi dell'ex blocco sovietico piuttosto che nell'Europa occidentale).

Da ciò si capisce che quando si progettano interventi di rinnovamento e potenziamento infrastrutturale è sempre necessario considerare, sia pur in forma approssimata, le previsioni di sviluppo di insediamenti residenziali/commerciali/poli industriali nelle aree coinvolte dall'operazione.

Fatte tali considerazioni preliminari, va ricordato che il tram moderno è diverso da quello che una volta circolava in modo pervasivo nelle città, con piccole vetture sparse su molte linee e con un assetto di rete che privilegiava la flessibilità di esercizio piuttosto che la funzione trasportistica (linee con disegno a "V" stretta nel caso milanese): il tram di oggi è un mezzo necessariamente più grande (più lungo) per soddisfare obiettivi di capacità di trasporto e di economia di esercizio, quindi per certi versi più difficile da inserire in spazi limitati, ma lo si immette solo in pochi itinerari aventi funzione di linee forti, ai quali dedicare tutte le necessarie attenzioni, lasciando ad altri mezzi il compito dell'adduzione/distribuzione.

1.2 – Sistemi di trasporto e parametri di riferimento

Per comprendere il ruolo e le funzioni svolte dal servizio tranviario urbano, s'intende per primo richiamare il principio dell'integrazione metropolitana che è molto diffusa in Europa, ossia una forma di organizzazione che permette di sviluppare politiche di network strutturate su più pilastri:

- le autolinee per la connessione e il primo attestamento;
- le linee metropolitane e le tranvie per l'accesso al centro;
- i treni locali e suburbani per la raccolta diffusa dei pendolari.

Quando si deve scegliere e dimensionare il più adeguato sistema di trasporto non ci si può limitare a valutare solo la capacità offerta per vettura, bensì bisogna considerare tutti i parametri che subentrano nella definizione del livello di servizio offerto (in primo luogo la velocità commerciale e la frequenza), senza dimenticare il criterio perseguito nella determinazione della funzione di costo e dell'efficienza aziendale.

Peraltro, considerare unicamente la capacità di trasporto è oltremodo forviante, poiché bisogna sempre discernere il suo valore ordinario da quello garantito durante le ore di picco, rapportando quest'ultimo con la capacità delle stazioni, che in genere è più contenuta.

Infine, preme distinguere la capacità teorica di una rete di trasporto, computata mediante formulazioni analitiche opportunamente calibrate su situazioni reali similari, da quella pratica che, in genere, è significativamente inferiore a causa delle molteplici condizioni al contorno che la influenzano negativamente (si pensi banalmente al ritardo accumulato lungolinea in caso di sistemi vincolati in promiscuità con il traffico veicolare ed agli effetti che esso genera sulla gestione del servizio in attestamento al capolinea).

1.2.1 – Caratteristiche del sistema tranviario tradizionale o “classico”

Nella eterogeneità del panorama modale, la tranvia si qualifica dunque come confortevole sistema intermedio tra le metropolitane e gli autobus, adeguandosi flessibilmente alla natura delle zone urbane attraversate (specialmente se pedonali).

Nondimeno, l'innovazione tecnologica ha permesso di eliminare gli aspetti negativi che vengono tuttora imputati ai tram, portando a ritenerli erroneamente inadatti alla loro circolazione nei centri delle città.

Basti ricordare che sono stati sviluppati armamenti in grado di ridurre fortemente la trasmissione di vibrazioni e di permettere agevoli manutenzioni, un complesso di accorgimenti rende la marcia silenziosa, ed è possibile eliminare la linea aerea di contatto, quando abbia un impatto visuale negativo o comunque interferisca con le presenze ambientali.

Inquadramento del problema

Per completezza espositiva, di seguito allego una tabella contenente le principali caratteristiche che contraddistinguono il sistema di trasporto tranviario, sia dal punto di vista veicolare/infrastrutturale, che operativo.

SISTEMA TRANVIARIO		
Caratteristiche del veicolo	Numero vetture in composizione [-]	1 ÷ 5
	Lunghezza treno [m]	14 ÷ 35
	Pianale	ribassato/parzialmente ribassato/alto
	Posti seduti offerti per vettura [-]	22 ÷ 40
	Posti complessivi per vettura [-]	100 ÷ 250
Infrastruttura e circolazione	Separazione orizzontale [% della lunghezza]	0 ÷ 40
	Regime di circolazione	manuale a vista
	Alimentazione elettrica	presa di contatto aerea/terrestre/batteria
Stazioni	Banchina	ribassata
	Controlli agli accessi	inesistenti
Caratteristiche operative	Velocità massima [km/h]	60 ÷ 70
	Velocità commerciale [km/h]	12 ÷ 20
	Frequenza massima al picco nelle sezioni condivise [treni/h]	60 ÷ 120
	Frequenza massima in morbida [treni/h]	5 ÷ 12
	Capacità oraria offerta bidirezionale [pax/h]	4.000 ÷ 10.000
	Affidabilità del servizio offerto	bassa/media
Caratteristiche della rete di trasporto	Integrazione con la rete di trasporto	buona
	copertura territoriale del servizio	molto capillare
	Interdistanza fra stazioni [m]	250 ÷ 500
	Lunghezza media di viaggio	corto/medio raggio
	Interscambio a piedi con altri sistemi Tpl	elevata integrazione ed accessibilità

Tab. 1.1 Parametri e ordini di grandezza caratterizzanti il sistema di trasporto tranviario

Fonte: Rielaborazione da Urban Transit – Systems and Technology (V. Vuchic)

1.3 – Configurazioni delle reti di trasporto

La forma geometrica delle città, unita alla disposizione degli assi di forza, fornisce delle precise caratteristiche e funzionalità alla rete di TPL: la conformazione che lo caratterizza influisce direttamente sull'efficienza operativa e l'attrattività del servizio.

A tal proposito, sebbene alcune linee possano presentare andamenti irregolari, la quasi totalità delle stesse può essere riconducibile ad una ristretta casistica, che è facilmente rintracciabile nelle reti TPL urbane di molte città di medio-grandi dimensioni.

Si possono infatti distinguere le linee:

- radiali;
- diametrali;
- circolari;
- tangenziali;
- ramificate;

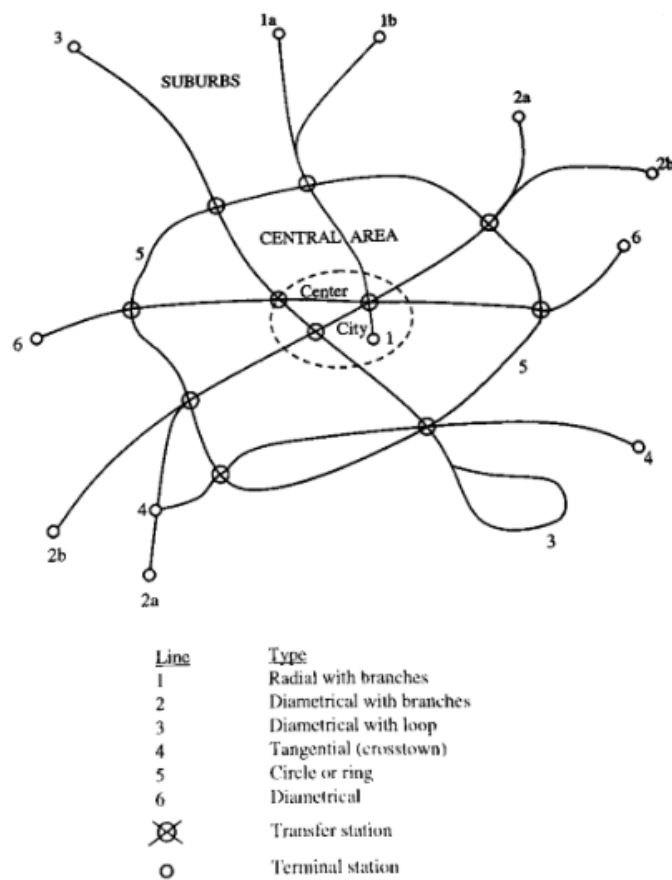


Fig. 1.1 Sviluppo geometrico delle linee di trasporto

Fonte: Urban Transit – Operations, Planning, and Economics (V. Vuchic)

Le linee radiali presentano un'estensione limitata e sono dimensionate per soddisfare l'esigenza di mobilità da una specifica regione urbana periferica all'area più centrale o comunque ai poli finanziari/commerciali (e viceversa), con traffico per lo più pendolare (verso il centro la mattina e viceversa il pomeriggio/sera) e quindi con caratteristiche maggiormente di adduzione ad altri sistemi di trasporto di gerarchia superiore.

Su questi percorsi è più agevole la programmazione di un'offerta di trasporto adeguata al mutevole flusso di utenti, poiché non si è costretti a garantire il medesimo livello di servizio anche nel ramo contro-carico, a patto di disporre di binari in esubero e/o impianti di rimessaggio in caso di sistemi di trasporto urbani a guida vincolata, in particolare tranviari.

Quanto scritto è valido fin tanto che l'attestamento centrale sia inseribile nel fitto tessuto urbano caratterizzante l'area, cosa più semplice qualora le linee siano esercite con mezzi bidirezionali ed i capilinea siano tronchi, ossia privi dell'ingombrante anello di inversione.

Le linee diametrali sono caratterizzate da un percorso che collega due zone periferiche passando per il centro di una realtà urbana e, come tali, risentono maggiormente degli squilibri di carico che si verificano specialmente durante le ore di punta mattinale e serale; peraltro, dato il loro sviluppo, tali linee non permettono una gestione flessibile del servizio.

Le linee circolari sono caratterizzate da un percorso che circonda l'area centrale e rappresentano a tutti gli effetti una colonna portante dei TPL, poiché consentono di collegare numerosi poli di interesse senza però dover passare per il centro urbano.

Le linee tangenziali lambiscono l'area centrale raccordandosi ad una coppia di zone periurbane; il punto di contatto con la cerchia interna solitamente presenta una o più fermate di interscambio con altri sistemi di trasporto di forza (siano essi metropolitani o ferroviari), in modo di garantire continuità all'offerta di servizio sull'intera rete.

Le linee ramificate sono a tutti gli effetti dei percorsi radiali che presentano delle diramazioni verso aree periferiche della città o dei comuni limitrofi ad alta domanda e possono garantire un servizio fortemente correlato a quello che interessa la restante porzione del percorso oppure totalmente indipendente da esso.

Alla luce della classificazione soprastante, non bisogna intendere le diverse tipologie di percorso fra loro indipendenti ed escludenti, anzi frequentemente sono combinate, anche perché le grandi aree urbane, tipicamente, sono contraddistinte da una certa eterogeneità, intesa in termini di viabilità e modalità di trasporto, densità abitativa, distribuzione dei poli d'interesse, valore architettonico degli immobili, ecc.

La differenziazione per tipologia di linee non è solo riferibile allo sviluppo in pianta, poiché grande importanza è assunta anche dall'andamento altimetrico del tracciato, che può distinguersi in:

- sopraelevato, mediante viadotti, ponti, sterri e/o muri di sostegno, che interessano solo brevi porzioni dello sviluppo della linea;
- a livello, con sede in promiscuità con il traffico veicolare, oppure parzialmente/integralmente protetta (quest'ultima è una soluzione tipicamente adottata per le metrotranvie);

- in trincea a cielo aperto: è una strategia utilizzata per limitare gli impatti audio-visivi dell'infrastruttura e/o per sottopassare puntualmente le intersezioni con linee ad alta velocità;
- in sotterraneo mediante tunnel, permettendo una separazione completa dall'ambiente circostante, a garanzia di un elevato livello di servizio offerto: è una valida soluzione in caso di sottoattraversamento dell'area centrale/storica di una realtà urbana di medio - grandi dimensioni.

1.3.1 – Focus sul sistema tranviario

Quanto scritto vale chiaramente per tutti i sistemi di trasporto urbani per cui, volendosi soffermare sulla modalità tranviaria, è possibile individuare anche per essa differenti tipologie di tracciati, ai quali corrisponde un peculiare servizio di trasporto.

Ciò non di meno, nella progettazione delle reti tranviarie/metro-tranviarie ci si propone di raggiungere gli obiettivi di:

- flessibilità operativa;
- elevata affidabilità del servizio;

pertanto, è necessario dimensionare un adeguato numero di binari di raccordo e anelli di inversione (specialmente per le linee esercite con tram monodirezionali) per eseguire eventuali tagli alle corse, ed attraversamenti impiegati per la manovra dei veicoli in condizioni emergenziali.

In particolare, gli incroci, i binari interlacciati (a forbice semplice o doppia) e gli attraversamenti, agevolano la rimodulazione del servizio offerto in ragione della domanda (ad esempio con la pianificazione di eventuali rinforzi al picco), velocizzano le procedure di ricovero dei mezzi in avaria e, in aggiunta, riducono i chilometri percorsi dai veicoli.

Inoltre, soprattutto per i sistemi a guida vincolata, si può concludere che la separazione dei flussi di traffico ha una grande influenza fisica ed operativa sulla modalità di trasporto, con oneri di investimento in aumento al crescere del grado di segregazione; stesso dicasi per il potere attrattivo suscitato sull'utenza, il livello e la qualità del servizio offerto, che ricorsivamente incidono positivamente sui costi operativi e sulla produttività.

Peraltro, questa tecnica permette di migliorare la visibilità, elemento essenziale dato il regime di circolazione a vista, e l'integrazione con il paesaggio circostante, grazie anche ad interventi di piantumazione ragionati.

In aggiunta, è doveroso rimarcare che il percorso tranviario dipende strettamente dal tipo di veicoli in servizio, poiché i mezzi monodirezionali impongono una maggiore estensione del tracciato, oltre che un più elevato numero di attraversamenti, se comparato con quello esercito da vetture bidirezionali (come si evince dalla seguente rappresentazione schematica).

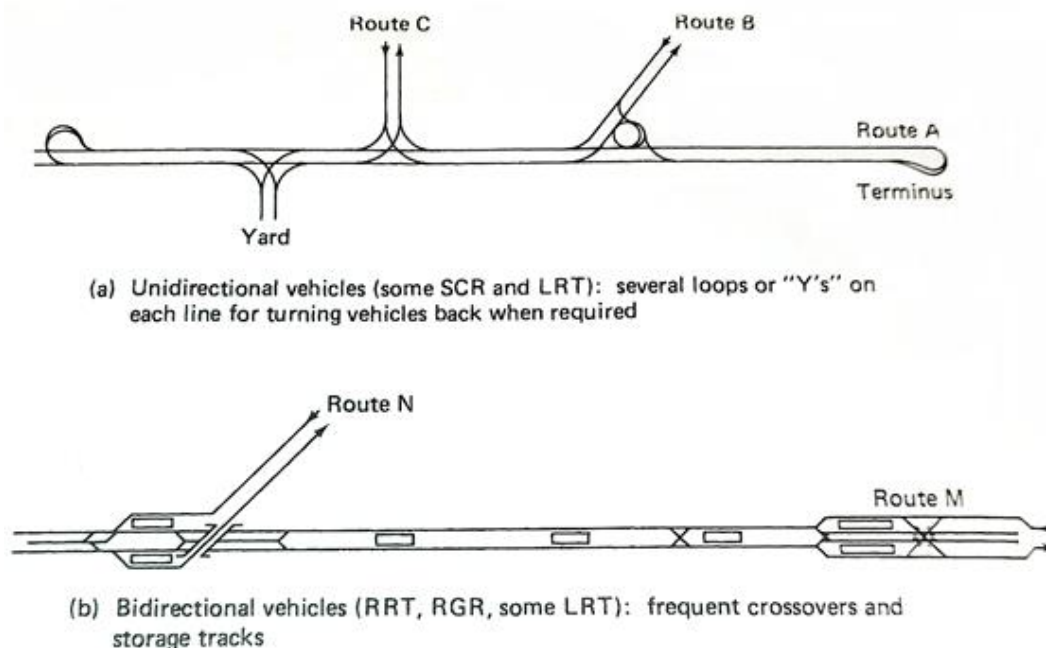


Fig. 1.2 *Layout* del tracciato percorso da mezzi monodirezionali (a) e soluzione equivalente adatta ai veicoli bidirezionali (b)

Fonte: Urban Transit – Systems and Technology (V. Vuchic)

SCR (Street-Cars) = vetture tranviarie tradizionali; LRT (Light Rail Train) = mezzi per ferrovie "leggere" (assimilabili alle cosiddette metrotranvie, quindi veicoli di derivazione tranviaria più massivi e capienti) nei paesi di lingua anglosassone o Stadtbahn in quelli tedescofoni.

1.4 – Attraversamento del centro cittadino

Rimane il fatto che il centro di una grande o di una media città ha assoluto bisogno di un trasporto pubblico capace e di qualità: difficoltà di spostamento per chi vi risiede o per chi intende fruire dei servizi e delle attrattive del centro possono portare al suo snaturamento.

Numerosi esempi testimoniano infatti il grande potere attrattivo esercitato dai sistemi "leggeri" a guida vincolata (SCR, LRT o Stadtbahn), i quali spronano l'utenza alla multi-modalità collettiva ben più di quanto possa sortire il potenziamento dei soli servizi urbani su gomma (con soluzioni nell'immaginario tendenti ai BRT, Bus Rapid Transit, ossia servizi di elevata qualità, spesso in sede separata), a cui erroneamente sovente viene attribuita l'attitudine di fornire gli stessi servizi delle tranvie a fronte di minori costi complessivi (di realizzazione ed operativi, anche se questi ultimi dipendono molto dalle condizioni sociali di ciascun paese).

Pertanto, le differenti alternative modali non devono essere viste come fra loro concorrenti, quanto più come elementi che, combinati, compongono il sistema di trasporto intermodale urbano, il quale si pone come supporto attivo di mobilità collettiva, migliorando la qualità della vita dei suoi utilizzatori.

Va da sé che qualora il centro non sia di piccola estensione, il mezzo di trasporto forte deve entrarvi, perché non vi sarebbe qualità se l'utente dovesse lasciare il mezzo ai bordi e fare un lungo percorso a piedi o cambiare mezzo, col conseguente disagio e tempo di attesa. Infatti, un interscambio inadeguato rappresenta solitamente un ostacolo per i passeggeri che quindi sono sempre più scoraggiati nell'utilizzare i sistemi di trasporto collettivi a favore del mezzo privato.

In merito a ciò, talvolta si minimizza il problema di un percorso a piedi che superi i 5-6 minuti, pensando magari al turista e trascurando le esigenze di chi non è in buone condizioni fisiche, o deve farlo due o quattro volte al giorno, pressato da impegni di vario genere; e si propongono soluzioni inadatte a forti flussi di passeggeri e con un elevato costo d'esercizio per passeggero.

La percezione che l'utenza ha del tratto percorso a piedi e l'attrattiva di questo modo di spostamento dipende certamente dalle condizioni al contorno, fra le quali spicca l'inquinamento generato dal traffico veicolare e le interferenze con esso, l'ampiezza dei marciapiedi, l'assenza di tettoie per ripararsi da eventi meteorici avversi, la presenza di panchine, ecc.

Ragion per cui sempre più spesso le amministrazioni locali stanno sforzandosi sempre più di separare il traffico pedonale da quello veicolare, creando una vera e propria rete di aree pedonali (com'è osservabile ad esempio a Francoforte, Monaco di Baviera e Vienna, oppure a Berlino).

L'unico limite dello spostarsi a piedi è rappresentato dalla ridotta velocità, pertanto ove possibile si è scelto di integrare dei sistemi meccanizzati continui, quali tappeti o scale mobili, che permettono all'utenza di percorrere la stessa distanza in un tempo minore oppure di massimizzare la distanza percorsa nello stesso intervallo temporale.

L'estensione e la linearità del percorso pedonale risultano quindi essere elementi di cruciale importanza nella valutazione dell'efficacia degli interventi di segmentazione, come avrò modo di spiegare nel corso del presente Documento.

Allo stesso tempo non dobbiamo credere che l'interscambio sia sempre solo un disturbo per l'utenza (dilatazione del tempo di viaggio, riduzione della velocità commerciale, percorsi a piedi, ecc.), infatti offre un ampio ventaglio di percorsi che altrimenti non sarebbero disponibili, potendo garantire un servizio affidabile anche in situazioni non ordinarie.

In merito alla questione dell'interscambio, è necessario dimensionare un servizio di trasferimento commisurato alla configurazione della rete, che ivi può essere distinta in:

- unifocale;
- multifocale.

L'interscambio unifocale riguarda quelle reti in cui linee radiali e diametrali attestano o passano attraverso un unico percorso centrale e rispetto alle quali è necessario improntare un servizio di collegamento che tenga conto del livello di servizio desiderato (soprattutto della frequenza), della distanza fra i capi da collegare e degli oneri di investimento e di esercizio.

La rete che presenta più nodi di convergenza in area centrale è detta multifocale; il principio di dimensionamento del servizio di trasporto di connessione è analogo a quello della rete unifocale, con la differenza che tipicamente si riconoscono dei collegamenti diretti (spesso in tunnel) ed altri con funzione più distributiva.

Qui di seguito propongo una vista schematica delle reti unifocali e multifocali.

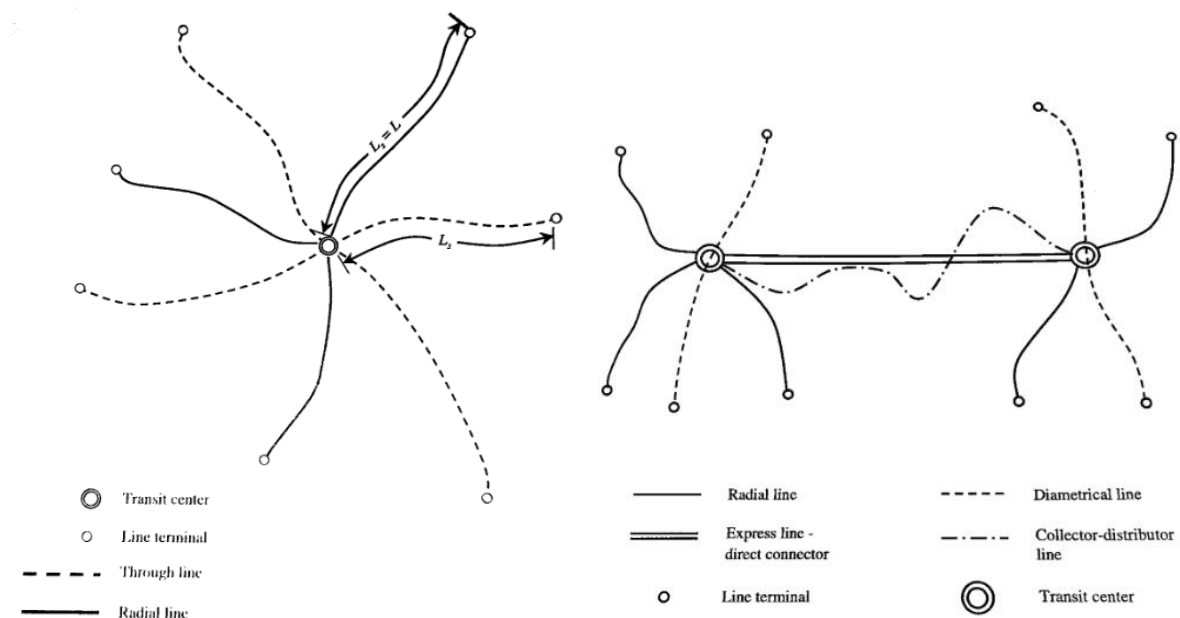


Fig. 1.3 Rete unifocale (a sinistra) e multifocale (a destra)

Fonte: Urban Transit Operations, Planning, and Economics (V. Vuchic)

La conoscenza e la definizione dello schema di rete è un punto di partenza per l'attività di progettazione e pianificazione, poiché su di esso è opportunamente calibrato il criterio di analisi impiegato per confrontare le molteplici alternative elaborate.

1.5 – Pianificazione delle reti di trasporto

Da quanto riportato finora, si comprende che l'attività di pianificazione richiede un'approfondita fase progettuale, da svolgere comunque sulla base di una valida analisi trasportistica e di uno scenario di rete.

In genere, possiamo riconoscere due differenti tipologie di Piani di Trasporto in base all'orizzonte temporale di riferimento:

- breve termine;
- lungo termine.

In alcuni casi si parla anche di progetti di medio termine qualora siano coinvolti investimenti non trascurabili e l'orizzonte temporale si attesti sui 5-10 anni.

I piani a breve termine (BT) riguardano progetti e/o misure che possono essere implementate in 3-5 anni, talvolta fino a 8 anni e, solitamente, non includono investimenti consistenti o comunque progetti infrastrutturali di grande calibro.

Questi schemi a BT dipendono inevitabilmente dalle condizioni attuali o previste nel futuro prossimo, dal momento che possono essere facilmente alterate o anche ripristinate; inoltre, presuppongono che lo scenario di breve termine sia compatibile con quello di lunga veduta.

I piani a lungo termine (LT) consistono di interventi programmati e/o pianificati (nell'arco dei successivi 10-25 anni) che interessano le principali infrastrutture, linee o addirittura l'intera rete di trasporto; possono richiedere grandi investimenti per interventi strutturali e l'ammodernamento del parco veicolare.

Gli interventi previsti negli scenari di LT sono permanenti e difficilmente reversibili, per di più impattano e influenzano in modo tangibile le altre attività sociali; in genere, tali effetti possono essere simulati e stimati accuratamente, sebbene questa attività venga ripetuta cronicamente ogni 3-5 anni, dato che nel frattempo le condizioni al contorno possono subire apprezzabili variazioni.

Inoltre, la pianificazione delle reti di trasporto si propone di perseguire i seguenti tre obiettivi:

- fornire un servizio di alto livello, volto a massimizzare il numero di passeggeri per chilometro trasportato (con velocità commerciali notevoli per esempio);
- massimizzare l'efficienza operativa (minimizzando il costo per unità di servizio erogato);
- impattare positivamente sul contesto e sulla società (riducendo la congestione stradale ad esempio).

Questi tre obiettivi, com'è facile intendere, corrispondono, rispettivamente, al soddisfacimento delle esigenze di tre soggetti coinvolti:

- i passeggeri;
- il gestore dei servizi di trasporto;
- la comunità.

Il primo obiettivo, che può essere inteso come la volontà di garantire la massima capacità attrattiva del sistema di trasporto, è quello su cui i pianificatori riversano massima attenzione e sul quale anch'io ho cercato di fare delle valutazioni.

In tal senso, uno degli elementi cardine quando si parla di capacità attrattiva è certamente l'area di copertura della rete, dalla quale dipende fortemente l'accessibilità al servizio di trasporto; a tal proposito, l'accessibilità territoriale si può distinguere in:

- primaria: equivale allo spazio percorribile in 5 minuti a piedi, ossia circa 400m;
- secondaria: corrisponde alla distanza percorsa in 10 minuti a piedi, pari a circa 800m.

Va da sé che, se l'accessibilità alla rete è primaria, è probabile che gran parte degli utenti si serva dei sistemi TPL, viceversa, come mostra il grafico seguente, la potenzialità del sistema si riduce drasticamente quando più si dilata il tratto da percorrere, specie se a piedi, mentre meno rapido è il calo qualora ci si serva della bicicletta per recarsi alla prima stazione della rete.

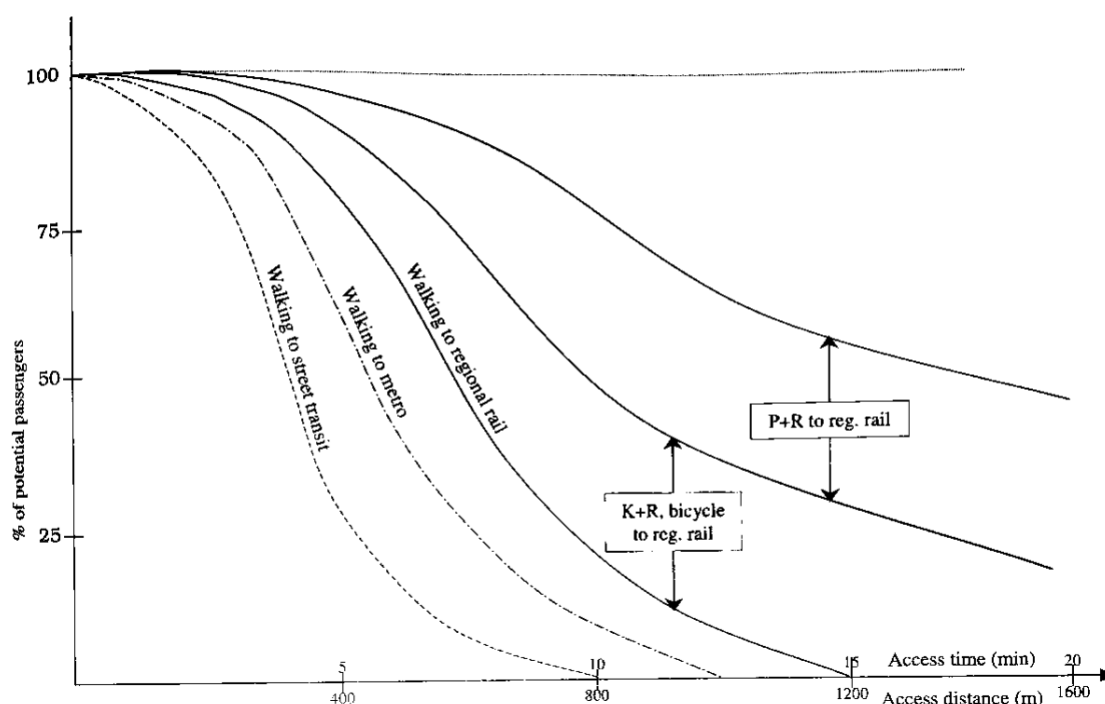


Fig. 1.4 Relazione fra distanza di accesso alla rete di trasporto e potere attrattivo

Fonte: Urban Transit Operations, Planning, and Economics (V. Vuchic)

K+R (Kiss and Ride) = stazioni in cui è consentita la sosta breve; P+R (Park and Ride) = stazioni di corrispondenza

Con riferimento sempre alla figura soprastante, si ponga particolare attenzione alle prime due curve, quelli più acclivi, che testimoniano la grande sensibilità mostrata dall'utenza nei confronti del tratto da percorrere a piedi per accedere a servizi TPL urbani, maggiore è invece la tolleranza qualora si debba accedere alla rete ferroviaria, come peraltro dimostra anche la mia personale esperienza pluriennale da pendolare ferroviario.

Non si deve semplificare il discorso pensando che il potere attrattivo dipenda solo dalla distanza di accesso, poiché influisce anche la linearità del percorso ed il livello di qualità del servizio TPL, che quindi può giustificare o meno lo sforzo fatto per accedervi.

Infine, per completezza espositiva si riassume e schematizza la logica sulla quale si basa il processo di pianificazione, che presuppone:

- la definizione degli obiettivi in ragione delle problematiche evidenziate;
- la schematizzazione del contesto attuale;
- la scelta del modello previsionale utilizzato;
- lo sviluppo del criterio di analisi delle alternative;
- l'elaborazione delle alternative;
- la verifica ed il perfezionamento degli scenari formulati;
- il confronto fra le soluzioni e conseguente scelta di quella definitiva;
- lo studio di possibili sviluppi e finalizzazioni;

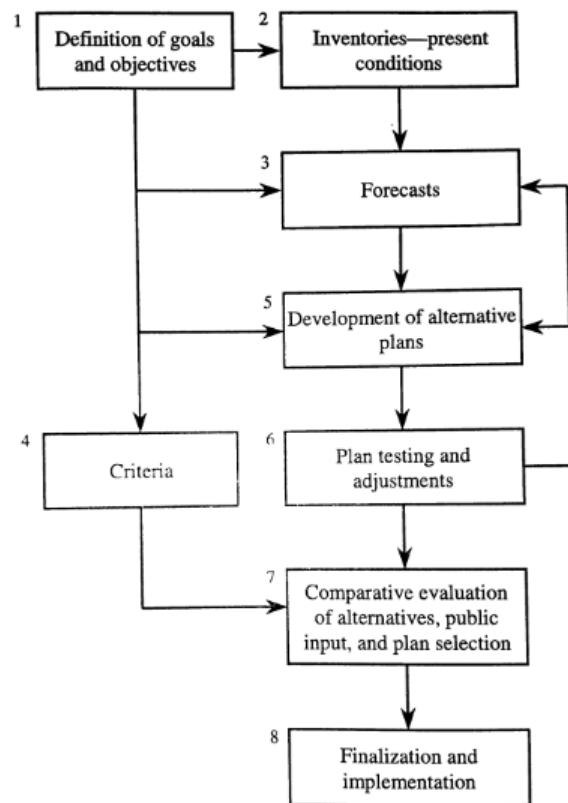


Fig. 1.5 Sequenza di fasi elementari della pianificazione dei trasporti urbani

Fonte: Urban Transit Operations, Planning, and Economics (V. Vuchic)

1.6 – Stima della domanda, split modale e assegnazione

I modelli previsionali impiegati per stimare la variazione delle relazioni O-D e dei percorsi intrapresi dall'utenza rappresentano certamente uno strumento utile per l'elaborazione e la verifica dei piani di sviluppo della rete; per di più sono impiegati per la valutazione delle strategie alternative e nell'implementazione del piano scelto.

Per comprendere la logica sulla quale è costruita la stima dei percorsi O-D, a prescindere dal modo di trasporto scelto, è necessario tenere a mente alcuni fattori chiave:

- la stima della domanda futura presenta un margine non trascurabile di incertezza, dipendente dall'affidabilità del modello utilizzato e dei dati in *input*;
- la procedura *standard* di pianificazione dipende dalle condizioni al contorno attuali e dalla loro correlazione;
- il volume di domanda non deriva solo dai (molteplici) fattori esterni, bensì anche dai sistemi di trasporto offerti e dal giudizio che gli utenti attribuiscono ad essi;

Per l'appunto, la stima della distribuzione degli utenti fra i differenti modi di trasporto, nota con il termine di *split* modale, rappresenta una delle informazioni più importanti nella pianificazione di un sistema di trasporto multi-modale: la quantificazione della ripartizione modale dipende strettamente da fattori intrinseci al contesto esaminato, dai differenti portatori di interesse coinvolti, dai rispettivi ruoli rivestiti e dai loro legami, senza trascurare la disponibilità dei dati di cui purtroppo spesso si è deficiente.

Con la stima dello *split* modale la previsione della quantità di viaggi che interessano la rete è nota, ma l'esatto percorso intrapreso deve essere ancora determinato, ben sapendo che solitamente è disponibile un gran numero di itinerari: lo scopo dell'assegnazione dei flussi di traffico è proprio quello di attribuire a tutti i viaggi uno specifico tragitto, da cui poter poi prevedere i volumi di traffico che interessano una specifica sezione della rete di trasporto.

I modelli di assegnazione sono calibrati sulla rete attuale, sebbene siano usati per stimare il volume di viaggi sulla rete futura, rappresentando un valido strumento per testare l'adeguatezza delle alternative di sviluppo della rete.

In tal senso, questi modelli consentono di verificare se i volumi previsti siano compatibili con la capacità offerta oppure possano sorgere fenomeni di saturazione della rete e, al contempo definiscono lo stato di equilibrio dei flussi a seconda delle condizioni in cui versa la rete di trasporto.

Senza addentrarmi troppo nella teoria dei modelli di assegnazione, che si ritiene nota in questa sede, preme sottolineare che, per eseguire l'assegnazione dei flussi di traffico, il pianificatore dovrà decidere quale criterio possa rappresentare al meglio il processo decisionale del viaggiatore in base alle informazioni in suo possesso.

1.7 – Criterio di progettazione preliminare

La forma prototipale del progetto può essere elaborata solamente quando sono state comprese le funzioni elementari di una rete di trasporto, ossia:

- fornire un servizio di accesso alle singole aree attraversate dalle infrastrutture e in quelle adiacenti (si parla di area di copertura e d'influenza);
- trasportare nelle predette aree quei passeggeri che originano e terminano lo spostamento fuori da esse.

Ciò impone inevitabilmente di localizzare nel territorio le fermate e le stazioni per garantire capillarità al servizio, senza però pregiudicare la funzionalità e regolarità dello stesso, che viene messa in crisi all'aumentare dei punti di incrocio e di arresto: la qualità del servizio erogato si basa infatti sull'equilibrio fra queste due esigenze che a priori sembrerebbero contrapposte.

La metodologia alla base del processo di progettazione preliminare può essere definita come una serie di fasi consequenziali, che pur variando da caso a caso, possono essere così riassunte in uno schema generico.

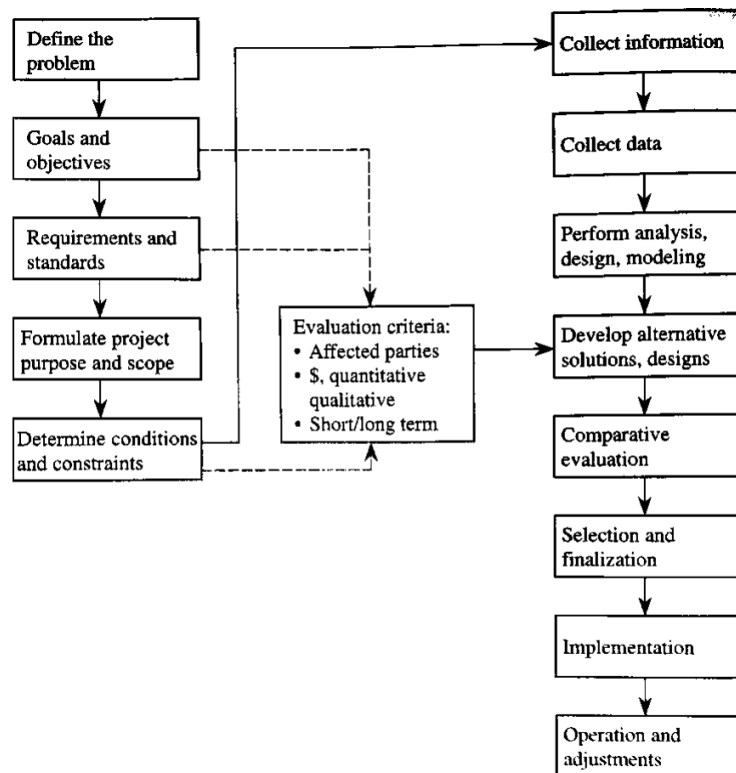


Fig. 1.6 Schema metodologico per la progettazione preliminare

Fonte: Urban Transit Operations, Planning, and Economics di Vukan Vuchic

Tale diagramma di flusso sarà utile per confrontare i differenti scenari esplorativi elaborati.

1.7.1 – Focus sul sistema tranviario

Tralasciando la procedura che sta alla base del disegno di una linea/rete di trasporto, ovvero la scelta modale del sistema più adatto al contesto ed alle esigenze, senza però dimenticare gli aspetti di sostenibilità economica, possiamo riassumere il metodo di progettazione preliminare di una rete/linea tranviaria, oggetto del presente Studio:

1. raccolti/elaborati i dati in *input* (riferiti al numero e alla tipologia di utenti, viabilità stradale attuale e futura e rete TPL attuale);
2. si stima il flusso di traffico per sezione;
3. tenendo conto del numero di linee che si attestano a ciascun capolinea e, quindi, della sua operatività, si determina la capacità di ciascuna linea, che dipende ricorsivamente dal tipo di mezzo scelto e dal programma di esercizio formulato;
4. si dimensiona la tipologia di veicolo più adeguata (spesso fra quelle già disponibili);
5. si definiscono i programmi di esercizio, i sistemi tecnologici in uso, gli investimenti da sostenere, le politiche tariffarie, ecc.;
6. si progetta l'infrastruttura in base al livello di protezione/separazione della sede, dei vincoli plano-altimetrici, il tipo di tracciato ed i punti di incrocio/nodi/fermate/stazioni.

Talvolta si deve ricorrere anche a soluzioni progettuali ritenute inconsuete e, tra queste, si annovera per esempio una breve tratta a binari interlacciati, oppure quando il passaggio in superficie si rivela irrealizzabile, un collegamento tranviario sotterraneo può essere la soluzione per servire il centro, specialmente se quest'ultimo è di dimensioni notevoli, garantendo una notevole accessibilità sebbene a costi di realizzazione nettamente più elevati.

Tali corridoi sotterranei nei quali istradare tratte di linee tranviarie (per assicurare loro velocità e regolarità e nello stesso tempo liberare spazio in superficie), abbandonando le tratte esterne, tenendo conto anche di possibili evoluzioni dell'infrastruttura in vere e proprie linee metropolitane, sono noti con il nome di *pre-metro*.

Si pone dunque la questione di quale sia la strategia operativa preferibile, ben sapendo che sono molti i fattori che subentrano nel processo decisionale, che usualmente viene supportato e certificato da un'analisi multicriteria delle alternative, nella quale pesano i punti di vista di tutti i portatori di interesse, spesso fra loro divergenti, nonché le peculiarità del sito esaminato.

1.8 – Diagramma di carico e flussogramma di una rete TPL

Il volume dei passeggeri in transito su una specifica linea o sull'intera rete di trasporto dipende dal numero complessivo di viaggiatori diretti in una città/territorio e dal livello di servizio offerto, nonché dal suo costo che dev'essere comparato con quello di modi di trasporto concorrenziali, tra cui spicca il mezzo privato ed altre forme di spostamento individuale.

Nelle aree urbane che presentano una rete di trasporto pubblico locale ben pianificata, l'utilizzo dei TPL predomina sulle restanti alternative modali, specialmente per gli itinerari che attraversano il centro cittadino oppure si sviluppano lungo i corridoi più trafficati.

In particolare, la distribuzione della durata del viaggio (espressa in termini di distanza percorsa e tempo di viaggio) è altamente sito specifica, sebbene si possa riconoscere che le città aventi un'area centrale densamente urbanizzata presentano su ciascun asse di penetrazione in centro una ripartizione asimmetrica dovuta all'enorme volume di viaggi brevi (di circa 1÷4km).

Inoltre, i flussi di traffico più ingenti insistono sulle direttrici radiali che collegano i poli commerciali/finanziari, ragion per cui il servizio offerto su tali connessioni deve rispettare livelli di qualità molto stringenti.

Uno strumento essenziale per valutare tale fenomeno oltre che di supporto per il processo di pianificazione e progettazione è rappresentato dal flussogramma, noto anche come albero dei

flussi, di cui si mostra un'esemplificazione nell'immagine seguente.

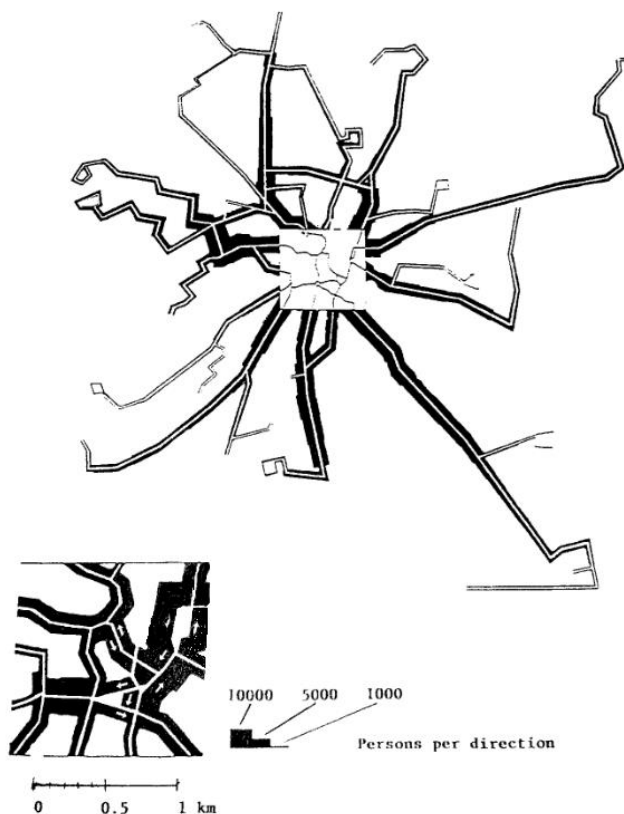


Fig. 1.7 Scenario tipico di un flussogramma in un'area urbana

Fonte: Urban Transit Operations, Planning, and Economics (V. Vuchic)

Un altro modo efficace di rappresentare il volume di passeggeri che sono diretti ai principali poli operativi d'interesse provenendo da un'area suburbana è il diagramma che descrive l'evoluzione del profilo di carico lungo la tratta periferia-distretto operativo, la quale viene mostrata nel dominio spazio-temporale sottoforma di linea dotata di una certa pendenza (si veda la figura successiva) con istogramma ad andamento triangolare.

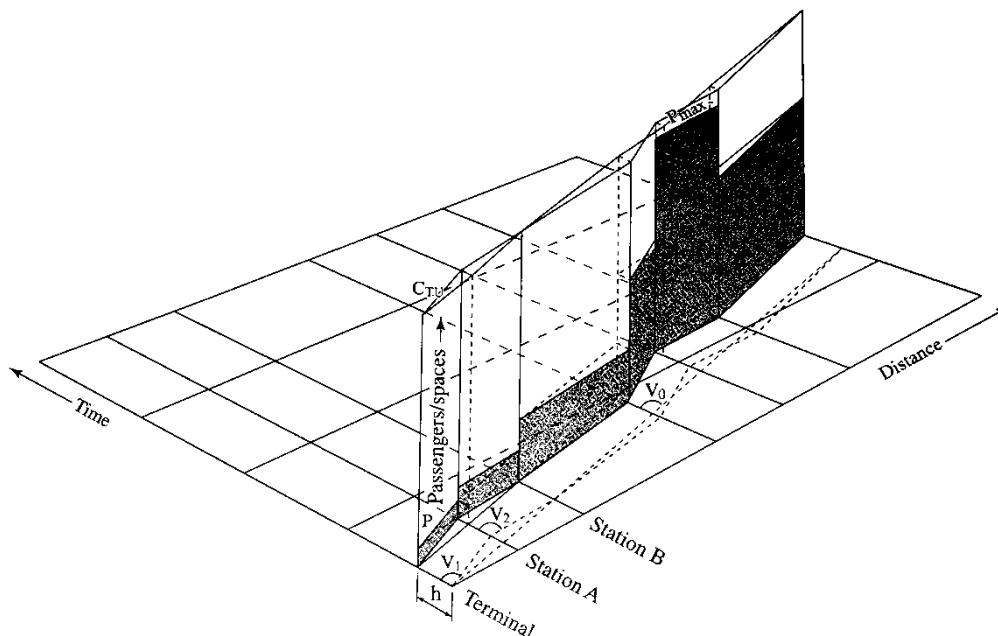


Fig. 1.8 Generico profilo di carico di utenti pendolari nel dominio spazio-temporale

Fonte: Urban Transit Operations, Planning, and Economics (V. Vuchic)

A rigori non si parla di linea inclinata, bensì, come osservabile, una spezzata inclinata, dato che si identificano differenti velocità (rif. V_1 , V_2 , ecc.) nei molteplici tratti percorsi.

Inoltre, dalla figura emerge che, dopo una crescita progressiva, la prima vera rottura di carico si verifica in corrispondenza della stazione adiacente al distretto lavorativo, raggiungendo ivi un valore di picco che rasenta la capacità limite dell'offerta di servizio.

Questo schema generale, come vedremo nel dettaglio, è riscontrabile nella gran parte delle reti urbane di oggi e, a tutti gli effetti, traccia la linea guida rispetto alla quale effettuare il dimensionamento del servizio di trasporto.

2 – Confronto con altre realtà nazionali ed estere

Nel nostro Paese allo sviluppo del trasporto su rotaia si lega un'opportunità concreta di passaggio verso modelli di mobilità più sostenibili nelle città, a partire dalla transizione verso modalità di trazione sfruttando energie rinnovabili ed in particolare il passaggio all'elettrificazione dei sistemi di trasporto.

Questo processo di trasformazione ed ammodernamento deve però fare i conti con la questione della sostenibilità economica degli investimenti spronando, ove possibile, il ripristino e/o la riconversione di infrastrutture già disponibili (come per il sottoattraversamento tranviario di



Bratislava che in origine era dedicato al traffico motorizzato – si veda Fig. 2.1).

Fig. 2.1 Galleria tranviaria nel centro storico di Bratislava

Le scelte progettuali che guidano questa fase di rinnovamento infrastrutturale e adeguamento trasportistico poggiano, pur nella sito-specificità dei contesti esaminati, su interventi già effettuati in circostanze simili (italiane e non), dai quali è doveroso trarre insegnamento.

Peraltro, il progressivo smantellamento dei percorsi tranviari avvenuto in Europa dagli anni cinquanta del secolo scorso non si è verificato ovunque e con la stessa portata, infatti mentre può dirsi pressoché completato in Inghilterra, Spagna e Francia, e in Italia nelle città minori, così non è stato in Olanda, Belgio, Germania e altre nazioni dell'Europa centrale.

A tal proposito, in quest'ultime nazioni le linee tranviarie sono state per lo più mantenute in efficienza, ma il conflitto dei tram con le auto nelle zone centrali della città ha fatto sviluppare negli anni settanta il concetto della *Stadtbahn* (c.d. metrotranvie) e del *pre-metro* (anticipato nel capitolo precedente), con il sottoattraversamento del centro, pur non prevedendone la trasformazione integrale in metropolitane.

In merito, si segnala che nei paesi di lingua tedesca a partire dagli anni '60 solo a Monaco, Norimberga e Vienna è stato sviluppato un sistema di metropolitana pesante con caratteristiche tecnico/dimensionali derivanti da quello milanese e, nello specifico, da M2, mentre nelle altre realtà tedesche lo *standard* dimensionale pesante è stato adottato per le stazioni e le tratte centrali dei futuri sistemi di *Stadtbahn*.

Se da un lato la soluzione del sottoattraversamento mutuata dalle recenti realizzazioni tedesche e belghe si proponeva come meno invasiva, anche per quanto riguarda i cantieri, e offriva migliori velocità commerciali, ma a costi sempre maggiori, e comunque con una percezione di scarsa accessibilità e forse di maggiore “distanza” anche dai luoghi serviti, l’opzione dell’attraversamento in superficie, correlato alla pedonalizzazione e riqualificazione di zone urbane, si è spesso dimostrata un’alternativa efficace, economica e ben inserita nel tessuto urbano, ma rivalutata solo successivamente e, indicativamente, a partire dagli anni ‘90.

Preme però rimarcare che la situazione nelle nostre città è tuttavia densa di punti critici che spesso limitano certi impulsi: instabilità politica, quadro incerto delle risorse disponibili e conseguente mancanza di coperture finanziarie, basso contributo dei soggetti privati, tempi molto lunghi per i completamenti e si riscontrano divari sempre più ampi con la gran parte dei sistemi urbani europei.

Infatti, è proprio la mancanza di certezza e continuità nelle strategie, nelle regole e nei finanziamenti a contraddistinguere in negativo l’esperienza del nostro Paese, dai livelli centrali a quelli locali, in un settore cruciale per la sostenibilità urbana, come insegna l’esempio delle città europee. A tal proposito si segnala che, in Germania, solo grazie alla stabilità delle scelte politiche si è potuto portare a compimento oggi le reti di *Stadtbahn* concepite e sviluppate per fasi già a partire dagli anni '60, nonostante le aspre critiche che sono succedute negli anni.

Nonostante ciò, i sistemi a guida vincolata, tra cui i tram, stanno progressivamente accrescendo il proprio peso nelle città italiane, almeno all’interno del sistema complessivo del trasporto collettivo.

Volendo individuare le similitudini e le diversità fra i più disparati sistemi di trasporto tranviari italiani ed europei, di seguito propongo un confronto tra le dotazioni e le prestazioni delle tranvie operative, con soluzioni sia in superficie sia sotterranee, nei differenti contesti urbani nazionali e le indicazioni di benchmarking sui servizi operativi nelle singole città.

Va però sottolineato che il confronto tra i numeri delle aree urbane italiane e le statistiche sugli agglomerati metropolitani europei, non solo serve a specificare ulteriormente le distanze tra la media nazionale (pur considerando le realtà virtuose tra cui Milano) e il contesto continentale, ma aiuta a comprendere meglio le diverse condizioni di accessibilità e vivibilità locali, oltre che i modelli di comportamento sui quali provare ad agire per un cambio di prospettiva (disparità di offerta e altri fattori determinanti sul riparto modale dei passeggeri).

2.1 – Sistemi tranviari e servizio offerto

Con particolare riferimento alle altre realtà europee e nordamericane, si segnala la capacità di questi contesti di essere riusciti a progettare per tempo la riorganizzazione della rete locale e a sviluppare le infrastrutture oggi esempio di eccellenza nel settore, forse, grazie anche una politica di gestione del territorio e degli insediamenti degna di nota, favorevole all'uso dei sistemi su ferro nel medio e corto raggio e anticipando le infrastrutture di trasporto alle realizzazioni degli interventi urbanistici.

Il comparto italiano, a dire il vero, è il quinto sistema in Europa per numero di passeggeri movimentati, però il problema è il basso indice di viaggi pro-capite, che vede l'Italia molto indietro nel confronto continentale: il valore è ad esempio doppio in Austria, Germania e Francia (e maggiore di oltre 4 volte in Svizzera) dove reti più estese e di un più alto livello dei servizi allestiti per i cittadini (mezzi più moderni e capienti, *comfort* delle fermate, maggiore integrazione operativa e di orari con gli altri sistemi, ecc.) fanno in gran parte la differenza.

Sembra provato che all'estero un buon sistema di TPL renda i cittadini più mobili e contemporaneamente meno dipendenti dall'auto; e il ferro è la risorsa in grado di fare la differenza, divenendo nel suo insieme (tranvie, metropolitane e ferrovie locali) la “colonna portante” di scelte di trasporto tendenzialmente più sostenibili e vantaggiose per la collettività.

Questo si nota bene ad esempio a Bruxelles e Parigi (e in molti medi agglomerati francesi), dove la quota del ferro tocca ormai il 65-70% del totale dei viaggi effettuati su modalità pubblica. In alcune realtà come Vienna tale rapporto supera addirittura l'80%, ma la stessa percentuale è molto alta e vicina al 60% anche a Barcellona e Berlino.

Non c'è dubbio, tuttavia, che gran parte delle differenze si devono alla disponibilità di infrastrutture e servizi di trasporto con cui si riescono a spostare le persone dentro le città e, specialmente, nei tragitti da e verso le grandi periferie dei centri abitati.

Inoltre, per sviluppare il network, all'estero si sperimentano molti sistemi di trasporto intermedi come tram-treno (tecnologia tipica tedesca, ma che inizia a fare capolino anche in Francia, Olanda, Spagna e Regno Unito), tranvie moderne o metro-tranvie (a Barcellona, Parigi, Marsiglia, ecc.) mentre il tram su gomma è stato applicato in un numero molto limitato di casi, tra cui alcuni già riconvertiti a tram classico o BRT e altri comunque realizzati con sede predisposta per la conversione con un sistema tradizionale, solo in Francia (tralasciando i casi italiani di Padova e Venezia).

Sistema intermedio per eccellenza è comunque la *Stadtbahn* tedesca che integra in un solo “contenitore” tutto quanto è compreso tra il tram classico e la metropolitana, sia dal punto di vista tecnico sia per capacità di trasporto, e le cui caratteristiche e gli *standard* di riferimento evolvono puntualmente in considerazione delle specifiche proprietà del tracciato.

2.2 –Attraversamenti tranviari urbani nel contesto europeo

Come anticipato, il reinserimento di binari tranviari nelle zone centrali delle città, e in particolare in quelle storiche per lo più caratterizzate da viabilità non ampie e da contesti urbani pregiati, con l'eccellenza dell'esempio francese che ha introdotto/re-introdotto il tram in ben 29 contesti urbani, ha spronato la concretizzazione di interventi di riqualificazione dei centri storici, servendosi anche di nuove strategie operative e sistemi innovativi meno impattanti (ad esempio mediante il sistema francese di alimentazione dal suolo – APS).

Si tratta di interventi volti ad incentivare il ripristino ed il riuso di infrastrutture preesistenti, senza ledere i vincoli di sostenibilità economica e sociale; peraltro, con questa prospettiva sono stati effettuati numerosi interventi di adeguamento dell'offerta di trasporto.

In particolare, l'affacciarsi delle prime realizzazioni di attraversamento in superficie di zone pedonalizzate e riqualificate con specifici interventi urbanistici, ha mostrato come fosse possibile un'efficace soluzione a costi contenuti e ben integrata con il contesto.

A tal proposito, in questo paragrafo descriverò sommariamente alcuni casi di linee tranviarie che servono i centri storici di città europee, con soluzioni sia in superficie sia sotterranee, per poi esaminare più approfonditamente la rete tranviaria di Firenze, dato che si tratta di un caso-studio emblematico dello scenario italiano, e le strategie operative adottate nel corso degli anni.

2.2.1 Bruxelles (Belgio)

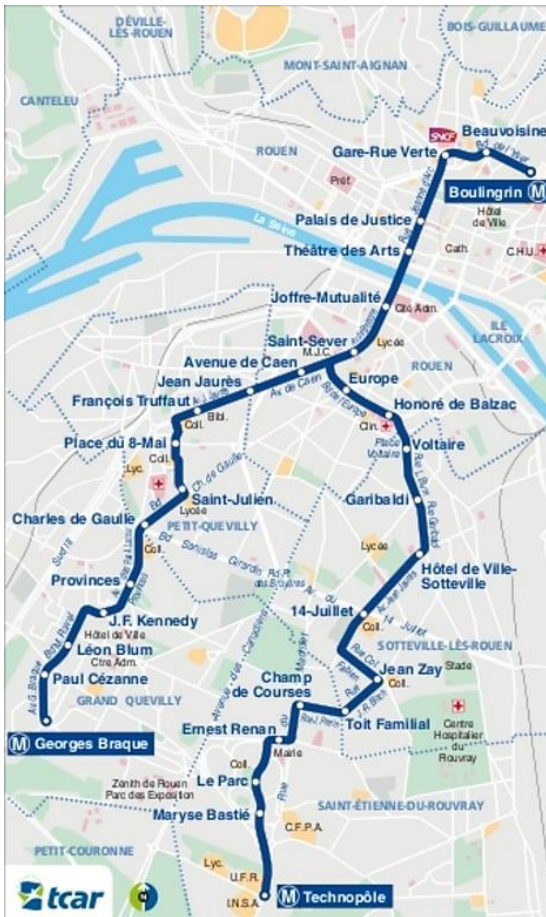
La rete tranviaria di Bruxelles (1.200.000 abitanti, tra City e altre municipalità), tra le 10 più grandi del mondo, trasporta annualmente oltre 120 milioni di passeggeri; vi è stato sviluppato il concetto di pre-metro, realizzando corridoi sotterranei nei quali istradare tratte di linee tranviarie (favorendo una maggiore regolarità e velocità commerciale e riducendo al contempo l'occupazione di spazio dedicato alla viabilità stradale), prevedendone la possibile successiva trasformazione in vere e proprie metropolitane.

Questo a riconferma che tali infrastrutture sono anche molto utili qualora si preveda un potenziamento dell'offerta di servizio, assumendo così a tutti gli effetti carattere di linea di forza urbana, giustificando ancor più gli investimenti attuati.

Infatti, dei quattro tunnel realizzati due sono stati trasformati nel corso degli anni '70 e '80 in vere e proprie linee metropolitane per poi rendersi conto che queste, a differenza di un sistema integrato, impongono spezzettamenti di rete, interscambi e forniscono il massimo livello di trasporto possibile solo nella tratta del sistema metrò a discapito della altre radiali, mentre i restanti due corridoi sotterranei sono rimasti percorsi tranviari (in sede sostanzialmente propria, con buone prestazioni di velocità e regolarità) permettendo di innestare in essi uno schema ad albero estendo i benefici a tutte le linee interessate.

2.2.2 Rouen (Francia)

La rete di Rouen (120.000 abitanti nel territorio comunale, circa 500.000 nell'area metropolitana) è una delle prime realizzate in Francia (1994); condivide con Grenoble l'utilizzo degli stessi veicoli, ma attua una scelta infrastrutturale e trasportistica completamente diversa, adottando il principio del pre-metro: la rete, integralmente in sede propria, è formata da una Y (si veda Fig. 2.2), il cui ramo comune attraversa in sotterranea il centro.



Questo esempio è particolarmente rilevante dato che l'ipotesi di realizzazione del sottoattraversamento tranviario a Milano, contenuta nel PUM comunale del 2001 ed ormai abbandonata per gli ingenti oneri finanziari associati, ha tratto spunto da esso per la formulazione delle varie alternative progettuali.



Fig. 2.2 Rete tranviaria di Rouen e fermata sotterranea (fonte: urbanrail.net)

Nella fattispecie, il sottoattraversamento, scelta poco diffusa per via dei cospicui costi di realizzazione, è stato deciso sulla base della difficile attraversabilità del centro in superficie, di timori sull'impatto che avrebbe avuto sul traffico automobilistico e della natura collinare del tratto a nord della Senna. La rete è lunga complessivamente 15,1 km, di cui 1,7 sottoterra con 4 fermate.

2.2.3 Grenoble (Francia)

Dopo la città di Nantes, Grenoble (160.000 abitanti nel territorio comunale, quattro volte di più in tutta l'area metropolitana) fu la prima città francese ad inserire il transito dei tram nel centro storico, nel 1987, con caratteristiche oggi tipiche di questi inserimenti: pedonalizzazione, curve strette da percorrere a bassa velocità, fermate vicine per servire meglio i punti di interesse, e attenzione al design del veicolo. Da allora la rete di Grenoble è cresciuta fino a 5 linee, di cui 2 transanti per il centro storico (evidenziato in Fig. 2.3) servendo 210.000 passeggeri al giorno.

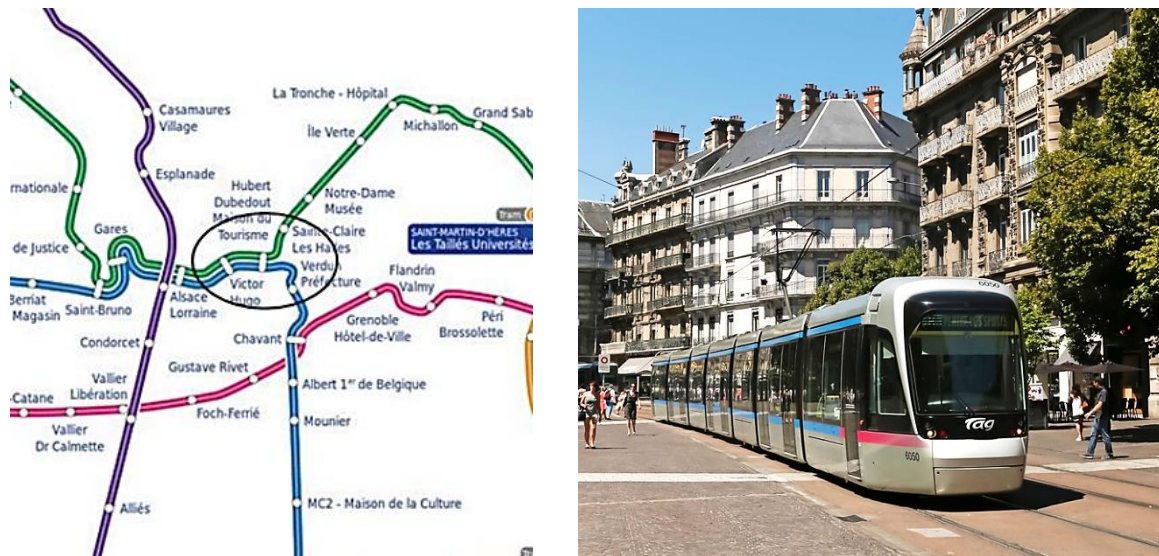


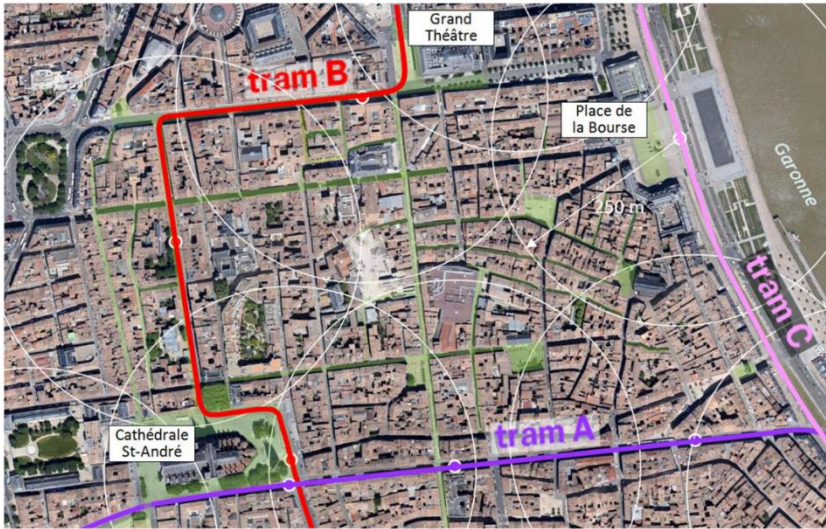
Fig. 2.3 Rete tranviaria di Grenoble e tram in area pedonale presso Rue Felix Poulat (fonte: urbanrail.net)

2.2.4 Bordeaux (Francia)

Bordeaux (240.000 abitanti nel territorio comunale, ma una comunità urbana di oltre 700.000) ha deciso per il tram, dopo aver puntato per un lungo periodo a una metropolitana leggera automatica, ed è stata la prima città ad adottare un'estesissima applicazione dell'alimentazione senza linea aerea di contatto, affrancandosi così dai limiti imposti dai canoni estetici urbanistici.

Ciò a riconferma del grande sforzo tecnologico francese attuato nell'ultimo ventennio, che ha fatto da apripista a molte altre applicazioni in aree urbane pregiate, specialmente nel contesto europeo, ove fino ad allora non sembrava pensabile il reinserimento delle rotaie.

La rete consta di tre linee (per una lunghezza complessiva di 55 km), inaugurate tra la fine del 2003 e l'inizio del 2004, poi oggetto di vari prolungamenti e di una diramazione; sono linee indipendenti, aventi fermate di corrispondenza e sviluppo che avvolge il centro storico, ampiamente pedonalizzato, in modo da servire qualsiasi suo punto entro 300 metri (si veda Fig. 2.4 – fonte: 6° convegno nazionale sistema tram); inoltre, alcune strade sono riservate al tram.



Le tratte senza linea aerea sono equipaggiate col sistema di alimentazione dal suolo APS di Alstom e sviluppano in totale 17 km.

Fig. 2.4 Tracciati delle linee tranviarie nel centro della città di Bordeaux e raggi di influenza di 250 m



Dunque, nonostante l'estesa presenza delle linee tranviarie in centro storico, l'assenza della presa di contatto aerea permette di integrare veicoli moderni, silenziosi e a basso impatto ambientale, in una realtà storica pregiata, come quella di Bordeaux.

Fig. 2.5 Tram presso la Cattedrale di Bourdeaux (fonte: urbanrail.net)

Similmente a Bordeaux, Reims e Orléans hanno adottato la tecnologia APS per evitare l'alimentazione aerea nell'attraversamento tranviario del centro storico, garantendo così un'elevata accessibilità ai principali luoghi di interesse.



Fig. 2.6 Tram presso la Cattedrale di Orléans

2.2.5 Nizza (Francia)

La discussione degli esempi francesi si conclude con il caso di Nizza, a testimonianza di come invece, spesso, sia contrastata e mal percepita la realizzazione di una infrastruttura di trasporto pubblico pervasiva in un centro storico o comunque in una zona particolarmente pregiata; ciò nonostante, motivazioni ed interessi contrapposti hanno portato ad una miscelanea di sistemi di trasporto urbani.

In tal senso, a Nizza (350.000 abitanti nel territorio comunale, 530.000 nell'area metropolitana) è stata inaugurata nel 2007 una tranvia moderna (linea 1) che, con un percorso ad U di 9,1 km (Fig. 2.7), serve il nucleo della città vecchia transitando sulle due piazze principali (Place Massena e Place Garibaldi), ove fu deciso di non installare la linea aerea, e i tram proseguono la loro corsa alimentati da batterie.

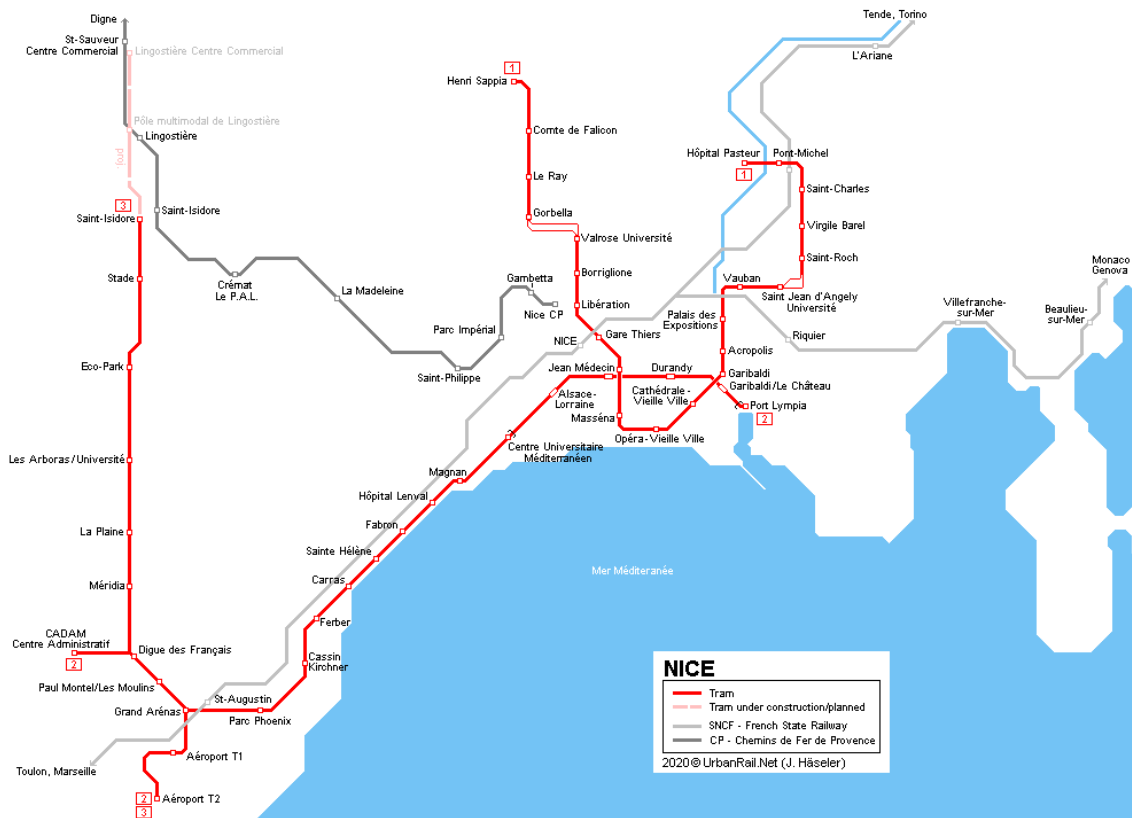


Fig. 2.7 Rete tranviaria di Nizza (fonte: urbanrail.net)

Nella fattispecie, Place Massena è stata completamente rinnovata e liberata dalle auto, mentre in Avenue Médecin, principale arteria commerciale, perennemente congestionata di traffico automobilistico prima dell'arrivo del tram, si è applicato il principio del rinnovamento “façade-tofaçade”, in cui non ci si limita a collocare i binari al centro strada, ma si riprogetta l'intera sezione stradale a pieno vantaggio, oltre che del tram, della mobilità dolce, con più spazio per i pedoni (Fig. 2.8).



Fig. 2.8 Tram presso Place Messena (a sinistra) senza alimentazione aerea e in transito su Avenue Médecin (a destra)

La presente applicazione dimostra quindi l'efficacia di tali interventi di riqualificazione ed adeguamento infrastrutturale in termini di viabilità e circolazione stradale, apportando così un ulteriore beneficio sociale che si somma alla valorizzazione ed all'efficientamento del servizio offerto dai TPL.

Non ha avuto la stessa sorte la direttrice Ovest-Est, che invece di passare per la trafficata e scenografica Promenade, si è sviluppata parzialmente in sotterraneo (3,2 km su 11,3), a seguito delle fragorose proteste delle attività e delle proprietà che si affacciano sul lungomare.

Resta il limite legato al fatto che passando sotto la città vecchia non presenta nessuna condivisione di binari con la linea 1 e la corrispondenza con la stessa avviene solo puntualmente e su livelli diversi; inoltre, il costo risente inevitabilmente di tale scelta progettuale, con un importo al km piuttosto alto se confrontato con quello affrontato per la realizzazione della prima linea.

2.2.6 Hannover (Germania)

La parentesi aperta sui più significativi sistemi tranviari europei si chiude con il caso di Hannover (520.000 abitanti), ove la rete tranviaria, dal 1975, presenta tre corridoi sotterranei impiegati per servire il centro con uno sviluppo complessivo di 19 km e, pertanto, è classificata come *Stadtbahn* (l'equivalente della metrotranvia nostrana).

La peculiarità di questa rete non è solo correlata alle scelte infrastrutturali, come la presenza di incroci proprio sotto il centro, in una stazione di interscambio (Kröpcke) tra i tre corridoi ed altri due punti di interscambio, tra coppie di corridoi (Hauptbahnhof e Aegidientorplatz), ma anche al fatto che ciascun corridoio è utilizzato da più linee, le quali uscendo in superficie ad ambedue i lati si sfoccano su diversi percorsi, prevalentemente protetti.

Si comprende subito la grande potenzialità di una rete siffatta, dato che la suddetta disponibilità infrastrutturale, unita ad un'attenta programmazione del servizio, garantiscono un elevato livello frequenza nei corridoi, simile a quello di una metropolitana, dal momento che vi confluiscono più linee.

Le caratteristiche dei corridoi sotterranei sono in effetti molto simili a quelle di una metropolitana, con banchine alte che permettono di accedere senza scalini ai veicoli. Al contempo, i veicoli, lunghi 25/50 fino a 100 metri a seconda delle versioni e degli accoppiamenti, sono peraltro equipaggiati di scalini retrattili per servire alcune fermate periferiche che non hanno le banchine alte; possono viaggiare in multiplo.

Era stato progettato un quarto corridoio, la cui costruzione è risultata poi eccessivamente costosa ed è stata abbandonata; rimane quindi un tratto in superficie che percorre alcune strade del centro ed è utilizzato da altre due linee.

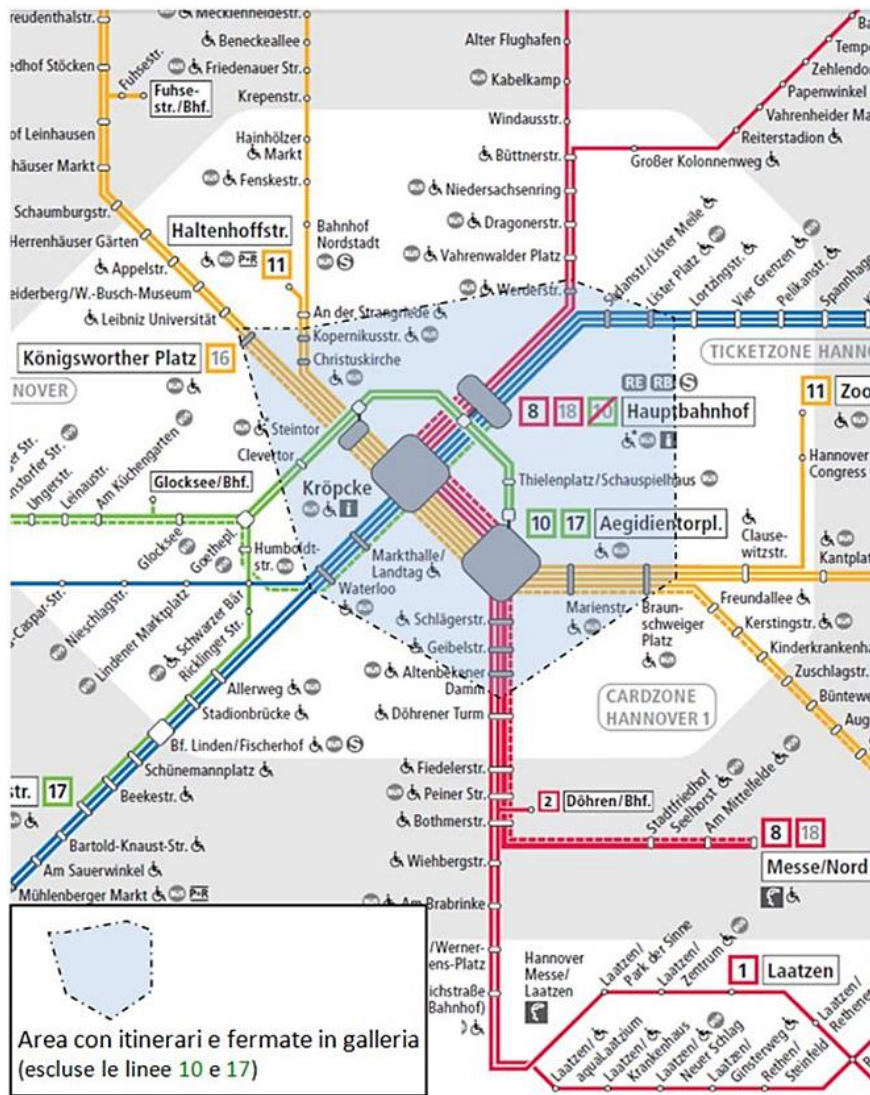


Fig. 2.9 Parte centrale della rete di Stadtbahn di Hannover (fonte: 6° convegno nazionale sistema tram)

2.2.7 – Confronti fra i casi-studio analizzati

Dopo aver presentato alcuni esempi significativi di rete tranviaria del panorama europeo, dai quali, come vedremo, la rete di Milano e gli interventi formulati hanno tratto spunto, mi sono sforzato di metterli a confronto, proponendo una tabella riassuntiva contenente tutti i parametri trasportistici ritenuti più rilevanti per la presente trattazione.

Si precisa che tali parametri sono stati definiti in modo da considerare l'efficacia delle realizzazioni in un'ottica di rete e non riferendoli solamente ad una specifica linea.

Proprietà	Città		BRUXELLES		ROUEN	GRENOBLE	BORDEAUX	NIZZA		HANNOVER	
	Tranvia	Metropolitana	Diametrale	Radiale	Diametrale	Diametrale	Diametrale	a "V"	Diametrale	Radiale	Diametrale
Sistema di trasporto	Tranvia	Metropolitana			Tranvia	Tranvia	Tranvia		Tranvia		Stadtbahn
Sottoattraversamento	✓	✓			✗	✗	✗		✓		✓
Configurazione di rete	Diametrale	Radiale	Diametrale		Diametrale	Diametrale	Diametrale	a "V"	Diametrale	Radiale	Diametrale
Attraversamento del centro	✓	✗	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Il sistema impone l'interscambio?	✗	✓	✗		✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗
Efficacia ed accessibilità degli interscambi	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●
Efficacia del disegno di rete sul corridoio infrastrutturato	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●
Efficacia del disegno di rete su rami (dell'albero)	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●
Tecnologia di alimentazione	Rete aerea	Terza rotaia	Terza rotaia		Rete aerea	Rete aerea	Rete aerea + APS	Rete aerea + batteria	Rete aerea + batteria	Rete aerea	Rete aerea

Tab. 2.1 Confronti fra sistemi di trasporto di differenti città europee

● Ottima ● Discreta/Mediocre ● Pessima/Assente

In tutti i casi tabellati si può notare una combinazione di proprietà sempre diversa e peculiare alla realtà indagata, sebbene possano riconoscersi elementi in comune, soprattutto se si pensa che le realizzazioni sono avvenute in modo consequenziale; infatti, in ogni contesto, si è cercato di prendere quanto di buono è già stato fatto in altri esempi applicativi ed è proprio da tutti questi casi-studio che è stato sviluppato lo scenario di rete riferito a Milano.

In ultimo, com'è facile osservare, solo Bordeaux e Grenoble presentano un "bollino rosso", poiché, nella fattispecie, nessun corridoio della rete è infrastrutturato, ossia si tratta di un sistema tranviario tradizionale superficiale, pertanto è del tutto assente l'efficacia correlata ad esso.

2.2.8 – Il caso di Firenze

Preme infine analizzare il caso-studio di Firenze, ove negli anni si sono succedute differenti strategie progettuali volte alla realizzazione di un servizio di trasporto su ferro atto a soddisfare le esigenze di mobilità degli utenti del centro storico, altrimenti costretti ad effettuare lunghe tratte a piedi oppure con mezzi motorizzati. Ciò è paradossale se si pensa che il trasporto pubblico di Firenze si è basato dall'inizio dello scorso secolo su un'estesa rete tranviaria, il cui declino, iniziato a cavallo della seconda guerra mondiale, si è concluso con la chiusura dell'ultima linea nel 1958, lasciando spazio ai filobus (per breve tempo) e poi agli autobus.

La ritrovata consapevolezza della necessità di un efficace trasporto rapido di massa ha però portato presto a pensare a una rete primaria a guida vincolata e al succedersi negli anni di diverse ipotesi di configurazione di rete, comunque concettualmente diverse dalla pervasiva rete tranviaria dismessa. In tutte le fasi di evoluzione della supposta configurazione della rete si è ritenuto che essa dovesse essere integrata da servizi rapidi e sufficientemente frequenti sulle tratte ferroviarie comprese nell'area metropolitana.

Sia pur nella sito-specificità fiorentina, è stato affrontato un problema trasportistico di dimensionamento dell'attraversamento tranviario del centro storico, rispondendo con diversi scenari evolutivi di rete, ciascuno con costi, rischi, criteri ed impatti differenti, da cui ho tratto spunto per gli interventi di adeguamento elaborati poi sulla rete tranviaria di Milano.

Progetto originario con attraversamento in superficie:

L'itinerario originale della linea aveva l'obiettivo di servire quasi diametralmente il centro collegando Piazza della Stazione con Piazza Beccaria, percorrendolo con tratti a doppio e semplice binario alternati; con questa opzione il centro sarebbe stato servito in modo quasi completo, in quanto un'ampia fascia del territorio si sarebbe trovata indicativamente entro i 400m delle fermate della linea tranviaria.

Si tratta di uno scenario progettuale molto promettente dato l'attraversamento pressoché integrale dell'area centrale, ma che poi fu abbandonato data la sua impraticabilità: il transito del tram è infatti inattuabile in alcune strade strette poste fra Duomo e Lungarno, in particolare a causa delle curve tortuose e le caratteristiche di ingombro dei tram moderni, specie in termini di lunghezza, pur necessaria a fini di capacità e di economia di esercizio.

Varianti con attraversamento in superficie:

A seguito dell'impraticabilità del progetto originario è stata sviluppata una variante progettuale superficiale con binari deviati poco prima del Duomo e percorso sfiocato da Piazza San Marco verso Piazza Libertà. Il progetto prevede l'ampliamento dei marciapiedi ove possibile, riservando gli spazi alla circolazione pedonale e tranviaria e individuando percorsi alternativi per la circolazione veicolare ammessa in zona.

Per il passaggio nei pressi del Duomo (che verrebbe solamente lambito dal tracciato) furono concepiti alcuni provvedimenti di mitigazione di impatto ambientale, quale l'adozione di binario unico, in modo da ridurre lo spazio occupato dalla sede tranviaria ed allontanarla dal Battistero; inoltre, era prevista l'assenza di presa di contatto aerea, con alimentazione da terra mediante tecnologia francese APS (Alimentation Par le Sol), con l'obiettivo di eliminare l'intrusione visuale.

Rispetto alla strategia progettuale iniziale tale percorso a cielo aperto risulta essere più corto, garantendo comunque una buona copertura del territorio centrale e, secondo analisi trasportistiche, sarebbe stato in grado di servire una domanda maggiore di quella soddisfatta con il tracciato originario, per effetto della disomogenea densità di O/D.

Nonostante le piene approvazioni, tale approccio fu scartato a seguito al controverso provvedimento di totale pedonalizzazione di un'ampia area attorno al Duomo, adottato dall'amministrazione locale nel 2009, penalizzando l'accessibilità di un'importante area; nonostante il transito di linee tranviarie in zone pedonalizzate si è invece dimostrato compatibile e sicuro in molte realtà urbane (si vedano gli esempi precedenti).

Ulteriori varianti superficiali:

Abbandonate le ipotesi precedenti, sono state formulate alcune strategie di attraversamento superficiale e parziale del centro, che quindi verrà coperto in misura minore dal servizio di trasporto mediante un tracciato non lineare e meno attrattivo; infatti, il tram subirebbe la concorrenza della modalità pedonale.

Basti pensare che già per la relazione Piazza della Stazione – Piazza Duomo risulta molto più rapido il percorso diretto a piedi (8 minuti) rispetto a quello tranviario fino a Piazza San Marco seguito dal percorso a piedi fino a Piazza Duomo (indicativamente 17 minuti in auto); infatti, in tal caso per arrivare a Piazza della Signoria da Piazza San Marco si dovrebbe percorrere circa 1 km a piedi. Questa opzione mal si concilia con il ragionevole obiettivo di dare in futuro alla linea una configurazione diametrale o para-diametrale, dirigendola verso i quartieri a Est.

In merito a ciò, uno studio trasportistico ha assegnato alla presente variante un carico simile a quello del primo tracciato scartato, ma il risultato è ingannevole perché assume carichi esterni al centro, che nel quadro generale sono propri di un'altra linea e sostituiscono in modo fittizio quelli perduti in centro.

In ultima istanza, è stata proposta una modifica alla variante aggiuntiva contemplante un tratto di binari interlacciati, percorso a senso unico alternato, e brevi tratti in doppio binario, con parte dello sviluppo non in comune con altre linee; nonostante ciò tale alternativa è compatibile con la prosecuzione oltre Piazza della Libertà.

La copertura dell'area centrale è praticamente quella del caso precedente, pur garantendo vantaggi temporali per raggiungere Piazza San Marco grazie alla collocazione di una fermata in Piazza Indipendenza e la possibilità di prolungamento citata.

Vi è poi l'opportunità di realizzare una breve diramazione mirata a coprire parte del centro storico, per erogare delle corse di rinforzo, giustificate in caso di sufficiente carico. A tal proposito, rimangono però delle perplessità sia per quanto concerne la collocazione di un attestamento in un'area potenzialmente inadatta sia per la configurazione radiale del tracciato.

Progetto di sottoattraversamento:

Giunta a questo punto, l'Amministrazione comunale ha preso in considerazione l'opzione di realizzare l'attraversamento tranviario del centro in galleria, introducendo così una nuova configurazione della rete. Si tratterebbe di un percorso sotterraneo lungo circa 4,3 km, con sei fermate in galleria situate a grande profondità (anche oltre i 25 m), date le caratteristiche geologiche non adeguate e la diffusa presenza di edifici storici.

Questo tracciato servirebbe direttamente la zona gravitante sulla Stazione ferroviaria di Santa Maria Novella e un'ampia fascia del Lungarno, lasciando fuori dal raggio dei 400m un'area poco più ampia di quella sottesa dal progetto originario superficiale. Inoltre, il Piano prevede anche la possibilità di dimensionare una diramazione della tratta sotterranea (in tratteggio celeste in Fig. 2.10), volta ad integrare, ma non completare, la copertura dell'area centrale.

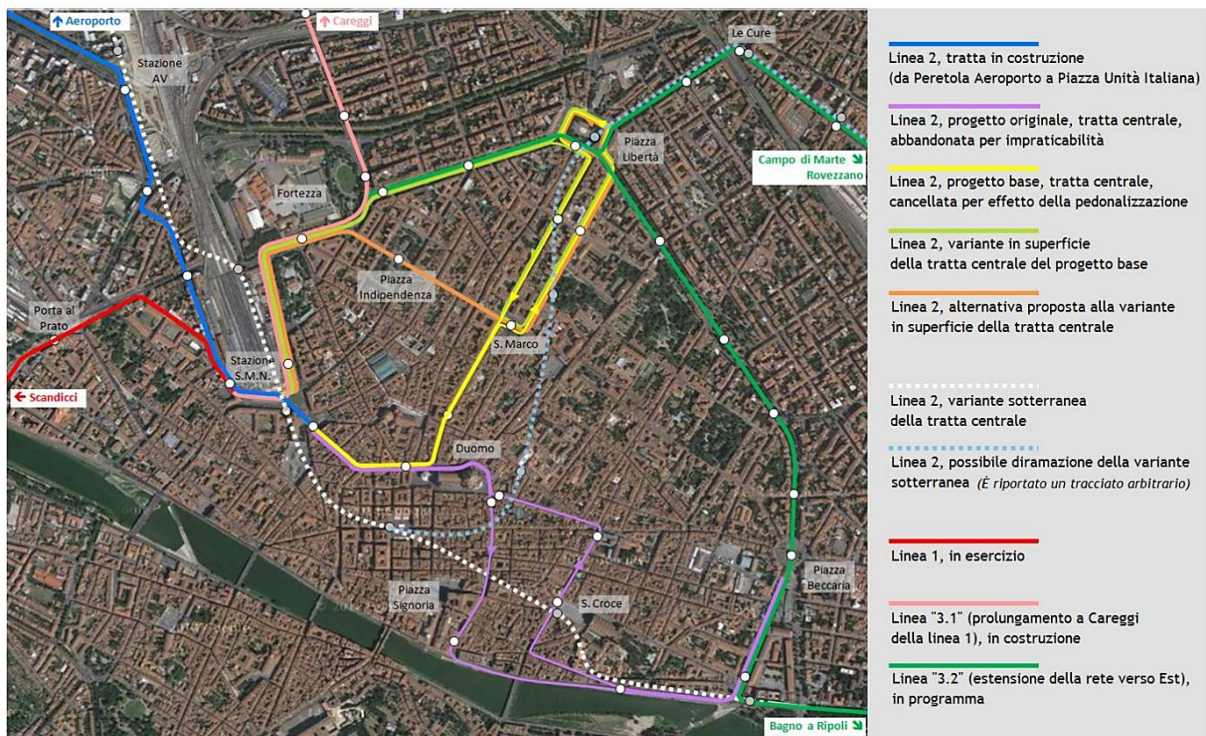


Fig. 2.10 Firenze, i diversi tracciati progettati e ipotizzati per servire il centro con le linee tramviarie

Fonte: elaborazione MIMS – 6° convegno nazionale sistema tram

Fra gli aspetti favorevoli del sottoattraversamento si annovera l'estesa copertura del centro e conseguente minor tempo di percorrenza delle tratte centrali; al contempo però il costo risulta evidentemente più alto se confrontato con le realizzazioni in superficie, come anche maggiori sono i rischi costruttivi ed i tempi di cantierizzazione.

Va detto che le alternative di tracciato in galleria risentono inevitabilmente di un aumento del tempo effettivo di accesso, stimabile in circa 90 secondi a tratta, per accedere alla banchina sotterranea posta a 20/25 metri di profondità, limitando così i vantaggi decantati in precedenza.

Confronto fra le diverse alternative:

Facendo un raffronto fra le diverse strategie d'intervento appare subito chiaro che il livello di copertura dell'area centrale risulta simile ed è da ritenersi soddisfacente in tutti i casi, eccetto la prima variante di superficie; per l'appunto, si precisa che si tratta pur sempre di stime indicative, calcolate in base alla superficie dell'area considerata e servita da una fermata entro 400 metri in linea d'aria, senza il peso della densità di O/D.

Per quanto concerne il costo di realizzazione, risulta notevolmente più alto nei casi dei sottoattraversamenti e non sembrerebbe giustificato da una domanda dell'ordine di 4.000 passeggeri per direzione nell'ora di punta, la quale deve presumersi in base al limite teorico di capacità di 4.800 pax/h *dir. ottenuto considerando:

- veicoli da 32 m;
- una densità di 4 pax/m²;
- un intervallo minimo fra le corse di 2'30" (per tutelare la regolarità della circolazione in superficie nelle tratte estreme a cielo aperto).

Sebbene, in caso di sede interamente segregata, il sistema di controllo della marcia consentirebbe la riduzione dell'intervallo fra le corse, che comunque è vincolato dalle tratte in superficie.

Anche gli oneri di gestione e manutenzione degli impianti di fermata e di galleria incrementano notevolmente nello scenario di sottoattraversamento, dato che non si ha la compensazione come invece per le metropolitane, per effetto della maggiore capacità di trasporto di quest'ultime.

È quindi da ritenersi che, qualora la scelta si orienti verso il sottoattraversamento, debbano essere presi dei provvedimenti per stimolare la domanda (la rete generale dei TPL è concepita fortemente come adduttrice alla linea, grazie all'attrazione esercitata sulla circolazione privata mediante parcheggi di scambio, ecc.) e parallelamente aumentare la capacità (con veicoli più lunghi e/o minimizzando l'intervallo fra le corse).

A questi aspetti se ne aggiungono altri difficilmente quantificabili e monetizzabili, come il comfort dei passeggeri e l'impatto ambientale, di cui è opportuno tenere conto, sia pure con l'opinabilità propria di questi temi.

Ad esempio, un percorso in superficie potrebbe essere psicologicamente meglio percepito dall'utenza rispetto ad uno in galleria, oltre che più facilmente accessibile alle persone a ridotta mobilità/anziani.

Da questa breve trattazione emerge che la scelta della soluzione sia frutto di un'attenta valutazione eseguita dapprima su scala di rete e non solo considerando una linea in maniera avulsa dalle altre, soprattutto in una realtà complessa com'è quella fiorentina e milanese; tutto ciò però non può prescindere dal peso politico assunto nel processo decisionale, il quale deve comunque basarsi sulla consapevolezza degli aspetti tecnici, funzionali ed economici.

Visti i molteplici scenari operativi fin qui discussi, prendendo spunto dal rapporto tecnico redatto per il sesto convegno nazionale del sistema tranviario, ho elaborato una tabella riassuntiva contenente le principali caratteristiche di ogni schema progettuale.

Fase	Criterio	1. Progetto di superficie	2. Variante di superficie	3. Sottoattraversam.	4. Sottoattraversam. "V"
COSTRUZIONE	Rischio archeologico	Marginale		Differenziato ^A	Elevato
	Rischio geotecnico	Nullo		Differenziato ^A	Elevato
	Costo di realizzazione ^B [MI €]	220÷280	190÷250	430÷650	490÷780
	Impatto dei cantieri	Occupazione di tutto il tracciato, segmentabile in tratte occupate per tempi medi (contenuti, se si usano idonei piani di cantierizzazione)		Tratte in superficie: vedi a sinistra Tratte in galleria: vedi a destra	Sacvo a fro cieco (gallerie profonde): occupazione delle sole aree delle stazioni e dei pozzi, per tempi lunghi ^C
ESERCIZIO	Capacità offerta [pax/h*direz.]	4800 ^D			
	Copertura dell'area centrale ^E [%]	80	69	82	85
	Accessibilità	Buona (interdistanza media tra le fermate: ca. 400m; accesso ai rtam su strada)		Differenziato ^A	Penalizzata da interdistanza media fermate (ca. 700 m) e accesso mediante scale o ascensori di notevole sviluppo
	Velocità commerciale [km/h]	15÷20 (4'÷3'/km)		Differenziato ^A	25÷30 (2,4'÷2'/km)
	Regolarità	Discreta - buona (condizionata dalla risoluzione delle interferenze con altri modi di circolazione)		Differenziato ^A	Ottima, se non vizzate dalle tratte in superficie
	Comfort dei passeggeri	Cinematico: buono Acustico: buono Psicologico: buono (contatto visuale con la città)		Differenziato ^A	Cinematico: buono Acustico: mediocre Psicologico: mediocre (ambiente chiuso)
	Impatto ambientale	Atmosferico: nullo Acustico: non rilevante Visuale: marginale (pensiline di fermata; la linea può essere eliminata quando opportuno, mediante alimentazione da terra o con accumulo a bordo)		Differenziato ^A	Atmosferico: nullo Acustico: nullo Visuale: marginale (manufatti degli accessi alle fermate e dei pozzi di ventilazione)
	Impatto su altri modi di circolazione	Limitazioni al traffico veicolare ordinario. Compatibilità con aree pedonali		Differenziato ^A	Praticamente nullo
	Costo di gestione per posto offerto	Usuale delle reti tranviarie		Differenziato ^A	Maggiore che nelle reti tranviarie ^F

Tab. 2.2 Confronto di quattro soluzioni di rete secondo diversi criteri di studio

- A. per le tratte in superficie si applicano le indicazioni delle colonne a sinistra; per quelle sotterranee quelle delle colonne a destra;
- B. i dati riportati sono indicativi e l'ampiezza della fascia di costi dipende dalla variabilità delle condizioni progettuali; per le tratte in superficie si fa riferimento a realizzazioni comprendenti opere di riqualificazione urbana;
- C. salvo necessità di consolidamenti dall'alto lungo le gallerie di linea;
- D. come ho scritto prima, si fa riferimento ai veicoli da 32 m previsti, alla densità di passeggeri in piedi di 4 pax/m² e a un intervallo minimo tra le corse di 2'30"; l'adozione di veicoli più lunghi darebbe luogo all'aumento della capacità, ma richiederebbe l'aumento della lunghezza delle banchine in tutte le fermate, in superficie e in galleria;
- E. dati indicativi, calcolati in base alla superficie dell'area tra i Viali e l'Arno servita da una fermata entro 400 metri (in linea d'aria), senza il peso della densità di O/D;
- F. la gestione e la manutenzione degli impianti di fermata e galleria sono più onerose rispetto alle linee tranviarie tradizionali.

Parte dello sforzo fiorentino si è già concretizzato nella realizzazione di due linee tranviarie superficiali, ricalcando la variante in attraversamento della sola porzione settentrionale del centro storico, a sfavore invece della relazione Stazione S.M.N.–Duomo, che tuttora risulta più veloce da percorrere a piedi. È però prevista la costruzione di una terza linea tranviaria diametrale, con la quale il centro storico verrà collegato al quadrante est della città, favorendo così l'uso dei mezzi di trasporto di massa e, in genere, la multi-modalità collettiva.

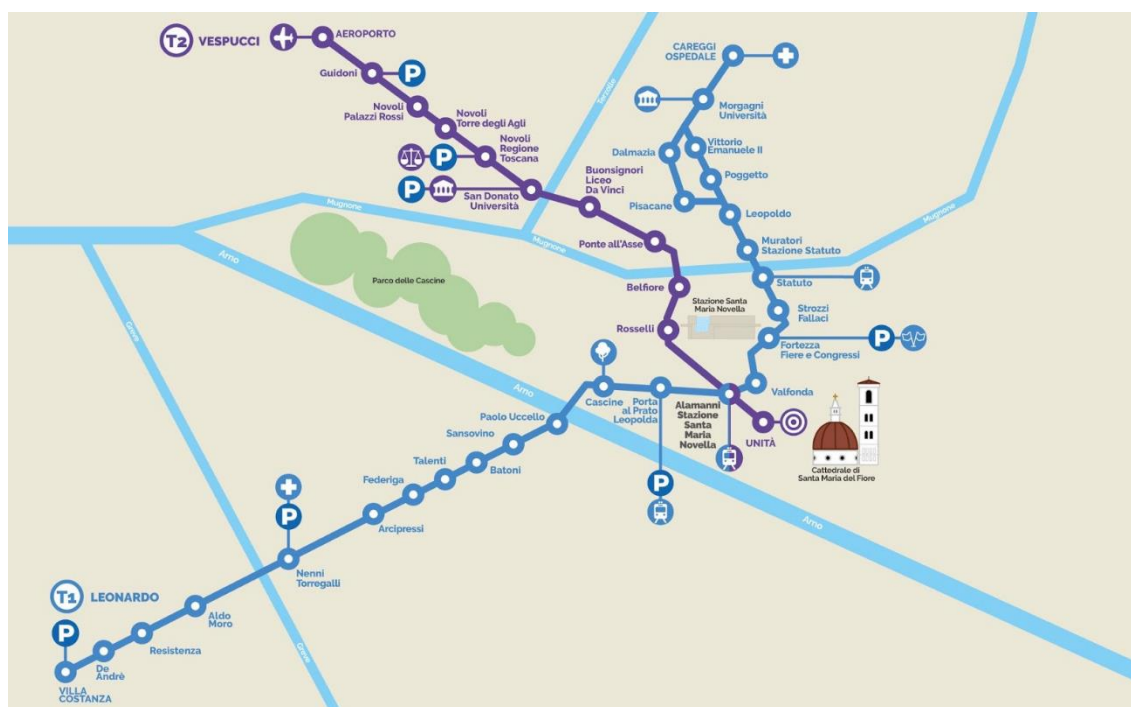


Fig. 2.11 Linea T1 (in azzurro) attiva dal 2010 con la deviazione verso Careggi/ospedale (completata nel 2018) e linea T2 (in viola) in esercizio dal 2019

2.2.9 Considerazioni sullo scenario italiano

La disamina di questi casi-studio mi ha permesso di evidenziare le principali tendenze che si sono succedute nel corso degli anni nell'Europa occidentale; e proprio il conflitto dei tram con le auto nelle zone centrali della città ha fatto sviluppare negli anni settanta il concetto della *Stadtbahn* (in Germania) e del *pre-metro* (in Francia), con la strategia di sottopassare il centro.

Contrariamente all'attraversamento centrale superficiale, la soluzione del sottoattraversamento si propone come meno invasiva, anche per quanto riguarda i cantieri, e offre migliori velocità commerciali, ma a costi sempre maggiori, e comunque con una percezione di scarsa accessibilità e forse di maggiore "distanza" anche dai luoghi serviti.

Tornando in ambito nazionale si evidenzia che, pur scostando le differenze di definizione da un contesto all'altro, l'Italia in effetti pare "soffrire" il confronto sia in senso numerico che qualitativo: solo cinque città godono di significativa presenza del tram in area urbana. Infatti, tranne Milano e, in parte, Torino non si hanno sistemi consistenti e ben articolati su diverse linee.

A Napoli le brevi estensioni programmate sono tuttora in corso, mentre Torino di fatto, sembra avere puntato anche su altre modalità come le ferrovie metropolitane ed i sistemi di metro leggera ancora oggi in costruzione, senza dimenticare il previsto riuso, in chiave metrotranviaria, della penetrazione cittadina offerta dalla ferrovia Torino-Ceres (oggi non più esercita).

Nel panorama nazionale va detto però che, oggi, oltre Firenze, anche Roma sta vivendo un'intensa fase di attività progettuale, cui fa capo il progetto delle nuove sette linee tranviarie urbane, che si propongono come sistema di trasporto intermedio fra quello metropolitano e quello di superficie su gomma.

Alla luce di queste considerazioni, si comprende facilmente che lo sviluppo delle reti tranviarie deve però essere accompagnato dal potenziamento e adeguamento degli altri sistemi di trasporto, sfruttando così il concetto di integrazione metropolitana da cui ha preso il via tale Capitolo.

3 – Stato di fatto – Area di Milano

Per contestualizzare le proposte di adeguamento infrastrutturale e i conseguenti risvolti suscitati sulla domanda di trasporto, oggetto del presente Studio, preme riassumere gli attuali sistemi di trasporto impiegati nell'area urbana ed interurbana di Milano, cogliendo l'occasione di fornire una visione d'insieme sull'offerta di trasporto erogata ATM S.p.A., azienda presso la quale ho svolto attività di tirocinio curricolare prima e facoltativo poi.

Durante questa esposizione non mancherò di richiamare i requisiti fondamentali di circolazione e di esercizio sui quali poggia il servizio di trasporto offerto, avendo cura di caratterizzare lo scenario tranviario milanese attraverso:

- la classificazione delle linee in base al materiale rotabile impiegato;
- le dotazioni di bordo;
- gli aspetti di sicurezza ed il *comfort* garantito durante la marcia;
- il livello di accessibilità alla rete di trasporto.

Inoltre, appurerò quanto sia importante il legame che unisce la tipologia di veicolo, lo stato di protezione della sede tranviaria, gli impianti di preferenziamento semaforico e molti altri elementi che subentrano nel processo di valutazione di una rete di trasporto urbano, dedicando grande interesse agli effetti che essi provocano sull'utenza.

3.1 – Stato di fatto – rete TPL milanese

Il servizio di TPL nell'area urbana e suburbana di Milano è integralmente gestito da ATM S.p.A. e si articola su quattro modalità di trasporto:

- metropolitana;
- tram;
- filobus;
- autobus;

lungo una rete che si snoda per quasi 1.500 km (per maggiori dettagli si rimanda alla Tab. 3.1), utilizzata da oltre 700 milioni di passeggeri/anno.

La rete di superficie, la cui orditura primaria è costituita in primo luogo dalle linee di forza tranviarie, serve in modo diffuso tutta la città, i Comuni limitrofi situati nella prima fascia oltreconfine e non solo, integrandosi con la rete metropolitana.

RETE DI TRASPORTO PUBBLICO LOCALE	
Territorio servito [km ²]	657,00
Comuni serviti [-]	46
Popolazione residente [-]	2.521.647
Passeggeri trasportati [-]	715.923.728
km percorsi [km]	154.687.612,00
Corse effettuate al giorno (lun-ven invernale) in superficie (media annuale) [-]	24.168
Corse effettuate al giorno (lun-ven invernale) in metropolitana (media annuale) [-]	2.302
RETE METROPOLITANA	
Numero linee [-]	4
Lunghezza rete [km]	96,80
Parco veicolare (motrici e carrozze)* [-]	1014 ¹
Numero treni [-]	169 ²
Numero stazioni [-]	113
RETE AUTOMOBILISTICA ³	
Numero linee [-]	130
Lunghezza rete [km]	1.161,90 ⁴
Parco veicolare * [-]	1.334
RETE TRANVIARIA ⁵	
Numero linee [-]	20
Lunghezza rete [km]	181,80 ⁶
Parco veicolare * [-]	493
RETE FILOVIARIA	
Numero linee [-]	4
Lunghezza rete [km]	38,80 ⁷
Parco veicolare * [-]	137

Tab. 3.1 Dati dimensionali della rete ATM

* il parco veicoli fa riferimento ai dati patrimoniali articolati sulle differenti tipologie di trasporto e sul loro impiego

¹ nel valore non sono incluse i treni della linea M5 in quanto non di proprietà di ATM

² comprende i treni delle linee M1 M2 M3

³ i dati includono le 16 linee in subaffidamento e i bus di quartiere⁴ somma delle lunghezze in asse di esercizio delle singole linee

⁵ i dati comprendono anche la linea tranviaria Milano – Desio e Milano – Limbiate temporaneamente sospesa; il servizio è effettuato con autobus

⁶ somma delle lunghezze in asse di esercizio delle singole linee

⁷ somma delle lunghezze in asse di esercizio delle singole linee

Per di più, la rete di trasporto pubblico locale urbana si caratterizza per lo schema radiocentrico raccordato fondamentalmente su tre livelli di centralità:

- Cerchia dei Navigli;
- Cerchia dei Bastioni;
- circonvallazione filoviaria;

tra cui quello mediano viene coperto da linee tranviarie (un tempo mediante un'unica linea circolare bidirezionale – 29/30).

Tali linee rivestono un ruolo primario nell'integrazione di rete grazie alle numerose interconnessioni con le altre modalità di trasporto, sia collettive che individuali (alcuni capilinea tranviari sono infatti dotati di parcheggio di corrispondenza di media capacità) e garantiscono un'ideale accessibilità al servizio, sia in termini di capillarità della rete che rispetto alle esigenze delle utenze più deboli tendenzialmente più favorevoli ai sistemi di superficie.

Infatti, insieme al sistema metropolitano, quello tranviario rappresenta un caposaldo della rete TPL di Milano, nonostante alcune linee siano esercite utilizzando tuttora tram storici della serie Carrelli del 1928 che, pur essendo tecnologicamente obsoleti e di scarsa *performance*, rappresentano un valore iconico del servizio tranviario milanese. Inoltre, la rete tranviaria presenta un elevato grado di complessità infrastrutturale: le varie tratte che la compongono mostrano infatti caratteristiche eterogenee soprattutto rispetto al livello di protezione della sede ed ai veicoli in uso.

3.2 – Stato di fatto – rete tranviaria urbana di Milano

Sulla rete tranviaria urbana, avente un'estensione di circa 190 km (somma delle lunghezze in asse di esercizio delle singole linee oggi attive), operano attualmente 17 linee (disegnate in Fig. 3.1) che impiegano un totale di circa 290 vetture in esercizio nella massima punta, quindi con una elevata densità di vetture per chilometro di rete.

L'area coperta dalla rete urbana è sostanzialmente coincidente con il Comune di Milano, ancorché due di tali linee (n° 15 e 31) si estendano a comuni limitrofi per un tratto terminale. Inoltre, si annoverano altre due linee interurbane, entrambe in attesa di riqualificazione (con *standard* di metrotranvia) e/o prolungamento (Milano-Desio-Seregno) entrambe con gestione provvisoria automobilistica.

Il sedime tranviario è a doppio binario, con capilinea ad anello e banchine di fermata tutte a destra e comprende 5 depositi ed un'officina di grandi riparazioni.

Per di più, la configurazione della rete tranviaria presenta un elevato grado di sovrapposizione dei percorsi tra linee differenti, in particolare sugli assi convergenti verso il centro della città.

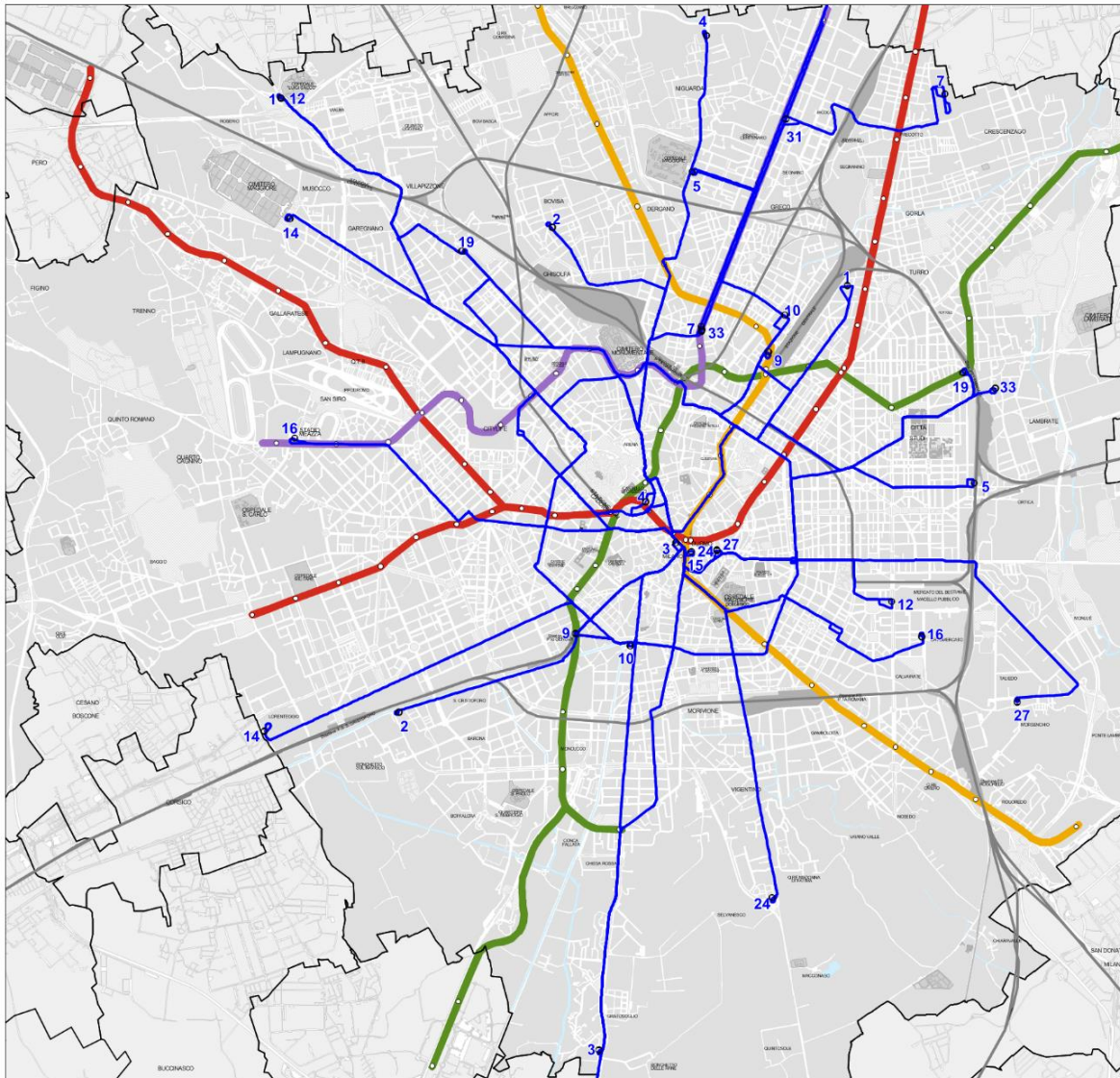


Fig. 3.1 Rete tranviaria (in blu) e metropolitana di Milano

Fonte: elaborazione ATM

Le varie linee in attraversamento del centro storico, provenienti da diverse zone di origine periferiche, si sovrappongono nel famoso “collo di bottiglia” costituito dagli impianti sulle vie Mazzini, Torino, Cordusio, Broletto, ma soprattutto su via Orefici, dove si contano ben 6 linee sovrapposte per un passaggio al minuto nell’ora di punta.

Un transito così frequente pone problemi di regolarità del servizio offerto ed anche di integrazione con l’imponente traffico pedonale che interessa questa zona di Milano, la quale si annovera in assoluto fra le più pregiate e turistiche della Metropoli.

Volendo distinguere le varie linee dal punto di vista gerarchico e funzionale, si individuano:

- le linee di forza, già oggetto di azioni di riqualificazione per migliorare le prestazioni del servizio ed attribuire alle stesse una connotazione di qualità anche rispetto alla comunicazione con l'utenza (vi rientrano i tram 3-4-9-12-14-15-24-27-31 che svolgono una funzione complementare a quella della rete metropolitana);
- nella fascia intermedia si possono annoverare alcune linee di media forza che possono usufruire di sedi parzialmente o completamente riservate (rif. linee 2-5-7-16-19);
- lo schema si completa con linee caratterizzate da livelli di domanda più contenuti e sedi prevalentemente o totalmente promiscue giustificate dal contesto ambientale in cui operano, piuttosto che da considerazioni tecnico trasportistiche (rientrano in quest'ultima categoria le linee 1-10-33 gestite totalmente con vetture tipo Carrelli).

In conclusione, la rete tranviaria urbana di Milano presenta caratteristiche fondamentali di circolabilità che non consentono l'impiego indifferenziato della flotta, con la conseguenza che su linee caratterizzate da carichi elevati non sempre è possibile usare vetture più capienti, fermo restando l'esigenza di impiegare i nuovi tram a pianale ribassato sui percorsi adeguati in termini di banchina.

Per poter comprendere lo stretto legame fra disponibilità di infrastrutture, vetture impiegate e servizio offerto, segue un breve cenno ai parametri identificatori dell'esercizio delle linee ad oggi operative.

3.2.1 Dati di esercizio

Ricollegandoci alla distinzione gerarchica delle linee fatta pocanzi si ha che:

- fra le linee di forza solo la 12 e 14 presentano tracciato diametrale, mentre le restanti linee ad alta capacità sviluppano un tracciato radiale di collegamento tra aree periferiche della metropoli oppure con i comuni confinanti: complessivamente, la frequenza di punta è pari a circa 4-6 minuti, ridotta nelle fasce di morbida in funzione dell'andamento della domanda di trasporto;
- le linee di media forza sono servite da materiale rotabile meno capiente, fuorché la 7 riqualificata in termini di accessibilità e quindi esercita con materiale innovativo (Sirio). In generale tali linee garantiscono una frequenza in punta leggermente inferiore, pari a circa 6-8 minuti;
- le linee a basso carico presentano rilevanti limiti infrastrutturali e risentono dell'impiego di vetture obsolete e poco capienti (oltre che difficilmente accessibili), pertanto anche la frequenza di punta è contenuta e prossima ad 8 minuti.

Nella tabella seguente si riassumono le caratteristiche che contraddistinguono le linee tranviarie attive.

LINEA	LUNGHEZZA IN ASSE [km]	FREQUENZA MAX PUNTA [min]	N° MAX VETTURE IN ESERCIZIO [-]	VETT*km/ANNO [-]	TIPOLOGIA DI VETTURE
1 Roserio - Greco	10,8	6'/7'	24	950.000	K35
2 Negrelli - Bausan	10,4	7'	18	1.410.000	46/47 (4900)
3 Gratosoglio - Cantù	7,2	6'	13	1.350.000	4900/Sirio26
4 Parco Nord - Cairoli	7,6	4-8' *	17	1.280.000	Sirio35
5 Ospedale M. - Ortica	8,2	6'/7'	15	690.000	K35
7 Precotto - Lagosta	6,6	6'/7'-12'/13' **	9	870.000	Sirio35
9 P.ta genova - Centrale	7,6	5'	19	1.740.000	Sirio26
10 XXIV Maggio - Lunigiana	9,2	7'/8'	16	850.000	K35
12 Molise - Roserio	13,0	8'	20	2.170.000	4900
14 Lorenteggio - Cim. Maggiore	14,4	4'/5' ***	30	2.670.000	Sirio26
15 Rozzano - Duomo	10,5	5'	21	2.190.000	Eurotram/Sirio35
16 M.te Velino - San Siro M5	10,3	7'/8' ****	15	1.650.000	4900
19 Lambrate - P. Castelli	8,8	6'	24	730.000	K35/46/47
24 Vigentino - Fontana	5,1	5'	14	1.020.000	4900/Sirio26
27 Ungheria - Fontana	10,3	6'	13	1.890.000	4900
31 Cinisello - Bicocca (lagosta)	6,0	6'	10	980.000	Sirio35
33 Rim. Lambrate - Lagosta	7,0	8'	12	520.000	K35

Tab. 3.2 Caratteristiche delle linee tranviarie milanesi

- * sono previste alcune corse barrate tra Niguarda e Maciachini M3 in direzione P.zza Castello e tra Maciachini M3 e Parco Nord in direzione contraria; inoltre, vi sono corse limitate da Maciachini ad Ospedale Maggiore (Niguarda) in direzione Parco Nord e viceversa per vetture che rientrano in deposito;
- ** tabelle barrate alternate da Anassagora (Precotto) a Testi/Marcellina in direzione P.le Lagosta e viceversa in senso contrario nelle ore di punta e in fascia serale;
- *** corse barrate da Porta Genova a Lorenteggio e viceversa durante le ore di punta (una ogni tre tabelle), alcune corse limitate a Via Cenisio/Via Induno in direzione Lorenteggio e a Cenisio M5 in direzione opposta per rientro in deposito;
- **** in direzione San Siro M5, durante la punta, alternativamente, ci sono tabelle barrate da Monte Velino a Segesta M5 e viceversa; inoltre, sono previste corse limitate a De Angeli M1 in direzione Monte Velino e in senso contrario per rientro in deposito.

Fonte: elaborazione ATM

Come si può notare, in tabella, sono presenti alcune linee che offrono un servizio modulato e variabile in ragione della fascia oraria, con potenziamenti previsti nelle ore di punta; a tal proposito, le corse barrate sono propedeutiche al soddisfacimento dei picchi di domanda che si verificano in intervalli di tempo ristretti, generati soprattutto dagli spostamenti pendolari da periferia a centro nelle ore di punta mattinatale e viceversa nel pomeriggio/sera.

Chiaramente tali corse di rinforzo possono essere garantite solo se l'infrastruttura a disposizione lo consente, grazie anche alla presenza puntuale di anelli di inversione intermedi. In tal senso, l'impiego di racchette di inversione si mostra particolarmente efficace per le linee diametrali, visto il loro sviluppo geometrico e l'andamento di carico connesso che, solitamente, presenta uno scarico una volta giunto in corrispondenza delle fermate centrali.

Ciò non può dirsi per le linee radiali, ove tali raccordi non sortiscono apprezzabili effetti, specie per quanto concerne la limitazione lato periferia, data la minor esigenza di mobilità in questa direzione e considerando la maggiore dispersione dei picchi di carico nelle ore di punta serali; questo fenomeno si è riscontrato soprattutto con il decentramento di funzioni a favore soprattutto degli importanti poli industriali/commerciali localizzati perlopiù in aree suburbane o extraurbane.

Quindi appare chiaro che l'anello intermedio di inversione rappresenta a tutti gli effetti un'opportunità per rimodulare il servizio, frazionando così la linea in più tratte funzionali.

Sullo stesso principio si basano gli interventi di segmentazione delle linee diametrali, con la differenza che l'impiego di attestamenti tronchi, adeguati all'inserimento di vetture bidirezionali, impone una spaccatura fisica e non solo funzionale.

Va da sé che le proposte di riassetto della rete tranviaria dovranno essere necessariamente correlate ai diagrammi di carico associati a ciascuna linea attenzionata; in tal senso, è chiaro che l'introduzione di mezzi bidirezionali consentirebbe di implementare ulteriormente la flessibilità del servizio offerto, a fronte di un onere gestionale ed occupazionale ridotto se comparato a quello richiesto dai mezzi monodirezionali attualmente impiegati,

Infine, non dovranno essere trascurate le riduzioni di capacità connesse all'impiego di nuovi veicoli bidirezionali, specie nelle fasce orarie di massimo carico, se confrontati con parte del parco veicolare oggi in servizio, di cui ora riporto una breve descrizione.

3.2.2 Classificazione delle linee per materiale rotabile impiegato

Negli anni sulla rete di Milano si sono avvicinate varie tipologie dei veicoli, individuando di volta in volta la soluzione più razionale rispetto ad un contesto mutevole: modifiche o soppressioni di linee tranviarie per apertura di nuove linee metropolitane, incrementati flussi di traffico per mutato contesto urbano, adozione di tram a pianale ribassato, ecc.

Infatti, come ho anticipato, il modello di offerta è caratterizzato da un parco mezzi disomogeneo, correlato ad una rete d'esercizio estremamente complessa sia in termini infrastrutturali, sia rispetto ai contesti urbani attraversati.

L'assortimento del parco mezzi proviene del resto dalle politiche di investimento che si sono susseguite nel corso dei decenni di sviluppo del servizio tranviario milanese, inizialmente finalizzate a massimizzare la capacità di trasporto, soprattutto sugli assi di forza della rete (con l'impiego delle vetture 4600-4700-4800-4900 e poi con l'arrivo degli Eurotram e dei Sirio).

Successivamente, con l’acquisizione dei tram Sirietto, utilizzati su linee in penetrazione dei contesti urbani più consolidati, si è verificata un’inversione di tendenza, con un ripensamento strategico su ruolo e funzionalità delle linee tranviarie in attraversamento del centro storico finalizzato alla riduzione dell’impatto prodotto dalle eccessive dimensioni dei mezzi.

Ciò rimanda inevitabilmente alle difficoltà di coerenza tra l’offerta di trasporto e i flussi di domanda ancora presenti su alcuni assi urbani, dovuti proprio alla eterogeneità del materiale disponibile e all’impossibilità di mediare la capacità di trasporto offerta da alcune tipologie di tram rispetto alle reali esigenze di mobilità.

La capacità di trasporto necessaria per soddisfare queste esigenze è infatti legata sia alla tipologia che al numero dei mezzi.

A tal proposito, le tabelle seguenti sintetizzano l’attuale situazione delle uscite dei mezzi tranviari urbani, differenziandoli per tipologia ed evidenziando per la maggioranza delle linee la difformità del parco veicolare utilizzato, funzione anche della localizzazione dei depositi rispetto alle tratte servite.

DISTRIBUZIONE USCITE/DEPOSITI															
Ottobre 2021															
LINEE		Lunedì-Venerdì													
		BAGGIO			LEONCAVALLO		MESSINA			TICINESE				PRECOTTO	
		46/47	4900	4900 R	k35	4900 R	k35	4900	Sir26	4900	EURO	Sir35	Sir26	Sir26	Sir35
1	Roserio - Greco						24								
2	Negrelli - Bausan	12					6								
3	Gratosoglio - Cantù		9									4			
4	Parco Nord - Cairoli														15
5	Ospedale M. - Ortica				15										
7	Precotto - Lagosta (Bicocca)												4	5	
9	P.ta Genova - Centrale											10	9		
10	XXIV Maggio - Lunigiana						16								
12	Molise - Roserio					9		11							
14	Lorenteggio - Cim. Maggiore							4	26						
15	Rozzano - Duomo									13	10				
16	M.te Velino - Axum (Segesta)			15											
19	Lambrate - P. Castelli	9			15										
24	Vigentino - Fontana								11			4			
27	Ungheria - Fontana					13									
31	Cinisello - Bicocca (Lagosta)														11
33	Rim. Lambrate - Lagosta				11										
TOTALE		21	9	15	41	22	40	21	26	11	13	10	18	13	31
TOTALE USCITE PER DEPOSITO		45			63		87			52				44	

Tab. 3.3 Distribuzione delle uscite per deposito – orario feriale invernale (fascia di punta)

Fonte: elaborazione ATM

Per offrire una visione territoriale dell’impiego dei mezzi sulla rete si riporta la Fig. 3.2, che ne evidenzia lo schema e specifica la tipologia di vetture in servizio su ciascuna tratta; da ciò si desume quali siano le linee e/o direttrici di riferimento rispetto a quelle a vocazione essenzialmente locale.

In particolare, si intravede l’impiego di vetture ad alta capacità sugli assi di rete Nord-Sud, come anche di veicoli moderatamente capaci lungo la direttrice Est-Ovest e la parte residua di rete nelle zone urbane più consolidate servita da materiale rotabile meno prestazionale.

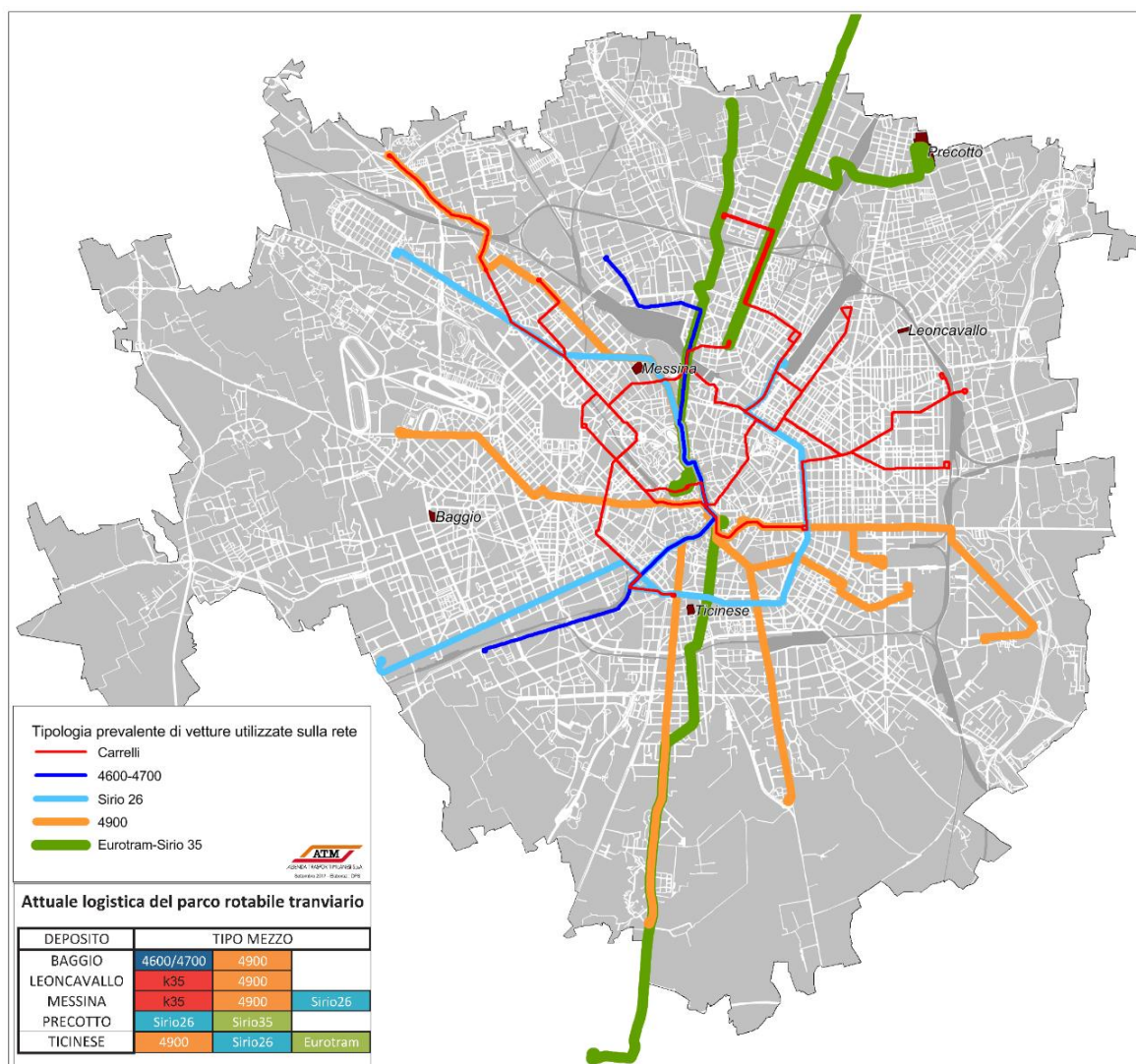


Fig. 3.2 Tipologie di vetture tranviarie utilizzate sulla rete

Fonte: elaborazione ATM

La flotta, come avrò modo di approfondire, consta di circa 400 tram ed è attualmente composta esclusivamente da vetture monodirezionali, con porte passeggeri sul lato destro; il servizio urbano è effettuato con tram in composizione “singola”.

3.2.3 Sistemi di protezione e dotazioni di bordo

L'estensione dei percorsi protetti per direzione e per linea raggiunge un livello di protezione "fisica" pari a circa il 50% (schematizzato in Fig. 3.3) e, nonostante il dato possa essere ritenuto soddisfacente, si evidenzia tuttavia la necessità di adeguare altri importanti assi, sia radiali che trasversali.

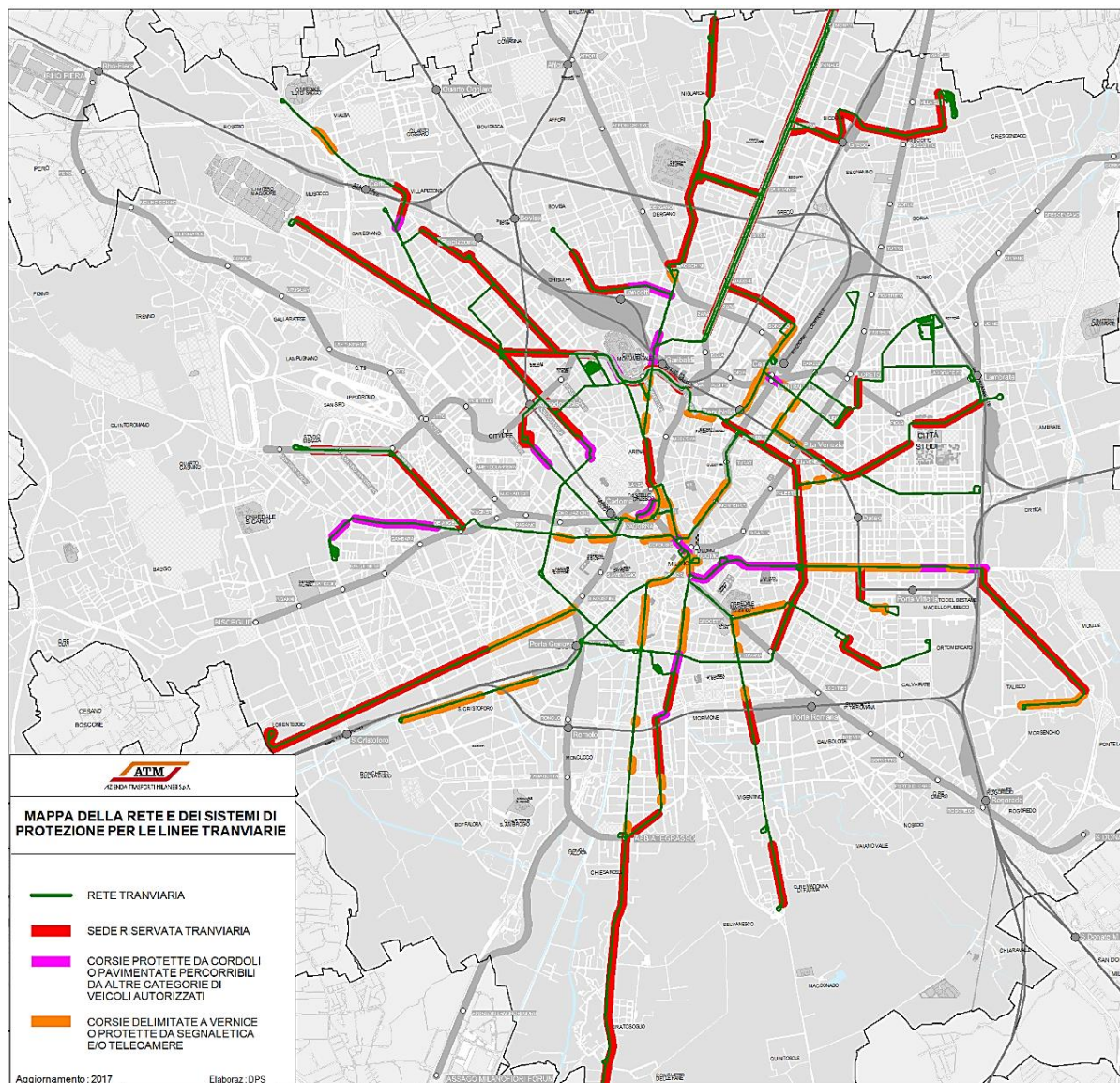


Fig. 3.3 Sistemi di protezione delle linee tranviarie

Fonte: elaborazione ATM

L'obiettivo degli interventi di adeguamento infrastrutturale è quello di garantire velocità commerciali superiori ed omogenee, in linea con analoghe realtà estere alle quali la città di Milano si riferisce in termini di qualità del servizio offerto, evitando di vanificare i vantaggi attesi dall'ammodernamento della flotta, analizzati nel presente Studio.

In materia di protezione riassumo molto brevemente quali sono le dotazioni di bordo che contraddistinguono gli apparati terra-treno in uso per la rete tranviaria urbana, ossia:

- il radio-comando scambi;
- la radio AVM.

Entrambi sono impianti consolidati, essendo in uso da anni; i nuovi tram ne saranno dotati, al pari di tutte le altre vetture già circolanti.

In particolare, un ulteriore ausilio alla sicurezza dell'esercizio è rappresentato dall'impianto radio AVM (Automatic Vehicle Monitoring) urbano, che oltre a svolgere la funzione di monitoraggio consente la comunicazione diretta con il Posto Centrale e la localizzazione del veicolo. Al contempo, si precisa che gli scambi sono comandati da bordo veicolo, localmente, in radiofrequenza, salvo alcuni residuali ancora comandati a lancio di corrente, che non richiede impianti dedicati, essendo realizzato tramite gli azionamenti di trazione. Tale funzionalità è destinata ad essere disattivata, non appena il programma di installazione degli scambi comandati in radiofrequenza sarà ultimato.

3.3 Correlazione con la domanda di trasporto

La valutazione dello stato di fatto non può altresì prescindere dall'analisi dei fattori di domanda relativi al bacino territoriale di servizio della rete tranviaria, facendo riferimento alle analisi e stime condotte per la definizione degli scenari di valutazione del PUMS di Milano (approvato nel Novembre 2018), aventi come orizzonte temporale dello scenario di *reference* il 2024.

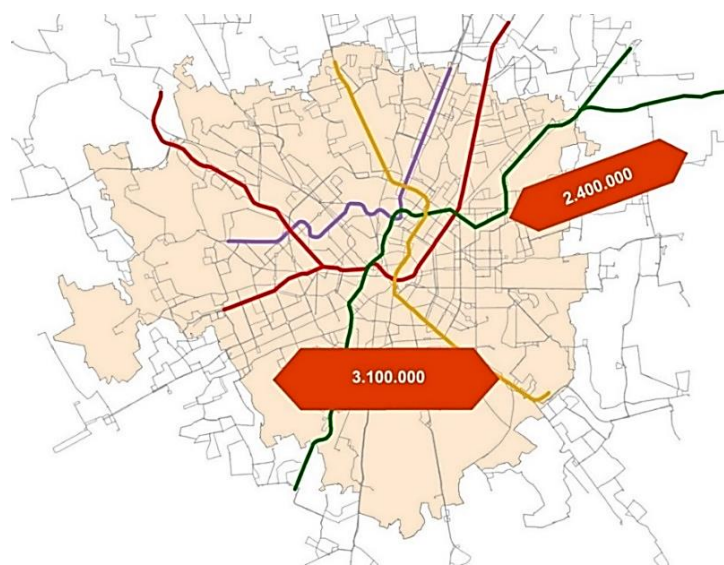
Si precisa che il quadro complessivo della domanda di mobilità presentato nel PUMS, deriva dall'aggiornamento dei dati disponibili e delle indagini eseguite nell'area milanese, a partire dall'indagine O-D condotta nel 2005-2006 dal Comune di Milano con la collaborazione di AMAT e di ATM, che è stata opportunamente integrata e calibrata rispetto alla nuova struttura insediativa e produttiva del territorio, alle nuove informazioni relative ai monitoraggi dei flussi di traffico veicolare, ai passeggeri trasportati dai differenti servizi di trasporto pubblico, ecc.

L'indagine O-D, oltre a mettere in luce le principali caratteristiche della domanda di mobilità, risponde evidentemente all'esigenza di formazione delle matrici Origine-Destinazione degli spostamenti, utilizzate nei processi di pianificazione. Infatti, tali matrici risultano necessarie per alimentare i modelli di simulazione impiegati nella verifica di specifiche ipotesi progettuali e in generale delle politiche di intervento, quindi anche nella riproduzione dello stato di fatto oltre che nella verifica dello scenario di servizio.

Il ricorso a tali modelli riguarda del resto le elaborazioni condotte per le valutazioni dei carichi sulla rete TPL ed in particolare sulle linee tranviarie oggetto del presente studio, rispetto alle quali sono state prodotte alcune restituzioni di sintesi delle condizioni di utilizzo dell'offerta di servizio (es.: diagrammi di carico e flussogrammi sulla rete).

Dall'indagine O-D è emersa anche la ripartizione modale degli spostamenti che si sviluppano nell'area di studio, con riferimento ai dati disponibili sui flussi di traffico veicolare e sui passeggeri trasportati dai diversi sistemi di trasporto pubblico, in parte forniti dalla stessa ATM per quanto riguarda le modalità di trasporto appartenenti al proprio ambito gestionale.

Le elaborazioni condotte per il PUMS di Milano permettono di quantificare gli spostamenti giornalieri interni a Milano e quelli che prevedono uno scambio al confine del Comune. Si tratta di dati riferibili all'anno 2018 ottenuti attraverso un'interpolazione tra i dati di base



al 2013 (anno di avvio della predisposizione del PUMS) e i volumi prospettici calcolati per lo scenario di *reference* del medesimo.

Fig. 3.4 Quadro complessivo della domanda di mobilità giornaliera nell'area di studio al 2018

Fonte: elaborazione ATM

Inoltre, comparando i dati al 2018 (fonte PUMS) con quelli relativi al 2014, è possibile notare un sensibile incremento del numero di spostamenti, pari a circa il 5%, equamente ripartito nell'area comunale e non, del capoluogo lombardo, come mostrato nella seguente tabella.

Tipo di spostamento	2014*	2018**
Spostamenti/gg interni a Milano	2.978.000	3.100.000
Spostamenti/gg di scambio al confine con Milano	2.277.000	2.400.000
Totale domanda di mobilità delle persone	5.255.000	5.500.000

* Il 2014 è l'anno di riferimento per i dati di base ottenuti dall'aggiornamento al 2013 dei risultati dell'indagine O-D

** Il 2018 è l'anno di attualizzazione dati di domanda con interpolazione lineare tra i valori 2013 e previsioni 2024

Fonte: elaborazione ATM

Tab. 3.4 Quadro complessivo della domanda di mobilità nell'area di studio

Le tipologie di spostamenti considerate, ovvero interni al capoluogo e di scambio con il mondo esterno, costituiscono peraltro il quadro di domanda entro il quale è prevedibile che si esaurisca la mobilità di riferimento per il sistema di trasporto tranviario.

La quota modale riferibile al TPL rappresenta un indicatore altrettanto fondamentale della domanda di mobilità, offrendo un quadro della risposta al livello di servizio offerto ai residenti e ai *city users*, della sua capacità attrattiva e del rapporto di convenienza per gli utenti rispetto ad altri modi alternativi di spostamento.

In questo senso assume quindi particolare valore l'attuale ripartizione modale degli spostamenti interni a Milano, che vede una quota assorbita dal TPL pari a ben il 57% della mobilità complessiva (si veda Fig. 3.5), grazie proprio alla diffusa e articolata offerta di servizio su di una rete di collegamenti fortemente capillare.

Di questa quota di traffico la parte preponderante riguarda i passengeri sulla rete ATM che, nell'era pre-Covid (2019), ammontavano a circa di 800 milioni di passeggeri/anno, con una crescita costante e certificata negli ultimi anni.

Tale valore, comprensivo anche dei servizi di area urbana, rimanda ad una media giornaliera feriale superiore a 2 milioni di passeggeri, due terzi dei quali compie almeno una parte dello spostamento utilizzando una delle 4 linee metropolitane in esercizio.

Inoltre, l'analisi della ripartizione modale (fornita dal PUMS) degli oltre cinque milioni di spostamenti sistematici (per lavoro o studio) effettuati in un giorno feriale tipo nell'area di Milano e hinterland vede una quota modale complessiva del trasporto pubblico pari al 48%, a fronte del 49% di spostamenti effettuati con auto o moto, come si evince dalla figura seguente.

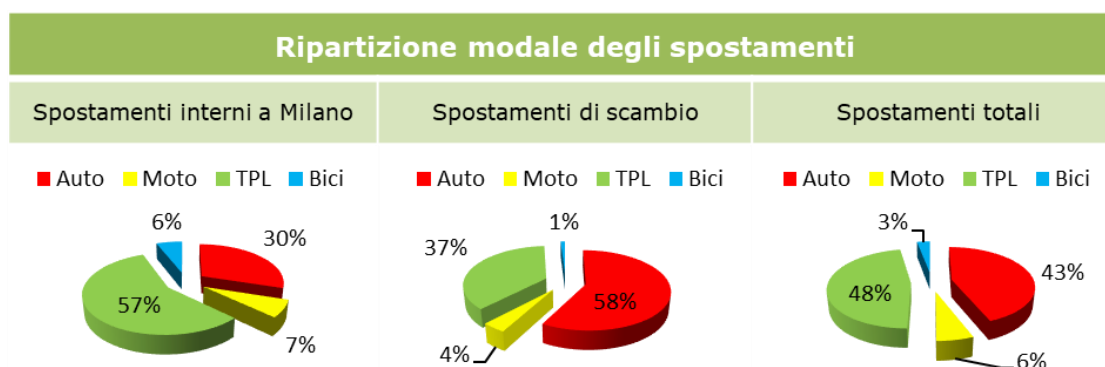


Fig. 3.5 Ripartizione modale degli spostamenti relativa allo stato di fatto

Fonte: elaborazione ATM

Anche il Programma di Bacino (approvato dall'Agenzia TPL il 10 gennaio 2019) fornisce dati riguardanti la mobilità e ripartizione modale dell'intera area di Bacino (partendo dai dati censuari ISTAT), dai quali emerge che, a un livello territoriale più esteso di quello dell'area metropolitana, la situazione è invertita, in quanto è prevalente il trasporto privato motorizzato (auto-conduttore ed auto-passeggero), per certi versi giustificato dallo scarso livello di servizio offerto sulla rete provinciale/regionale.

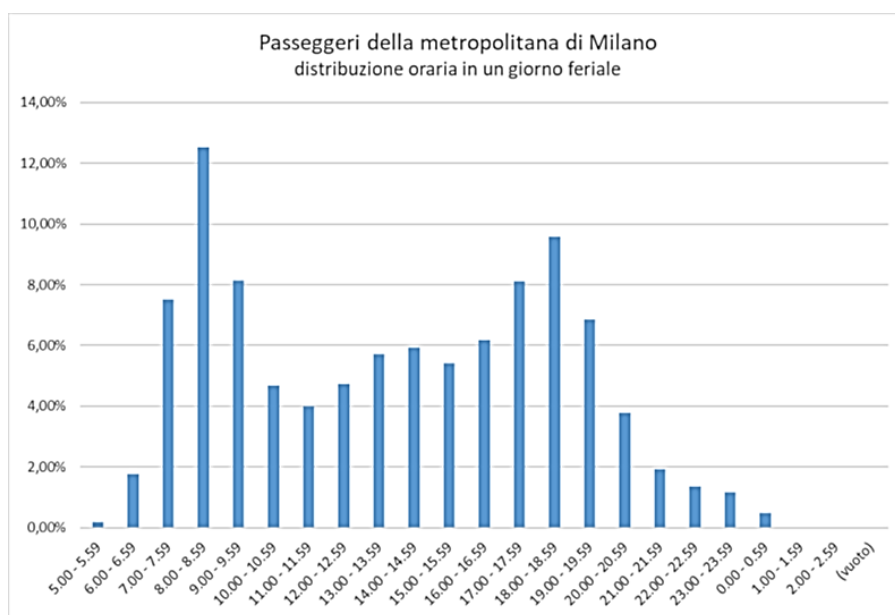
Alla luce dell'analisi del riparto modale alla scala urbana e metropolitana, viene confermato il ruolo prevalente dei servizi TPL offerti nel Comune di Milano, grazie soprattutto alla rete metropolitana, che oltre a costituire l'ossatura di riferimento della rete interna al capoluogo si proietta anche in ambito extraurbano, favorendo la forte gravitazione della domanda di mobilità sistemata verso Milano.

Dai dati emerge infatti una forte correlazione con il livello di servizio offerto, impostato sull'obiettivo di garantire una capacità sufficiente a smaltire i flussi di domanda, ma anche rispetto ad obiettivi sociali che attribuiscono al TPL un valore aggiunto sia in termini di utilità sociale che di sostenibilità.

Ciò non di meno, va anche rilevato come la ripartizione modale degli spostamenti delle persone sia la risultante di complessi equilibri che vedono nell'offerta di servizio solo uno dei fattori in gioco, dipendendo molto la scelta del mezzo di trasporto anche dal costo dello stesso, dalla struttura insediativa, dai livelli di congestione della rete stradale (ovviamente molto superiori nelle aree urbane dense) e, non ultimo, dalle politiche attive di orientamento della domanda attuate dalle Amministrazioni competenti.

In questo insieme di elementi, la capacità di trasporto, che rappresenta un fattore di riferimento nella pianificazione/programmazione del servizio pubblico, assume evidentemente aspetti dimensionali/qualitativi in funzione dei flussi.

In tal senso, va precisato che il numero di utenti da trasportare, seppur stimabile anche mediante elaborazioni modellistiche, non può prescindere da una base conoscitiva della situazione reale, assumendo ad esempio i dati ottenuti con il sistema di controllo e conteggio degli accessi in metropolitana che consente di ricavare in automatico dati precisi e disaggregati sui passeggeri.



A tal proposito, il grafico mostra l'andamento orario medio dei passeggeri in ingresso alle quattro linee della metropolitana in un giorno feriale tipo.

Fig. 3.6 Distribuzione oraria dei passeggeri della metropolitana

Fonte: elaborazione AMAT 2017 su dati ATM – fonte PdB 2018

Dall'istogramma osservo:

- la presenza di due fasce di punta, di tre ore l'una, fra le 7 e le 10 del mattino e fra le 17 e le 20 del pomeriggio, con valori oscillanti intorno a 100.000 passeggeri/ora;
- la presenza di un picco marcato, fra le 8 e le 9 del mattino, con flussi che superano i 150.000 passeggeri in ingresso;
- una estesa fascia di morbida fra le due punte, con flussi che si mantengono costantemente abbastanza elevati, compresi fra 50.000 e 80.000 passeggeri/ora.

Per quanto riguarda il dato disponibile di frequentazione delle linee urbane di superficie, in assenza di analogo sistema automatico di rilevazione dei flussi, questo è ovviamente meno ricco e preciso di quello fornito dai sistemi di controllo degli accessi della metropolitana, anche perché gli attuali sensori di conteggio passeggeri installati sui mezzi di superficie risultano ancora poco affidabili.

La rete di superficie vede oltretutto un bassissimo tasso di validazione dei titoli di viaggio a bordo mezzo, ma ciò non è necessariamente sintomo di evasione dato che i possessori di abbonamento non sono tenuti a convalidarlo ogni volta, però questo inevitabilmente impedisce di valutare in modo affidabile il numero di passeggeri da questa fonte.

La stima dei passeggeri trasportati sui mezzi di superficie deriva pertanto dai dati disponibili raccolti da AMAT direttamente con rilievi campionari a bordo mezzo dei passeggeri saliti e discesi ad ogni fermata, realizzati fra il 2013 e il 2017 nella fascia mattutina. Il campione disponibile non si ritiene sia sufficientemente ampio ed affidabile per produrre un'elaborazione per singola linea ma consente di ricavare alcuni dati complessivi, contenuti nel PdB, utili a caratterizzare i differenti segmenti di offerta.

Contesto	Sistema	pax/giorno	pax*km/giorno	pax/anno	pax*km/anno	Load factor 2hp *	ripartizione modale %
Urbano	Bus	450.000	975.000	127.860.000	276.950.000	0,26	46,3
	Tram	385.000	776.000	109.250.000	220.350.000	0,19	39,6
	Filobus	136.000	303.000	38.690.000	86.130.000	0,30	14,0
	Totale	971.000	2.054.000	275.800.000	583.430.000	0,23	-
Area urbana	Bus	124.000	510.000	35.180.000	144.920.000	0,20	96,1
	Tram	5.000	32.000	1.490.000	9.110.000	0,32	3,9
	Totale	129.000	542.000	36.670.000	154.030.000	0,21	-
Servizi	Totale	1.100.000	2.596.000	312.470.000	737.460.000	0,23	-

Tab. 3.5 Passeggeri trasportati dalla rete TPL urbana di superficie e di area urbana

* il fattore di carico è valutato nelle due ore di punta mattinale

Fonte: elaborazione AMAT su dati ATM

Si può osservare come la rete di superficie di Milano, nel suo complesso trasporti oltre 300 milioni di passeggeri/anno, dato di poco inferiore a quello della rete della metropolitana; però, per una corretta lettura del dato, va considerato che una quota consistente dei passeggeri della rete di superficie (stimabile in poco meno del 50%) interscambia nel proprio viaggio con la metropolitana ed è pertanto contata per entrambi i servizi.

Nonostante i sistemi TPL di superficie svolgano ruoli differenti in contesti eterogenei (sia dal punto di vista viabilistico che trasportistico), si può apprezzare come le autolinee siano quelle che risentano maggiormente del divario fra servizio offerto e domanda di trasporto, specie nell'area urbana adiacente Milano. Le filovie circolari, così come alcune linee tranviarie diametrali costituiscono le vere linee di forza del servizio TPL di superficie, trasportando decine di milioni di passeggeri all'anno.

Questi numeri sembrano giustificare gli investimenti sostenuti per rendere i sistemi di superficie ancora più competitivi ed efficienti, in particolare attraverso un ulteriore miglioramento della protezione del tracciato e un preferenziamento semaforico forte.

3.3.1 Focus sulla rete tranviaria

Con particolare riferimento alla rete tranviaria, l'analisi dei carichi si è servita delle rilevazioni eseguite periodicamente da ATM nelle sezioni di massimo carico delle singole linee, utilizzate anche per tarare i modelli di simulazione applicati poi per ricostruire l'andamento del carico sull'intero percorso di linea nell'intervallo considerato.

Per quanto riguarda i rilievi eseguiti sulle linee tranviarie, di seguito si riporta il conteggio dei passeggeri (eseguito nel periodo pre-Covid) nelle sezioni di massimo carico relativamente alla fascia di punta bioraria mattinata di un giorno medio feriale invernale, considerata di norma per analizzare le condizioni di massimo impegno del servizio TPL, evidenziando anzitutto il range significativo che richiama alla forte gerarchizzazione della rete e dunque alla definizione di linee primarie di forza, integrate da linee complementari.

Peraltro, l'analisi dei flussi della punta bioraria, dimostra che gran parte delle linee tranviarie radiali e diametrali risente di un evidente squilibrio di carico sulle due direzioni di marcia (periferia-centro-periferia), soprattutto nelle fasce orarie prevalentemente interessate da spostamenti sistematici.

Ciò costituisce un fattore di indubbia criticità rispetto al dimensionamento del servizio, che dovendo impostarsi per garantire la capacità di trasporto necessaria per smaltire i picchi di carico, ne determina un rilevante sovradimensionamento sulle tratte più scariche, il cui carico è stato stimato mediante l'uso di modelli di simulazione.

Infatti, attraverso le simulazioni modellistiche, è stato possibile determinare i carichi sull'intera rete di superficie, consentendo di completare le informazioni dei tratti non interessati dai picchi di carico rilevati sul campo, utilizzandoli successivamente per calibrare i modelli di simulazione ed avere quindi una fotografia completa dei flussi di domanda sull'intera rete.

LINEA	FERMATA DI MAX CARICO	DIREZIONE	CARICO DI PUNTA BIORARIA	INTERVALLO
1 Roserio - Greco	Caiazzo	Roserio	600	7:20 - 9:20
2 Negrelli - Bausan	P.ta Genova M2	Bausan	1.100	7:40 - 9:40
3 Gratosoglio - Cantù	Abbiategrasso M2	Duomo M1 M3	1.700	7:20 - 9:20
4 Parco Nord - Cairoli	Maciachini M3	Cairoli m1	2.400	7:20 - 9:20
5 Ospedale M. - Ortica	8 Novembre	Osp. Maggior	1.000	7:00 - 9:00
7 Precotto - Lagosta	Bicocca M5	Lagosta	400	7:20 - 9:20
9 P.ta genova - Centrale	P.ta Venezia M1	P.ta Genova FS M2	1.700	7:40 - 9:40
10 XXIV Maggio - Lunigiana	Acquileja	XXIV Maggio	500	8:20 - 10:20
12 Molise - Roserio	Cenisio M5	Molise	1.300	7:30 - 9:30
14 Lorenteggio - Cim. Maggiore	Solari/Zugna	Cim. Maggiore	2.500	7:40 - 9:40
15 Rozzano - Duomo	Abbiategrasso M2	Duomo	3.100	7:00 - 9:00
16 M.te Velino - Axum	Monte Nero/Bergamo	S. Siro Stadio M5	1.300	7:30 - 9:30
19 Lambrate - P. Castelli	V Giornate	Castelli	700	7:50 - 9:50
24 Vigentino - Fontana	Isonzo	Fontana	2.800	7:30 - 9:30
27 Ungheria - Fontana	S. M. Suffragio	Fontana	1.600	7:40 - 9:40
31 Cinisello - Bicocca (lagosta)	Parco Nord Istituti	Bicocca M5	1.100	7:00 - 9:00
33 Rim. Lambrate - Lagosta	8 Novembre	lagosta	700	7:30 - 9:30

Tab. 3.6 Massimo carico per linea nella fascia bioraria di punta

Fonte: elaborazione ATM

Per completare il quadro rappresentativo dei flussi di traffico gravanti sulla rete di TPL, in particolare quella tranviaria, vengono di seguito riprodotti i flussogrammi ottenuti appunto dalla simulazione modellistica, che evidenziano il modo in cui i carichi stimati si redistribuiscono sulle predette linee.

Da questi si evince come la spiccata struttura radiale della rete porti al progressivo ispessimento dei flussi provenienti dai vari settori periferici convergenti verso il centro città e quindi alla contestuale pressione del traffico sulle direttrici di forza.

Questo fenomeno rimanda alle strategie di revisione e potenziamento di alcuni assi prioritari, soprattutto quelli di attraversamento dell'area centrale per risolvere le attuali criticità di servizio, connesse anche alla struttura del parco rotabile, specialmente in ottica prospettica legata al previsto incremento della domanda di mobilità.

La seguente restituzione grafica rappresenta a tutti gli effetti l'elemento cardine sul quale si è strutturata la parte progettuale e sperimentale del mio Studio e dalla quale ho preso spunto per svariate considerazioni che seguiranno.

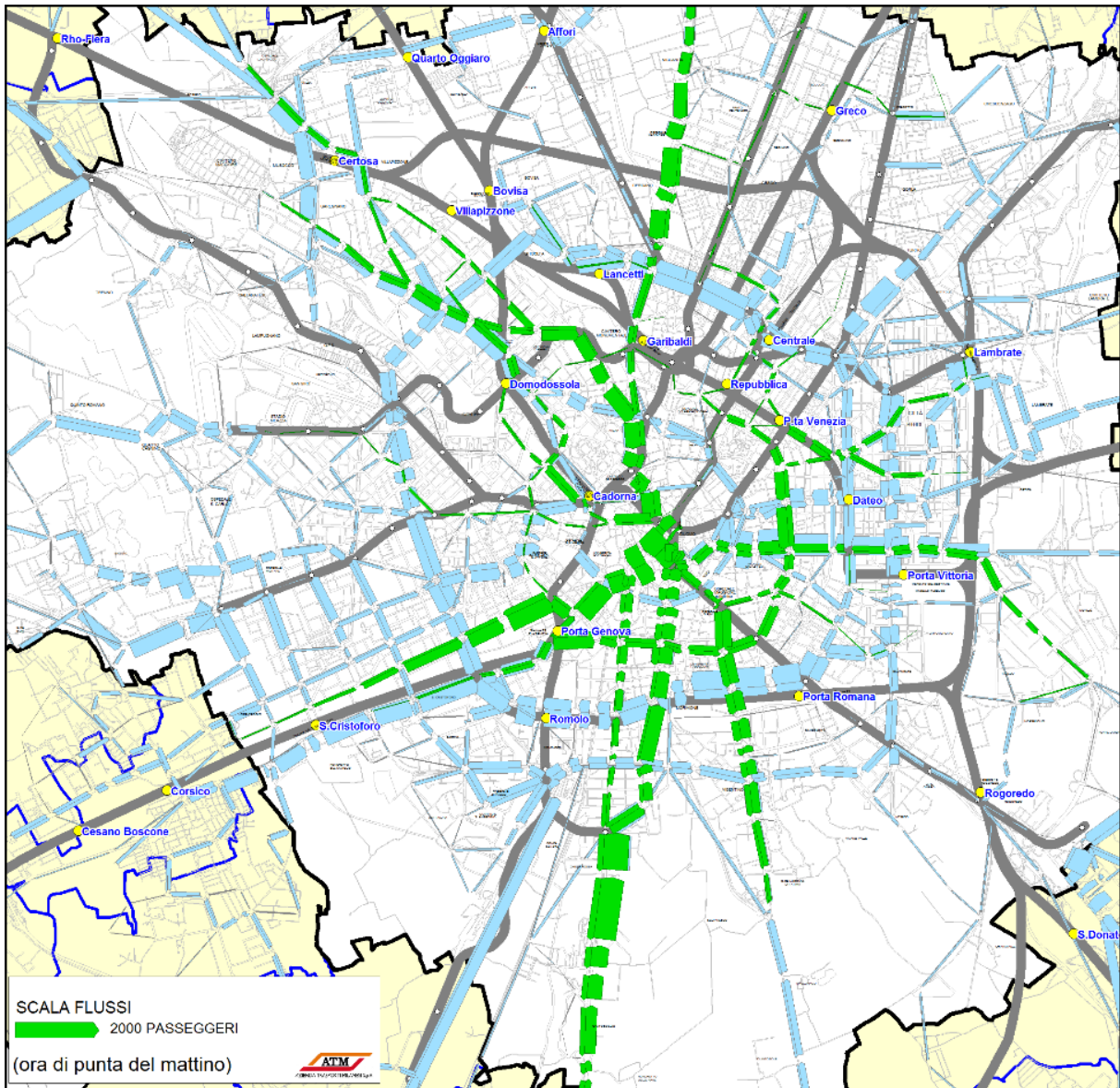


Fig. 3.7 Flussogramma attuale sulla rete tranviaria – punta oraria mattino

Fonte: elaborazione ATM

In particolare, dal flussogramma soprastante emerge chiaramente la presenza di corridoi a fortissima domanda di trasporto, fra i quali si annovera quello che segue la direttrice Nord-Sud lungo l'asse che congiunge idealmente Paderno D.no a Rozzano, a riprova di una grandissima potenzialità del sistema tranviario.

Con riferimento a questo corridoio, attualmente, non si prevedono alternative progettuali tese alla velocizzazione del servizio offerto, soprattutto alla luce delle ultime indiscrezioni progettuali sul possibile tracciato della futura linea M6.

3.3.2 Esempi di linee tranviarie

Gli sbilanciamenti di carico sulle linee, evidenziati anche dalle simulazioni modellistiche, e i conseguenti fattori di criticità in termini gestionali, possono di fatto beneficiare dall'impiego di vetture bidirezionali che rende indubbiamente più flessibile la gestione dell'esercizio, data la possibilità di prevedere l'inserimento di capilinea a tronchino intermedio che consentirebbe una segmentazione della linea.

Ciò favorisce un dimensionamento più adeguato del servizio sulla base dei carichi effettivi presenti su ciascuna porzione di tratta, ottimizzando l'occupazione della capacità offerta erogata (espressa in termini di posti offerti per chilometro) e quindi delle risorse tecnico-economiche impiegate.

A tal proposito, per comprendere quali siano i limiti che attualmente interessano parte della rete tranviaria milanese, pur distinguendo le linee per funzionalità, gerarchia e sviluppo, propongo adesso una breve disamina di qualche esempio emblematico; essi saranno poi oggetto del presente Studio poiché si prevede vengano direttamente interessati da interventi di adeguamento.

Si precisa che nei diagrammi riportati di seguito, ottenuti dalle simulazioni modellistiche implementate sulla matrice OD aggiornata al 2017 (periodo Pre-Covid), i nominativi dei nodi riportati sull'asse spaziale non coincidono con tutte le fermate lungolinea, poiché correlati alla zonizzazione impiegata nel processo di simulazione.

Infatti, com'è noto, non è possibile implementare una zonizzazione troppo fitta, che se da un lato consente di minimizzare gli spostamenti intrazonali altrimenti esclusi dal processo di assegnazione, dall'altro necessita di un ingente onere computazionale non sempre giustificato dalle finalità dello studio.

È significativo esaminare il diagramma di carico di tre linee diametrali, la 2 (Bausan – Negrelli), la 12 (Rosario – Molise) e la 14 (Cimitero Maggiore – Molinetto di Lorenteggio) ed i rispettivi tracciati individuati sulla cartografia di Fig. 3.8.

Si tratta di linee che collegano il quadrante settentrionale con quello centro-meridionale della Città di Milano passando per la zona centrale ed attraversando Piazza Cordusio superando i 10 km di estensione.

Presentano però differenze sostanziali in termini di servizio erogato, dato che le linee 12 e 14 rientrano fra le linee di forza ed sono esercite rispettivamente con 4900 e Sirietti ad elevata frequenza in punta, mentre la 2 si può classificare come linea a medio carico, è percorsa da vetture meno capaci e performanti, con frequenza ridotta in punta.

Si precisa che in questo caso non si tratta di linee scelte casualmente, in quanto esse verranno approfondite nel capitolo progettuale, poiché in virtù della loro localizzazione, saranno interessate da interventi di adeguamento infrastrutturale finalizzati all'incremento della flessibilità d'esercizio, in funzione dell'introduzione dei nuovi mezzi bidirezionali.

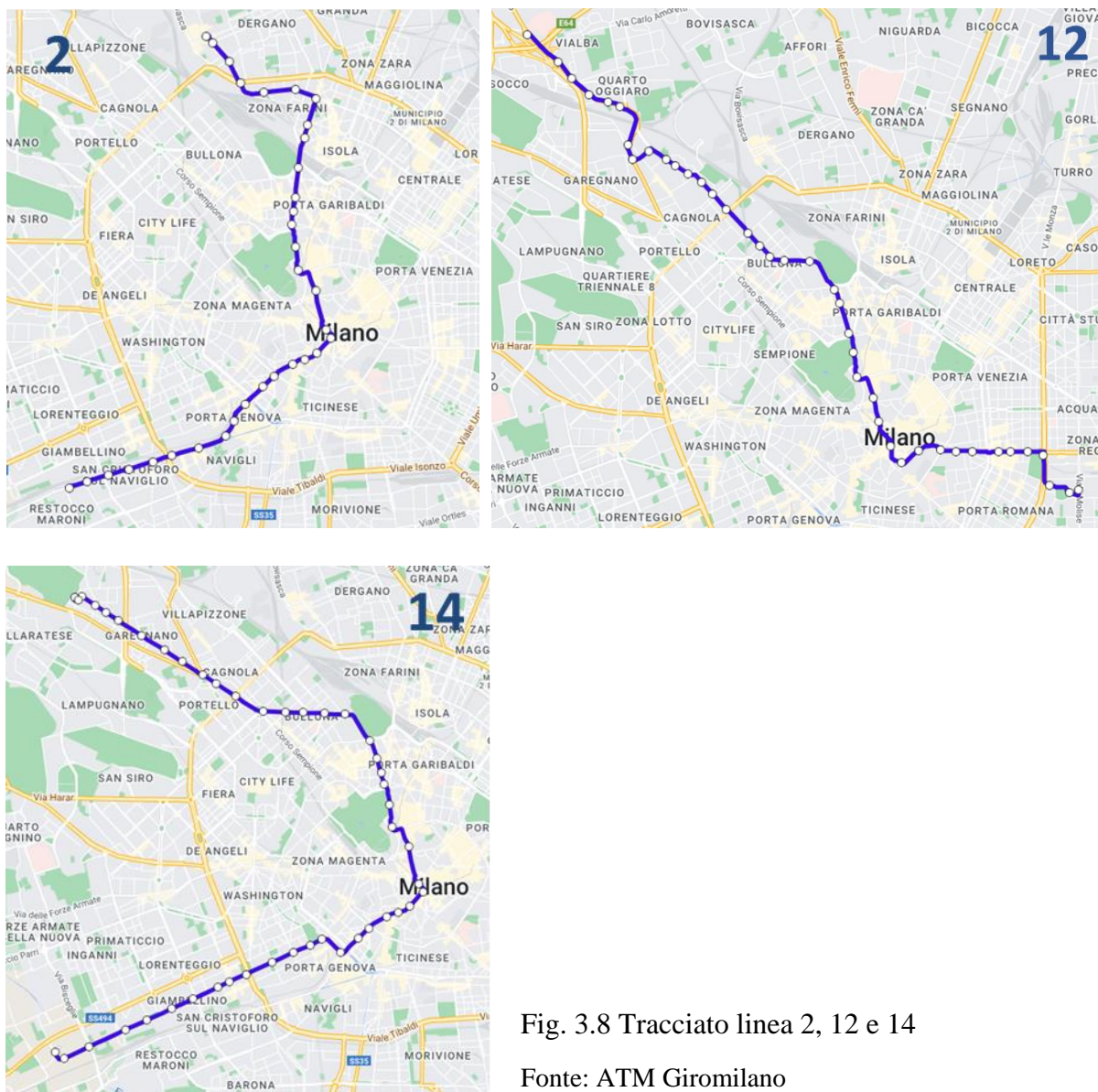


Fig. 3.8 Tracciato linea 2, 12 e 14

Fonte: ATM Giromilano

A tal proposito, per meglio comprendere le linee attenzionate, è opportuno studiarne fin da subito la distribuzione di carico lungo il percorso e precisare la tipologia di servizio erogato.

La distinzione gerarchica dovrà essere certamente rivista nello scenario di attivazione della linea M4 che rappresenterà la linea di forza di riferimento sulla relazione est-ovest dell'area urbana di Milano e sicuramente inciderà sulla distribuzione di carico delle linee qui esaminate, anche in conseguenza delle ristrutturazioni di rete per ridurre le sovrapposizioni di servizio.

Infatti, se da un lato è prevedibile una flessione dei livelli di occupazione su tali linee a causa della concorrenza offerta dalla nuova linea metropolitana, a cui corrispondere una rimodulazione dell'offerta di servizio, dall'altro si ipotizzano eventuali potenziamenti proprio sulla rete tranviaria a seguito di riduzioni dell'offerta su quella automobilistica.

In ordine, analizzo le linee 2, 12 e 14.

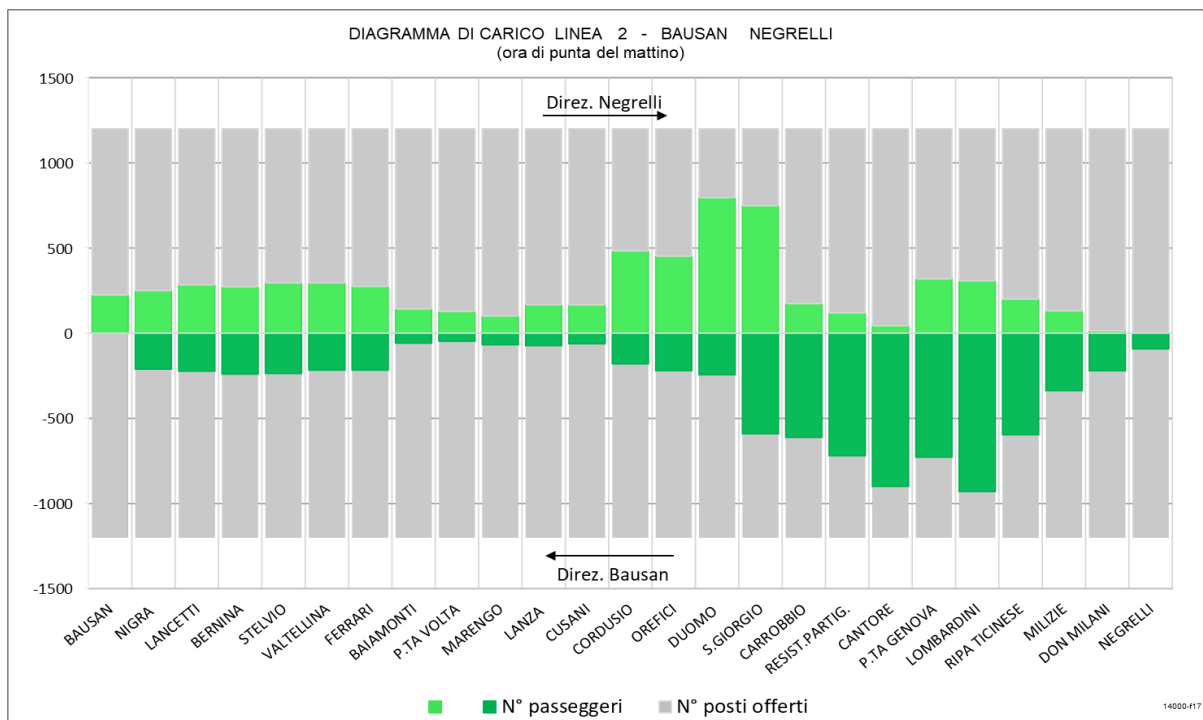


Fig. 3.9 Diagramma di carico linea 2 Bausan – Negrelli

Fonte: elaborazione ATM

Direzione Negrelli (mattina):

Analizzando il diagramma della linea 2, si può apprezzare lo sbilanciamento di carico tra le tratte periferiche e l'attraversamento del centro storico tra Cordusio e via Torino, identificando un'offerta di capacità determinata su relazioni di breve sviluppo e quindi richiamando l'attenzione sull'esigenza di introdurre livelli di flessibilità nell'esercizio della linea.

Direzione Bausan (mattina):

In senso opposto il profilo di carico si presenta più regolare quanto meno nella tratta sud-centro con un riempimento crescente fino all'incrocio con M2 a P.ta Genova, per poi assestarsi su un valore pressoché costante fino a Duomo dove si verifica una ulteriore rottura di carico; superata l'area centrale l'esigenza di trasporto si riduce su valori inferiori.

Anche in questo caso sarebbe auspicabile implementare un servizio di rinforzo nel ramo Sud della tratta, che però allo stato attuale, in assenza di anello di inversione, non è possibile realizzare, ragion per cui in tal caso l'impiego di mezzi bidirezionali ed annessa segmentazione dei tracciati, potrebbe risultare particolarmente efficace.

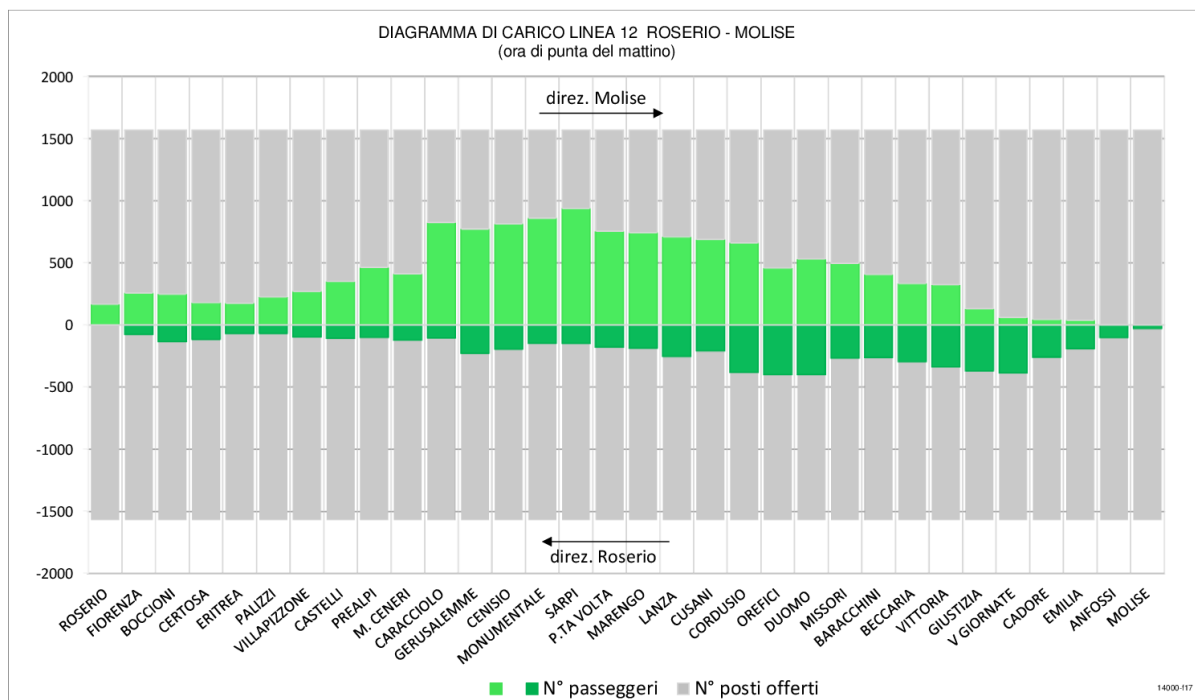


Fig. 3.10 Diagramma di carico linea 12 Roserio – Molise

Fonte: elaborazione ATM

Direzione Molise (mattina):

Il diagramma della linea a sviluppo diametrale mostra un riempimento regolare e progressivamente crescente dalla periferia verso il centro con un primo balzo significativo in corrispondenza della fermata di Caracciolo, oltre la quale si assesta su valori pressoché costanti; segue uno scarico in corrispondenza della fermata centrale di Via Orefici, per poi ridursi sensibilmente superata Porta Vittoria.

Dall'istogramma posso quindi dedurre che tale linea sia prevalentemente utilizzata dagli utenti diretti alle fermate centrali ed apportati da altri sistemi di trasporto, piuttosto che a quelle esterne alla Cerchia dei Navigli.

Direzione Roserio (mattina):

In direzione contro-carico la situazione è più statica e su livelli di occupazione più modesti, senza particolari rotture di carico, con grado di riempimento che si mantiene generalmente maggiore nel ramo Sud rispetto a quello settentrionale.

Anche in questo caso lo sbilanciamento di carico tra le due direzioni oltre alle differenze per singole tratte funzionali richiama l'attenzione sull'opportunità di adeguare l'infrastruttura all'inserimento di vetture bidirezionali che permetterebbe l'erogazione di un servizio modulato e quindi potenziato sulla tratta più carica.

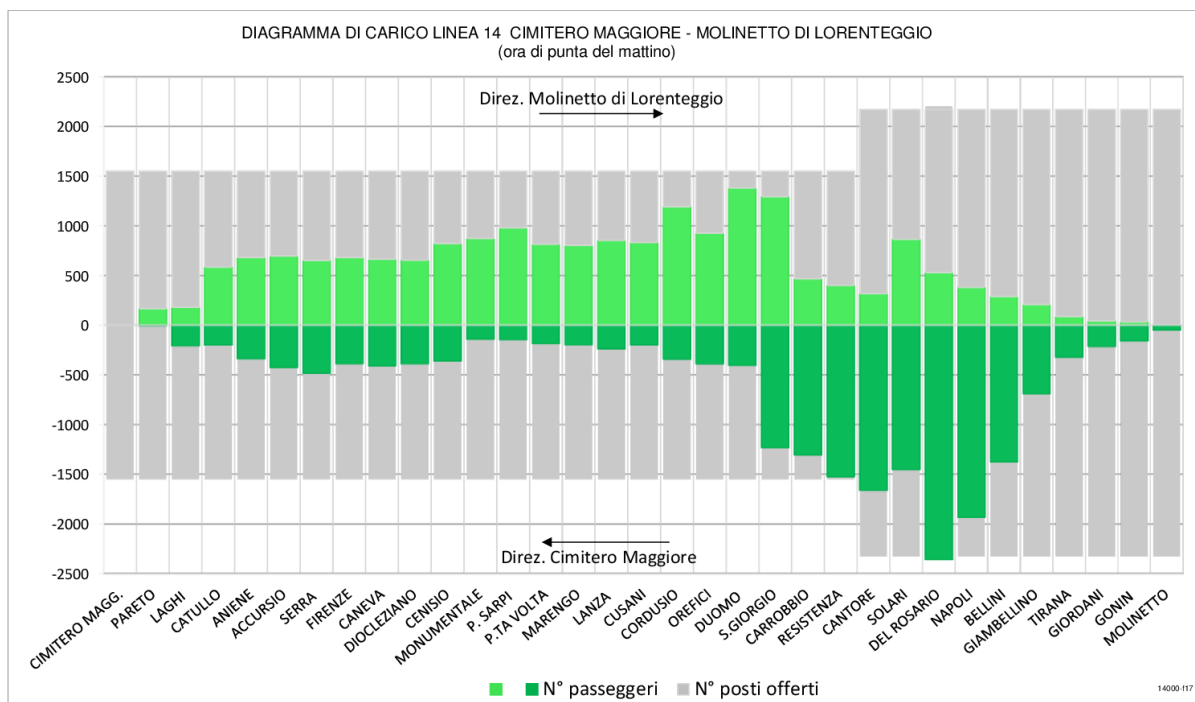


Fig. 3.11 Diagramma di carico linea 14 Cimitero Maggiore – Molinetto di Lorenteggio

Fonte: elaborazione ATM

Direzione Molinetto di Lorenteggio (mattina):

Il diagramma di questa linea diametrale rivela un grado di riempimento che si assesta su valori pressoché costanti fino alla penetrazione in centro città dove gradualmente si verificano le flessioni di carico legate al traffico in destinazione o ceduto all’interscambio con gli altri sistemi di forza della rete; sulla tratta residua segue un evidente rottura di carico presso Carrobbio e, infine, un ultimo picco nella fermata di Solari, nei pressi della fermata M2 di S. Agostino.

Direzione Cimitero Maggiore (mattina):

Controverso, il tasso di occupazione è nettamente più elevato e progressivamente crescente, con un balzo significativo in corrispondenza della fermata di interscambio con la filovia 90 (circolare destra) presso P.zza Napoli, ove il carico rasenta livelli di saturazione; segue uno scarico parziale, propedeutico al riempimento costante delle fermate successive. Ben più marcato è lo scarico una volta raggiunta l’area centrale, in corrispondenza di via Torino/Duomo, oltre al quale non si assiste ad un ingente ricarico nel ramo ascendente.

Il servizio offerto, per corrispondere efficacemente ai livelli di domanda può contare su corse di rinforzo nel ramo meridionale maggiormente carico, grazie all’anello di inversione a Porta Genova FS; nonostante ciò il numero di passeggeri rimane ingente nelle fermate site nell’area centrale, pertanto un’eventuale segmentazione della linea nei pressi della fermata di Cordusio/Orefici garantirebbe maggiore flessibilità al servizio offerto e rappresenta una valida strategia in tal caso.

3.4 Fermate accessibili e non, analisi e rappresentazione

Con il termine di accessibilità, intendiamo le condizioni che determinano la fruibilità del servizio di trasporto rispetto ai contesti territoriali e quindi considerando aspetti di capillarità, di superamento delle barriere fisiche, ecc.; riferendosi all'accessibilità fisica, che investe l'insieme delle categorie di utenti con difficoltà motorie e/o visive, la stessa deve tenere in considerazione i seguenti fattori chiave:

- presenza di veicoli privi di barriere fisiche all'accesso e/o attrezzati per il trasporto di passeggeri disabili: attualmente, nell'ambito della flotta tranviaria il 48,2% delle vetture in circolazione è dotato di pedana ad azionamento elettrico;
- accessibilità delle fermate (struttura delle banchine e percorsi LOGES) e corretto accoppiamento fermate-mezzi;
- presenza di informazioni affidabili e aggiornate in tempo reale sui livelli di accessibilità delle fermate e delle stazioni.

Attualmente la situazione relativa alle fermate, in particolare quelli della rete tranviaria, sconta la presenza di evidenti limiti infrastrutturali che, unita al materiale rotabile impiegato (spesso tecnologicamente obsoleto), impone una doverosa riqualificazione e adeguamento delle condizioni di accesso al servizio.

In proposito, la programmazione di interventi infrastrutturali sulle fermate, necessari per garantire una piena e reale accessibilità ai servizi TPL, allo stato corrente non può prescindere dallo svolgimento di specifiche attività, basate anzitutto sulla ricognizione dei contesti d'intervento in accordo con gli enti gestori dello spazio pubblico, secondo un cronoprogramma condiviso che definisca le priorità e la copertura economica degli stessi.

Tutto ciò è ostacolato dal fatto che vi sono linee esercite con parco rotabile eterogeneo, quindi con vetture solo in parte a pianale ribassato, altre linee utilizzano invece solo vetture senza pianale ribassato; da segnalare inoltre la presenza di linee che impiegano veicoli che hanno subito/subiranno un intervento di *revamping* per adeguarli anche in termini di accessibilità nonostante la propria vetustà.

Quindi, a priori è possibile decretare se una linea sia o meno accessibile in base al parco rotabile in circolazione, basti considerare le linee tuttora esercite con vetture Carrello (la linea 1, 10 e 33 integralmente e 19 parzialmente), che essendo a pianale rialzato presentano sicuramente problemi di accessibilità.

In considerazione proprio della varietà dei mezzi tranviari, a Milano si è scelto di uniformare l'altezza del marciapiede, la cui quota di calpestio è ora pari a circa 22cm (come indicato nella Carta della Mobilità 2021 di ATM), consentendo così l'accesso a tutti i tipi di veicoli provvisti di pedana ribaltabile, anche quelli *revampizzati* della serie 4600/4700/4900, qualora debbano essere impiegati su linee che non li prevedono.

Questa decisione da un lato consente una notevole flessibilità dell’esercizio, ma al contempo non permette di sfruttare l’incarozzamento allo stesso livello nel caso in cui vengano impiegate le nuove vetture a pianale ribassato (alla quota di 30-35cm), imponendo anche in questa circostanza l’utilizzo della pedana estraibile per l’accesso.

Si tratta di lavori che hanno interessato fin da subito alcune linee tranviarie di forza e/o con funzione di corridoi veloci (4, 7, 9, 12, 14, 15, 24, 27 e 41), secondo quanto incluso nel progetto Linee T promosso dal Comune di Milano (come si evince dalla figura successiva, ove l’accessibilità di intere porzioni di rete è stata già ripristinata): sono linee ritenute prioritarie per un *upgrading* del servizio, che viaggiano su ampi tratti protetti e in corsia preferenziale.

Anche qualora la tipologia di vettura impiegata sia ergonomica e di nuova concezione, ossia priva di barriere architettoniche, è però necessario valutare anche l’idoneità infrastrutturale, specialmente in corrispondenza dei punti singolari quali le fermate ed i capilinea. In tal senso, per completare e chiarire la questione, è cartografato lo stato di accessibilità attuale della rete filo-tranviaria di Milano, in cui mi sono limitato a distinguere le fermate accessibili da quelle che non lo sono (sia per ragioni infrastrutturali che veicolari), senza però puntualizzare la motivazione e senza chiarire se siano adeguabili o meno.

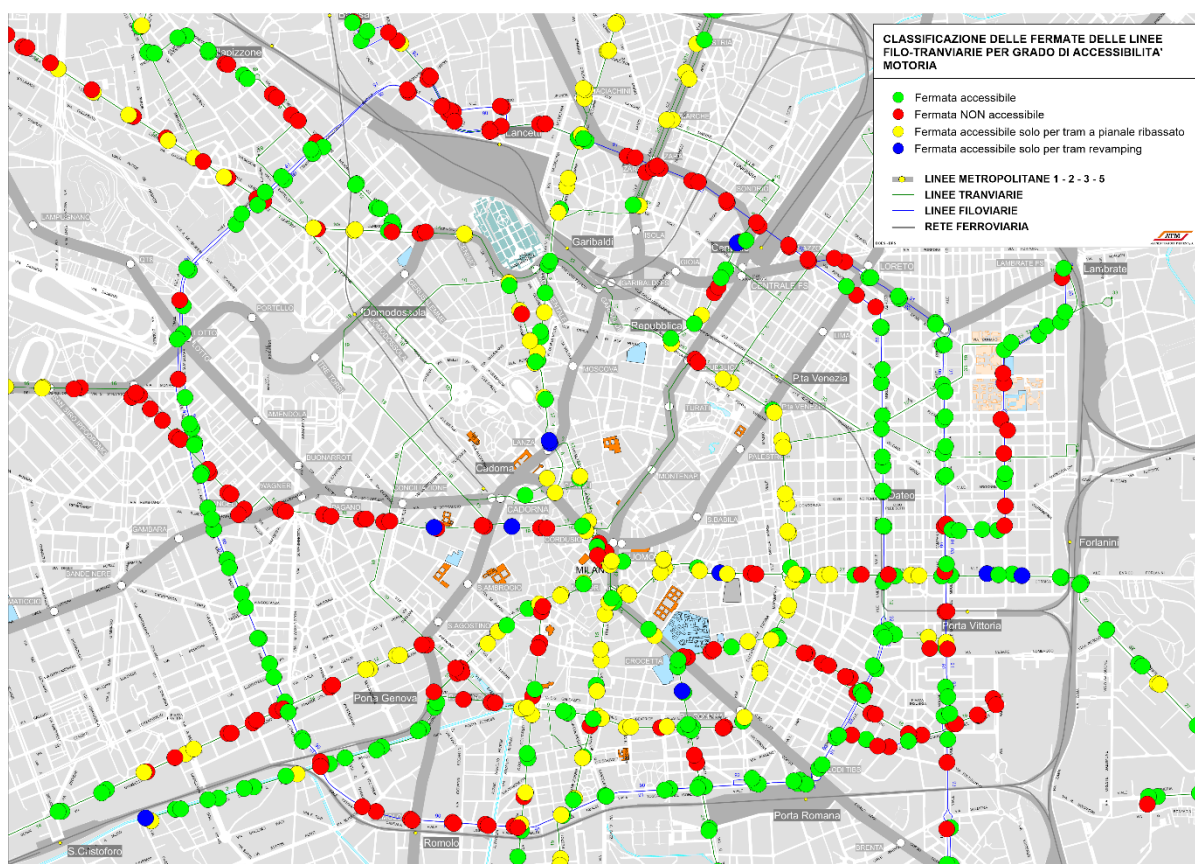


Fig. 3.12 Accessibilità della rete tranviaria milanese

Fonte: elaborazione ATM

4 – Piani di sviluppo della rete e della flotta

In primo luogo preme riassumere alcuni concetti chiave già presentati in precedenza:

- la rete è esercita ad oggi con tram monodirezionali;
- le future linee con capilinea a tronchino saranno esercibili solo con tram bidirezionali;
- i tram bidirezionali potrebbero temporaneamente essere adoperati anche su linee urbane con capolinea ad anello, come se fossero monodirezionali;
- l'impiego di vetture bidirezionali permette una gestione più flessibile del servizio, consentendo la segmentazione delle tratte di esercizio sulle linee ed un opportuno dimensionamento dell'offerta, modulata in base alla domanda.

Questi capisaldi definiscono l'esigenza/opportunità di promuovere adeguati interventi di riqualificazione e completamento delle reti e dei sistemi di trasporto, funzionali al miglioramento delle relazioni intra/intercomunali/metropolitane, a patto di razionalizzare le scelte localizzative, le infrastrutture di collegamento, le modalità di distribuzione dell'ultimo miglio ed i servizi offerti, che sono parte integrante del sistema logistico.

Tali interventi sono dettagliati nei piani di sviluppo della rete, con particolare riferimento a:

- Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS) del Comune di Milano approvato dal C.C. nella seduta del 12 novembre 2018;
- Programma di Bacino (PdB) approvato dall'Agenzia TPL il 10 gennaio 2019, che attiene all'area di bacino comprendente oltre alla Città Metropolitana di Milano anche le province di Monza – Brianza, Pavia e Lodi;
- al Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS) della Città metropolitana di Milano approvato dal CM nella seduta del 28 aprile 2021.

Il vigente Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS) del Comune di Milano rappresenta sicuramente il primo strumento delegato alla definizione delle strategie e delle linee guida sul futuro della mobilità milanese, costituendo il quadro di riferimento strategico di medio lungo periodo (10 anni). Rispetto al tema precipuo dell'esercizio tranviario urbano, oggetto del presente studio, il PUMS del Comune di Milano precisa la necessità di ridurre contestualmente le sovrapposizioni dei tracciati della stessa rete tranviaria nell'area centrale, coerentemente con i livelli di carico delle linee e le interferenze e migliorando in generale la leggibilità del servizio.

L'elaborazione del PUMS si fonda ovviamente sull'analisi approfondita del contesto di riferimento, sottolineando in particolare la centralità del trasporto pubblico e la mobilità sostenibile e per favorire l'efficacia/efficienza del sistema di mobilità, il Documento si focalizza sul rafforzamento del ruolo strategico degli interscambi.

Il Programma di Bacino riguarda l'insieme dei servizi di trasporto pubblico erogati nel territorio di competenza dell'Agenzia TPL, cui sono attribuite le pertinenze in materia di affidamento e controllo dei servizi stessi.

Le attività di verifica e programmazione dei servizi TPL di bacino sono finalizzate a garantire l'unitarietà del sistema, ottimizzando gli orari e le frequenze, assicurando ed incrementando l'efficacia e l'efficienza dei servizi, sviluppando l'intermodalità e l'integrazione con gli altri sistemi di trasporto collettivo, pur riconoscendo una strutturazione gerarchica dei servizi.

Di fatto, si propone di individuare i punti di forza e di debolezza dell'attuale modello di offerta, in base ai quali viene ridefinito con l'obiettivo di realizzare un sistema di trasporto pubblico integrato, ad elevata accessibilità e competitivo rispetto al mezzo privato.

Con riferimento a questa classificazione, le linee-guida contenute nel PdB indicano anche i livelli di frequenza ottimale nei singoli ambiti territoriali, la cui identificazione deve tener conto dell'esistenza di un ventaglio di contesti estremamente ampio, che va dai fabbisogni minimi delle aree deboli sino ai massimi della rete di forza metropolitana, per i quali sono attualmente in uso i valori di riferimento indicati nella tabella seguente.

Citta di Milano RETE URBANA DI SUPERFICIE			
FREQUENZA DI RIFERIMENTO (ATM)			
	FASCIA ORARIA		
RANGO	punta*	morbida	serale**
RETE DI FORZA	3'-6'	5'-8'	15'
ALTRE LINEE	7'-9'	9'-11'	20'

Tab. 4.1 Frequenze di riferimento per la rete urbana milanese

* 7:00-9:00 e 17:00-20:00; ** dopo le 21:00

Fonte: elaborazione PdB

Infine, il PUMS – Piano Urbano per la Mobilità Sostenibile della Città metropolitana di Milano (CmMi) è uno strumento di pianificazione strategica di medio-lungo periodo che si propone di soddisfare la domanda di mobilità nelle aree urbane e metropolitane.

Il Documento definisce lo schema di assetto futuro della rete del trasporto pubblico rapido di massa, indicando le direttrici di estensione/rafforzamento di tali servizi di forza (prolungamenti delle linee radiali sul capoluogo e nuove linee lungo direttrici tangenziali per il soddisfacimento della mobilità tra i centri/poli di attrazione di rilevanza metropolitana esterni all'area centrale).

Analogamente al PdB, ad ogni intervento il PUMS attribuisce un livello di priorità (bassa/media/elevata), in funzione dello stato di avanzamento progettuale, dell'attuale tipo di coinvolgimento e del grado di consenso/gradimento espresso dagli enti preposti.

4.1 – Interventi in corso

Nel presente paragrafo presento brevemente gli interventi di riqualificazione e potenziamento in atto sull'infrastruttura metro-tranviaria milanese, tra cui si annoverano:

- Prolungamento tranviario linea 7 Anassagora – Q.re Adriano (PRMT*; Vigente PTC**;
PUMS Com. MI***);
- Prolungamento M1 Sesto FS – Monza Bettola (PRMT; Vigente PTC; PUMS Com. MI);
- Realizzazione M4 San Cristoforo – Linate aeroporto (PRMT; Vigente PTCP CMM**;
PUMS Com. MI).

* PRMT: Programma Regionale della Mobilità e dei Trasporti

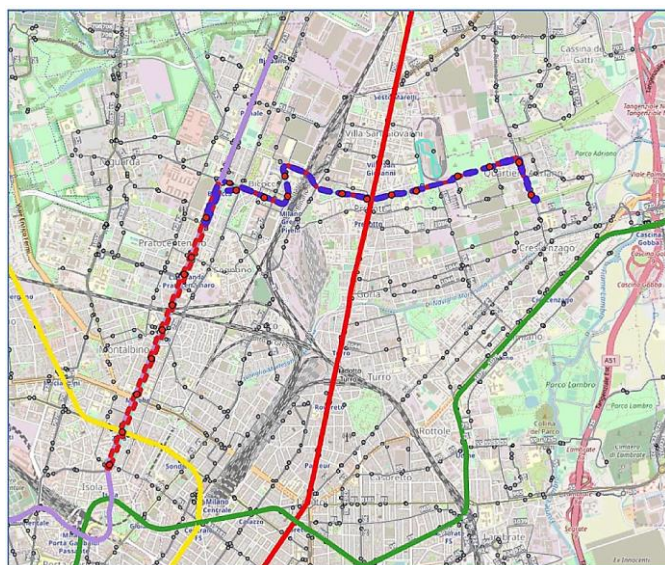
** PTC(P): Piano Territoriale di Coordinamento (Provinciale – Città metropolitana di Milano)

*** PUMS: Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (Comune di Milano/Città metropolitana di Milano)

Si precisa che il prolungamento della linea 7 al q.re Adriano rappresenta il primo tratto funzionale di quella che si definisce la metrotranvia interperiferica nord, indicata dai PUMS, e che prevede infatti l'ulteriore prolungamento della linea a est in direzione Gobba M2 e a ovest in direzione Certosa FS.

4.1.1 Prolungamento tranviario linea 7 Anassagora – Q.re Adriano

Lo scenario di *reference*, che prevede il prolungamento del tracciato sino a via Adriano, attualmente in fase di realizzazione, prevede un programma di esercizio sulla linea allungata



analogo allo stato di fatto, con alternanza di corse sulla tratta più lunga Adriano – Lagosta e corse barrate tra Adriano e Santa Marcellina (rispettivamente in tratteggio rosso e blu nella figura seguente).

Fig. 4.1 Percorso tram 7 – scenario di riferimento

Fonte: elaborazione PUMS Comune di Milano

Per quanto si tratti di scenari previsionali, è evidente che la realizzazione del prolungamento potrà attirare una fetta di utenza attualmente insoddisfatta, specialmente in direzione Vipiteno, viceversa in senso opposto, oggi, la tratta periferica non risente di apprezzabili picchi di carico, che invece interessano le fermate centrali.

Come anticipato, la linea è interessata da ulteriori prolungamenti, tra cui quello verso Gobba M2 (si veda la Fig. 4.2), è già stato valutato a livello di Progetto di Fattibilità Tecnica – Economica (PFTE), con la realizzazione di capilinea tronchi da gestire evidentemente con materiale rotabile bidirezionale.

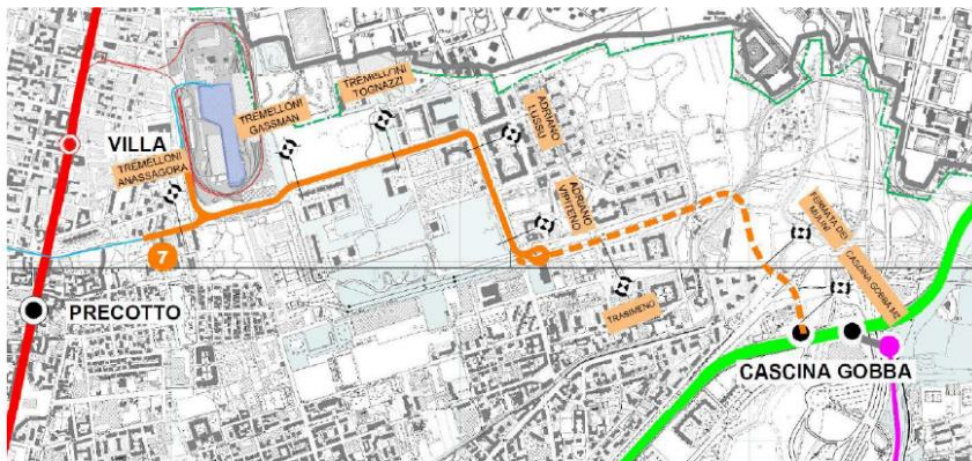


Fig. 4.2 Tracciato definitivo del prolungamento Q.re Adriano – C.na Gobba

Fonte: elaborazione MM S.p.A.

I primi tram bidirezionali da impiegare sulla tratta in costruzione sono già in corso di acquisizione da parte di ATM, mentre dovranno essere acquisiti gli altri finalizzati alla messa in esercizio della linea completa, per un totale di 22 veicoli ad alta capacità.

4.1.2 Prolungamento M1 Sesto FS – Monza Bettola

Il prolungamento della M1 a Monza Bettola prevede un allungamento del tracciato di circa 1800 metri (in galleria) e due nuove stazioni, Sesto Restellone ed il capolinea Monza Bettola, che si trova in corrispondenza dei confini comunali di Monza, Cinisello B. e Sesto S.G. In base allo stato di avanzamento dei lavori attuale, l'apertura dei tornelli delle due nuove stazioni è prevista entro fine 2024.

Il prolungamento di M1 rappresenta solo un primo passo dello sviluppo della rete metropolitana nell' hinterland monzese; infatti, è attualmente allo stadio di Progetto Definitivo l'ipotesi di prolungamento della M5, con il quale si ambisce a collegare la periferia Nord di Monza (con il polo istituzionale ed ospedaliero) a Bignami (Parco Nord), per un totale di oltre 10 km aggiuntivi.

4.1.3 Realizzazione M4 San Cristoforo – Linate aeroporto

La Linea 4, da San Cristoforo a Linate, creerà un collegamento pubblico veloce lungo la direttrice est/sud-ovest passante a Sud del centro storico cittadino; si tratta di una metropolitana leggera ad automazione integrale senza guidatore a bordo con porte automatiche di banchina e sistema di segnalamento CBTC (Communication Based Train Control).

La linea avrà una capacità di trasporto massima di 24.000 passeggeri per ora e per direzione (determinati nel caso limite di densità occupazionale, che al picco è pari a 6 pax/m²) e trasporterà circa 90 milioni di passeggeri/anno, valore stimato in base alla domanda di trasporto prevista; l'entrata in servizio dell'intera linea, ad ora, è prevista entro la fine del 2023.

Sono previsti due interscambi con le esistenti linee metropolitane, uno con la M1, in corrispondenza della stazione San Babila, ed uno con la M2, in corrispondenza della stazione Sant'Ambrogio; ci saranno poi tre interscambi con le linee ferroviarie suburbane e sono inoltre attesi diversi punti di interscambio con alcune linee tranviarie, specialmente con l'anello formato dalle linee 9 e 10, in ultimo prevista una corrispondenza con l'aerostazione di Linate.

Tali interscambi contribuiranno ad aumentare un "effetto di rete" intermodale atteso su tutto il sistema di trasporto urbano ed extra-urbano e, osservando i precedenti diagrammi di carico, ciò sembra sortire un grande effetto attrattivo verso l'utenza.

Dagli interventi in corso di realizzazione si può quindi cogliere una rinnovata tendenza volta al prolungamento delle linee ferrate verso quartieri periferici dell'area urbana, ove sempre maggiore è la concentrazione dei poli di attrazione e generazione della domanda; questo pone degli inevitabili problemi di gestione del servizio, in particolare, dei percorsi urbani di superficie, che risentono del regime di marcia a vista e guida manuale, a differenza delle linee metropolitane di nuova concezione (automatiche e senza guidatore). In tal senso la segmentazione potrebbe essere propedeutica ad una gestione più flessibile del servizio.

4.2 – Interventi finanziati

Oltre agli interventi che hanno già preso il via (discussi nel Par. 4.1), ulteriori progetti sono programmati e già finanziati, quindi all'interno di un iter certo di realizzabilità delle opere, mentre altri ancora sono oggetto di pianificazione e studio preliminare (si veda il Par. 4.3).

In proposito, il finanziamento della cosiddetta "tranvia 7 Bausan-Villapizzone" è da intendersi sicuramente quale ulteriore tassello della futura tranvia interperiferica nord "Gobba M2-Certosa FS", la cui realizzazione potenzierà l'accessibilità al comparto insediativo racchiuso nella cosiddetta "goccia" che include il campus Bovisa del Politecnico.

Di seguito vengono tabellati gli interventi già finanziati e contenuti nel PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza), che rappresenta una delle principali fonti di finanziamento di tali opere, attinenti all'area urbana di Milano per quanto concerne la rete tranviaria:

Ente beneficiario	Denominazione intervento	Sistema	km linea	Finanziamento ammesso PNRR [€]	Ultimazione intervento
Comune di Milano	Metrotranvia interquartiere Nord (tratta funzionale Niguarda – C.na Gobba)	Tranvia	3,00	50.311.472,21	30/06/2026
Comune di Milano	Tramvia 7 Bausan – Villapizzone	Tranvia	1,20	36.000.000,00	30/06/2026

Tab. 4.2 Nuovi interventi finanziati dal PNRR

Fonte: elaborazione PNRR

Con riferimento a tali presupposti è derivata l'ipotesi del nuovo fabbisogno di vetture tranviarie, rapportandolo allo scenario di previsione nel quale è maturato e quindi considerando gli sviluppi della rete analizzati, che richiedono l'impiego di mezzi bidirezionali.

4.3 – Interventi programmati/pianificati

Tra gli interventi programmati, si considerano quelli in avanzata fase di progettazione e in alcuni casi con copertura finanziaria delle opere, mentre quelli pianificati, individuati negli strumenti di settore, risultano ancora in fase di studio circa le alternative progettuali e la sostenibilità delle opere.

Affinché possano essere conseguiti gli obiettivi prestabiliti dai Documenti di Piano (PUMS e PdB), occorrerà incrementare la capillarità distributiva e le connessioni di rete urbana; coerentemente a ciò, lo sviluppo della rete metrotranviaria extraurbana dev'essere sincronizzato alla programmazione di sviluppo e riqualificazione della rete di metropolitane milanesi.

4.3.1 Interventi programmati

Con riferimento ai Piani di Sviluppo della rete tranviaria introdotti nei paragrafi precedenti, di seguito specifico le strategie sottese alle misure di potenziamento infrastrutturale richiamate in particolare dal PUMS comunale (Par. 4.1) che riguardano i seguenti elementi chiave:

- limitare la funzione passante Nord-Sud dell'area centrale alle sole linee tranviarie che presentano continuità di itinerario per la domanda servita, ciò al fine di minimizzare i perditempo derivanti dall'eventuale interscambio, indubbiamente questo provvedimento va in contrasto con le strategie di segmentazione anticipate;
- utilizzo di materiale rotabile bidirezionale per le linee attestare o comunque in transito nell'area centrale anche al fine di alleggerire l'impatto di mezzi dalle dimensioni eccessive rispetto ad un ordito viario oggettivamente inadatto a supportarli (es.: via Spadari e via Dogana);

- attrezzaggio di due hub interni (presso Piazza Missori e Largo Cairoli) a garanzia dell'integrazione del servizio di superficie con le linee metropolitane e di attestamento nell'area centrale delle linee tranviarie T e di forza.

Questi ultimi due punti, sui quali verterà una parte cospicua della sezione progettuale della Tesi, definiscono di fatto un ulteriore vincolo all'esigenza di allestire una idonea flotta di tram bidirezionali, legato evidentemente all'impossibilità di realizzare anelli di capolinea nell'area centrale e quindi deviando su soluzioni a tronchino.

In particolare, la localizzazione dell'hub a Missori garantirebbe l'attestamento all'area centrale e l'integrazione con la rete delle metropolitane (M1/M3) per le linee provenienti dal quadrante Sud; la sua riorganizzazione come nodo di interscambio integrato potrebbe oltretutto essere favorito dall'impiego di veicoli tranviari bidirezionali risolvendo l'impegno di Piazza Fontana per la manovra di ritorno dell'attuale linea 24, con un evidente risparmio in termini di percorrenze.

La riorganizzazione del nodo sarebbe inoltre funzionale alla riqualificazione del capolinea di via Dogana (attuale attestamento della linea 15), che verrebbe così arretrato a Missori riconvertendola tenendo conto sia dei vincoli architettonici dell'area, che della sua vocazione turistico/monumentale.

Un ragionamento più complesso e di altra valenza riguarda invece l'hub di Cairoli, le cui potenzialità in termini di maggiore integrazione riguardano le reti di forza della mobilità di area vasta e di quella urbana (servizi ferroviari, linee metropolitane M1-M2, connessioni con il sistema aeroportuale, ecc.) e la stessa rete di forza di superficie a servizio della mobilità urbana, che include le linee T e, in generale, le linee afferenti il quadrante Nord/Nord-Est che impegnano piazza Castello – Largo Cairoli.

In tal senso, lo schema ipotizzato sul sistema via Legnano – Foro Bonaparte – Cairoli – Cadorna – via Vincenzo Monti, è volto a garantire condizioni di massima accessibilità ai servizi e all'area centrale urbana da parte della domanda sulle relazioni Est – Ovest della città.

Per quanto riguarda invece l'estensione e la riqualificazione della rete tranviaria urbana, il PUMS di Milano prevede il prolungamento delle infrastrutture nei seguenti tratti, tra cui spiccano quelli correlabili all'esigenza di potenziamento della flotta e rispetto ai quali si impongono dunque i relativi interventi sul fabbisogno di vetture, secondo le modalità indotte dalle previsioni di carico a regime:

- da Piazza Pompeo Castelli a Villapizzone con un ulteriore prolungamento in sovrappasso (attraverso via degli Ailanti) verso Quarto Oggiaro e Certosa SFR a sostegno dell'urbanizzazione della cosiddetta "goccia" della Bovisa interna ai raccordi ferroviari (Politecnico, ecc.); tale prolungamento è alternativo a quello, simmetrico, ipotizzabile prolungando la linea 2 con un sovrappasso della stazione di Bovisa verso la "goccia";

- da Precotto ad Adriano/Cascina Gobba (e da Fulvio Testi a Ospedale Niguarda – Bovisa), con scavalco ferroviario e ulteriore prolungamento fino a Certosa SFR (rif. Metrotranvia Nord – si rimanda alla Fig. 4.2);
- Collegamento tranviario V.le Fulvio Testi – Niguarda Pronto Soccorso:

A seguito dell'approvazione del PFTE di prolungamento della tranvia interperiferica nord, tratta Testi – P.S Niguarda, potrà essere servito l'importante polo ospedaliero di Niguarda e, al contempo, garantirà un'intersezione con la prevista linea tranviaria interurbana Milano – Seregno, integrandosi così nel sistema tranviario extraurbano.

Gli ultimi interventi citati rientrano, come già anticipato, nel progetto di realizzazione della linea interperiferica Nord, che ha lo scopo di istituire un servizio TPL di qualità a collegamento di quartieri popolosi e scarsamente accessibili situati lungo la direttrice Est-Ovest nel quadrante Nord del territorio comunale.



Fig. 4.3 Tracciato della metrotranvia interquartiere Nord

Fonte: elaborazione PUMS del Comune di Milano

Continuando ad elencare gli interventi programmati previsti dal PUMS di Milano, si ha:

- la realizzazione della metrotranvia da Repetti a Rogoredo FS M3 attraverso il quartiere Santa Giulia in vista delle prossime Olimpiadi Invernali che si terranno a Milano e Cortina nel 2026: è prevista la realizzazione della linea tranviaria che metterà in comunicazione la nuova stazione M4 Repetti con la stazione FS e M3 di Rogoredo (dove fra l'altro transitano i treni dell'alta velocità ferroviaria), a servizio anche della futura Arena che ospiterà alcune discipline sportive.

La tranvia sarà esercitata da vetture bidirezionali, perciò i due capilinea non avranno il tradizionale anello di ritorno che serve ai tram per imboccare la direzione opposta, ma binari in linea con scambi di manovra con minor spazio per invertire la marcia.

Il Documento prevede anche un miglioramento delle infrastrutture tranviarie di connessione tra Milano ed i comuni esterni, al fine di aumentare capacità, velocità e regolarità dei collegamenti esistenti, incrementandone l'attrattività e contribuendo a spostare la quota modale della mobilità di scambio a favore del trasporto pubblico. Di seguito sono riassunti gli interventi programmati volti a collegare Milano ai comuni dell'*hinterland* mediante sistema tranviario:

- prolungamento sull'asse Ripamonti del 24 (Vigentino – Piazza Fontana) fino a Noverasco (frazione settentrionale del Comune di Opera), oltre il polo ospedaliero dell'IEO (Istituto Europeo di Oncologia);
- riqualificazione e prolungamento della metrotranvia Maciachini – Seregno e della tranvia interurbana Milano-Limbiate.

Il PdB, al di là degli sviluppi infrastrutturali presi a riferimento, ipotizza anche un riassetto di rete tranviaria che prevede l'istituzione della nuova linea 8 lungo il ramo Lorenteggio della linea 14, che a sua volta incorpora l'attuale linea 3 coprendo il nuovo percorso diametrale tra il Cimitero Maggiore e Gratosoglio.

In aggiunta, viene proposta una modifica della viabilità tranviaria in corrispondenza di Piazza Cordusio, evitando l'attraversamento della stessa da parte delle linee 2 e 14, prevedendo la realizzazione di capilinea a tronchino nel quadrante Nord e Sud dell'area, favorendo la segmentazione delle predette linee; questa scelta consente l'espansione della zona pedonale in sito e promuove altre forme di mobilità leggera in corrispondenza del centro storico.

Queste strategie operative inducono ad un riassetto della rete TPL portante di superficie (tranviaria e filoviaria), come dimostrano le rielaborazioni grafiche realizzate rispettivamente dall'Agenzia di Bacino e da ATM, incluse nella Tesi in Allegato 1.

4.3.2 Completamento progetto linee T

Al di là delle previsioni di sviluppo della rete di medio-lungo periodo, come già anticipato, l'amministrazione comunale nel frattempo ha promosso e in pratica già completato il progetto definito "Linee T e corridoi veloci" che punta ad un deciso miglioramento delle performance delle linee di forza attraverso l'attuazione di specifici interventi infrastrutturali, che prevedono:

- la protezione dei tratti di linea ancora in promiscuo con il traffico privato, con l'obiettivo di giungere alla protezione del 100% dei percorsi;
- distanza tra le fermate di almeno 300 m (a garanzia di una maggiore velocità commerciale), ottenibile anche mediante una revisione delle fermate attuali;
- il graduale adeguamento delle fermate e del materiale rotabile alle norme vigenti, a vantaggio dell'accessibilità anche della popolazione anziana e/o con ridotte capacità motorie.

Si tratta infatti di linee urbane che soddisfano relazioni non servite dalla rete metropolitana e si sviluppano radialmente rispetto al centro cittadino (come mostrato nella seguente figura) ed i cui valori di carico, seppur elevati, non ne giustificano la trasformazione in sistemi pesanti.

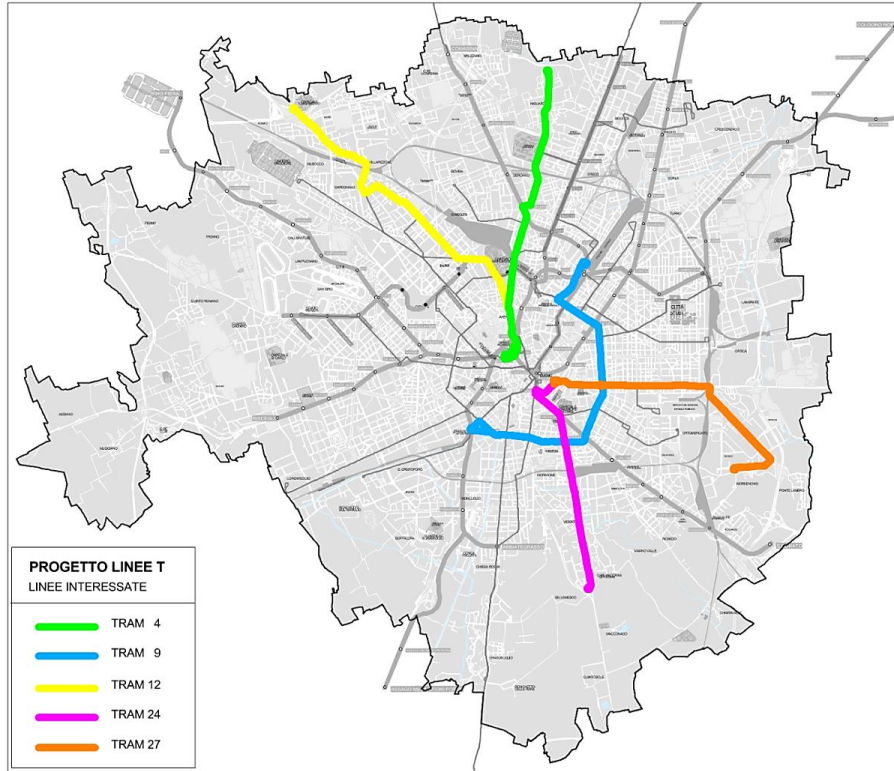


Fig. 4.4 Schema progetto linee T

Fonte: elaborazione ATM

Tralasciando l'elenco dei collegamenti di forza interessati dalla nuova connotazione del servizio, si può affermare che l'obiettivo di incrementare il livello di servizio offerto sui vari collegamenti ha delle effettive ricadute in termini di fabbisogno della flotta, che dovrà essere esaminata sulla base degli interventi effettivamente programmati (Par. 4.3.1 e 4.3.2) e/o in corso di realizzazione (Par. 4.1), escludendo invece quelli che seppur inseriti in documenti previsionali non offrono al momento adeguate garanzie circa la loro attuabilità (Par. 4.3.3).

4.3.3 Interventi pianificati

Lo scenario base del PUMS non prevede la realizzazione di nuove linee metropolitane urbane nei dieci anni che caratterizzano l'orizzonte temporale di piano; nel lungo periodo però, il Piano individua un nuovo possibile tracciato di metropolitana (M6) che definisce la linea progettuale più interessante per il completamento della rete.

Il progetto di metropolitana 6 così definito individua come tracciato più interessante, dal punto di vista dell'effetto di rete prodotto, della distribuzione territoriale della domanda e dei livelli di servizio preesistenti, la connessione radiale Nord-Ovest, Sud-Est, sviluppata secondo possibili itinerari alternativi che hanno in comune il servizio all'asse di corso Sempione – viale Certosa (interscambiando con il passante ferroviario, alla stazione di Certosa, e con la linea 5 della Metropolitana, stazione Domodossola) e sulla connessione Tibadi/Quaranta.

Resta anche da definirsi la questione relativa all'attraversamento del centro che potrebbe essere aggirato utilizzando il settore Ovest della Cerchia dei Bastioni, sebbene quest'ultima opzione sembrerebbe meno giustificabile, data la nettamente minor domanda di trasporto soddisfabile.

Tutte le composizioni delle varianti sono al momento possibili, ma ovviamente richiederanno ulteriori verifiche tecniche, essendo state testate solo dal punto di vista trasportistico, nell'analisi costi benefici.

In aggiunta, fra le metrotranvie pianificate ancora da progettare, già nel Documento comunale del 2001 spiccava la realizzazione del collegamento sotterraneo fra le metrotranvie Nord e Sud (si veda il tratto in fucsia nella rielaborazione grafica seguente), funzionale alla variante di tracciato metropolitano della nuova M6 lungo l'asse verticale, finora rimasto privo di un sistema di forza e soggetto ad un flusso di traffico ingente, come testimoniato dal flussogramma esaminato nel capitolo precedente.

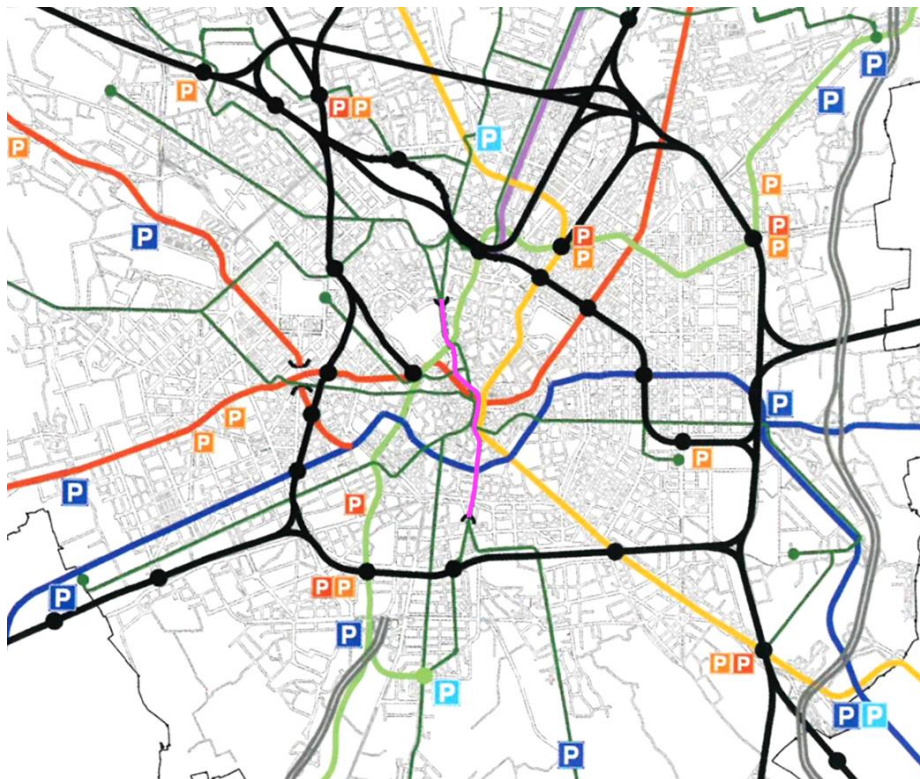


Fig. 4.5 Interventi per la rete metropolitana – PUM del Comune di Milano

Fonte: elaborazione PUM del Comune di Milano

Tale soluzione si pone infatti come l'unica in grado di far fronte all'incompatibilità della rete viaria esistente nel centro storico, che altrimenti non consentirebbe alle linee tranviarie di forza in corso di realizzazione, prestazioni adeguate in termini di velocità commerciale e regolarità. Pertanto, a lungo termine, si può pensare ad una soluzione strutturale in galleria in cui far confluire una o più direttrici tranviarie attraversanti, che garantisca sia il miglioramento delle prestazioni della rete tranviaria, sia una riqualificazione della rete viaria nel centro storico.

A tal proposito, si aprono molteplici questioni legate al possibile tracciato in galleria, poiché negli anni sono emerse due alternative prevalenti:

- la “direttissima Cadorna – Missori” che, seppur meno estesa e costosa, garantirebbe comunque l'interscambio con altre linee metropolitane e ferroviarie (Cadorna FS/ M1 M2, Cordusio M1, Duomo M1 M2 e Missori M3);
- la variante più estesa e “tortuosa”, la quale, seppur finanziariamente meno sostenibile, collegherebbe la stazione di Domodossola FS (duplice interscambio ferroviario e metropolitano con M5) a Tibaldi FS, interscambiando con la rete metropolitana in corrispondenza delle fermate di Cordusio M1, Lanza M2, Duomo M1 M2, Missori M3 e Vetra M4.

Queste alternative trovano la loro genesi nel primo progetto di realizzazione della quarta linea metropolitana, risalente al 1992, di cui si esibisce la rappresentazione grafica (nell'Allegato 2).

4.4 – Piano di sviluppo della flotta

Il rinnovo della flotta è imposto dalla necessità:

- di abbassare l'età media del parco rotabile al di là di confermare la parte di vetture cui viene attribuito un valore storico e simbolico da salvaguardare;
- di sostituire le vetture non più idonee agli *standard* qualitativi del servizio sulle linee di riferimento;
- di immettere vetture bidirezionali per corrispondere agli sviluppi infrastrutturali;
- di contribuire a risolvere la disomogeneità veicolare;
- di garantire la completa accessibilità dei mezzi laddove sono già stati eseguiti interventi di riqualificazione delle fermate.

D'altro canto, la difformità del parco veicolare e la complessità infrastrutturale correlata è motivata dalle diverse politiche di investimento succedutesi nel corso dei decenni, pertanto alle storiche vetture a carrelli degli anni '20 – '30 si sono infatti aggiunte altre tipologie di mezzi con l'obiettivo di realizzare un servizio di grande capacità sugli assi di forza.

A tal proposito, già negli anni '60 – '70 l'impiego di vetture 4600-4700-4800-4900 puntava proprio a massimizzare la capacità di trasporto; tendenza poi consolidata proprio con l'arrivo degli Eurotram e successivamente dei Sirio (in calce all'elaborato, nell'allegato 3, si riportano le immagini dei veicoli citati ed i rispettivi dettagli tecnici).

Questa attitudine si è mantenuta fino all'ultimo decennio, in cui c'è stato un ripensamento soprattutto sul ruolo delle linee tranviarie in attraversamento del centro storico dovuto alle dimensioni dei mezzi; infatti, l'inversione di tendenza si è avuta di recente con la fornitura dei tram Sirietto (si veda sempre l'allegato 3) utilizzati proprio su linee in penetrazione di contesti urbani particolarmente complessi.

Tale situazione genera peraltro numerosi scompensi tra l'offerta di trasporto e i flussi di domanda presenti sui vari assi urbani, dovuti proprio alla complessità del materiale disponibile e in alcuni casi all'impossibilità di mediare la capacità di trasporto offerta dalle diverse tipologie di tram rispetto alle reali esigenze di mobilità (es.: linea 7 esercita con tram Sirio 35 m. su relazione di traffico contenuta).

Per porre rimedio a tali criticità, i programmi aziendali testimoniano l'introduzione di nuovi tram di media capacità, in parte sostitutivi dei mezzi più obsoleti, in aggiunta agli interventi di rinnovo sui mezzi tuttora funzionali all'esercizio, pianificati con l'obiettivo di evitare possibili squilibri in termini di dotazione; oltre a questo, va considerata l'esigenza di rinnovo vincolata alla realizzazione degli sviluppi di rete che prevedono capilinea a binari tronchi anziché ad anello e quindi l'impiego di materiale bidirezionale attualmente non disponibile.

Alla luce di quanto scritto finora, in questo paragrafo mi propongo di individuare il fabbisogno della flotta tranviaria a tendere, nel breve e medio termine (2025 – 2030), in ragione sia delle modifiche già programmate o comunque previste dai piani di sviluppo della rete, sia delle attuali condizioni manutentive del parco e dei piani di investimento già definiti a livello aziendale.

4.4.1 – Programmi di acquisizione in atto

La valutazione del fabbisogno, se da un lato non può evidentemente prescindere dall'assetto di servizio individuato dal PdB, dall'altro deve considerare lo status quo determinato dalle iniziative già in corso a livello industriale di ammodernamento e potenziamento del parco tranviario come ad esempio l'acquisizione di **80 tram bidirezionali**, di cui, come da capitolato, **30** da impiegare sulle linee tranviarie interurbane riqualficate e **50** su linee urbane di cui è previsto o comunque programmato un adeguamento infrastrutturale.

In questa fase si considerano le azioni messe in atto per integrare i piani di rinnovo della flotta connessi sia all'esigenza non più rinviabile di sostituzione del materiale più obsoleto, sia di fabbisogno integrativo del parco richiesto dagli sviluppi di rete definiti successivamente all'accordo quadro per gli 80 nuovi tram bidirezionali.

In accordo agli obiettivi dichiarati nel PdB, la tabella seguente riassume graficamente la redistribuzione delle nuove vetture nei vari contesti d'impiego (urbani od interurbani) ed i contratti attivi per la loro acquisizione:

Q.tà Tram		Destinazione	Finanziamenti	Contratti	
80	10	Interurbani Varedo-Limbrate	Finanziati da Regione Lombardia con fondi europei per 20 mln€, pari a quasi l'80% della spesa	10	Contratto 3000104495 del 25/09/2020 75,5 mln€ + IVA In corso attività di progettazione esecutiva
	50	Urbani	Finanziati dal Ministero dei Trasporti al 60% (DM 360/2018)	20	
				30	Approvazione CDA 19/10/2020 61,2 mln€ + IVA
20	Interurbani Desio-Seregno	In attesa di finanziamento, a carico del Comune di Milano per 18 tram per la linea Milano-Desio-Seregno	Non ancora stipulato		

Tab. 4.3 Destinazione dei nuovi veicoli e contratti stipulati

Fonte: elaborazione Programma di Bacino

4.4.2 – Programmi di potenziamento previsti

Nel 2021 è stata accolta l'istanza di inserire tra gli interventi promossi dal PNRR la fornitura di 14 tram bidirezionali più lunghi connessa al previsto prolungamento della linea tranviaria urbana n° 7 "Precotto-Lagosta" ad est fino a Gobba M2 e ad ovest fino al Pronto Soccorso dell'Ospedale Niguarda (discusse in precedenza), anch'esso finanziato dal PNRR.

Ente beneficiario	Denominazione intervento	Sistema	Finanziamento ammesso PNRR [€]	Ultimazione intervento
Comune di Milano	Fornitura di 14 tram bidirezionali (a servizio della linea 7)	Tramvia	52.360.000,00	30/06/2026

Tab. 4.4 Finanziamenti inclusi nel PNRR

Fonte: elaborazione Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)

Per le consegne si prevede l'arrivo del primo tram ad autunno 2022, altri 2-3 tram entro il 2022, fino ad arrivare a un totale di 17 tram entro il 2023 e ai 30 tram complessivi entro il mese di settembre 2024 (come evince dal cronoprogramma in Allegato 4), compatibilmente con l'opportunità di impiego sulle linee modificate dal punto di vista infrastrutturale.

4.4.3 – Piani aziendali di revisione e sostituzione dei mezzi obsoleti

All'inserimento delle nuove vetture bidirezionali sulla rete urbana è legata la prevista dismissione di una quota delle vetture tradizionali a due casse (serie 4600), a tre casse (serie 4900 non *revampizzate*) e di 20 vetture della serie 4700 di cui è prevista la dismissione solo in attuazione del progetto di fornitura di vetture bidirezionali. Inoltre, si pone la questione dell'impiego dei tram lunghi da 35 m, rispetto alla quale occorre verificare l'opportunità dell'intervento di revisione della flotta di Eurotram (si veda ancora l'allegato 3) per rinnovare la loro vita tecnica.

Partendo infatti dal presupposto relativo alla prevista dotazione di tram bidirezionali e all'obiettivo di ottimizzare l'impiego dei tram da 35 m, nonché degli altri mezzi più moderni o comunque già sottoposti ad interventi di revisione generale e/o *revamping*, sui quali di fatto è impostata la strategia del servizio tranviario del prossimo decennio, lo scopo è quello di individuare le quote di parco e relative tipologie di mezzi rispetto alle quali andrà programmata una progressiva sostituzione.

Queste iniziative sono sinteticamente riassunte nell'allegato 5, ricavato da una recente elaborazione di ATM che ridefinisce lo scenario di valutazione del fabbisogno di mezzi legato ai piani di dismissione e di verifica della capacità di rimessamento nei depositi; tale scenario non considera al momento l'ultima istanza di fornitura per 14 tram bidirezionali (si veda il paragrafo precedente), tuttavia ipotizza a partire dal 2031 l'acquisizione di nuovi tram bidirezionali in sostituzione delle 4900 *Revamping*.

All'interno del prospetto, che per chiarezza eccettua la flotta dei tram Carrelli, esentata dai programmi di dismissione, oltre alle scadenze previste per l'accantonamento dei vecchi tram sono riportate anche quelle per gli interventi di revisione generale (RG) e per le nuove acquisizioni.

A regime si prevede quindi una flotta estremamente rafforzata in termini di mezzi utili all'esercizio, per corrispondere efficacemente agli sviluppi infrastrutturali e proprio per questo si profilano una serie di questioni legate all'efficienza di impiego sulla rete e all'adeguamento degli impianti di manutenzione e ricovero (si veda la figura seguente).

In accordo alla succitata evoluzione del parco veicolare, in Allegato 6 viene indicato il numero di mezzi necessario per gestire la nuova rete tranviaria integrata da tutti gli sviluppi infrastrutturali indicati nello scenario di previsione, riportando anche la dotazione complessiva, comprendente i mezzi di scorta.

Puntualizzo che l'orizzonte temporale di valutazione del fabbisogno è proiettato a titolo approssimativo verso la fine del decennio in corso e l'inizio del prossimo, entro il quale si prevede che vengano realizzati tutti gli interventi di estensione della rete tranviaria presentati in precedenza.

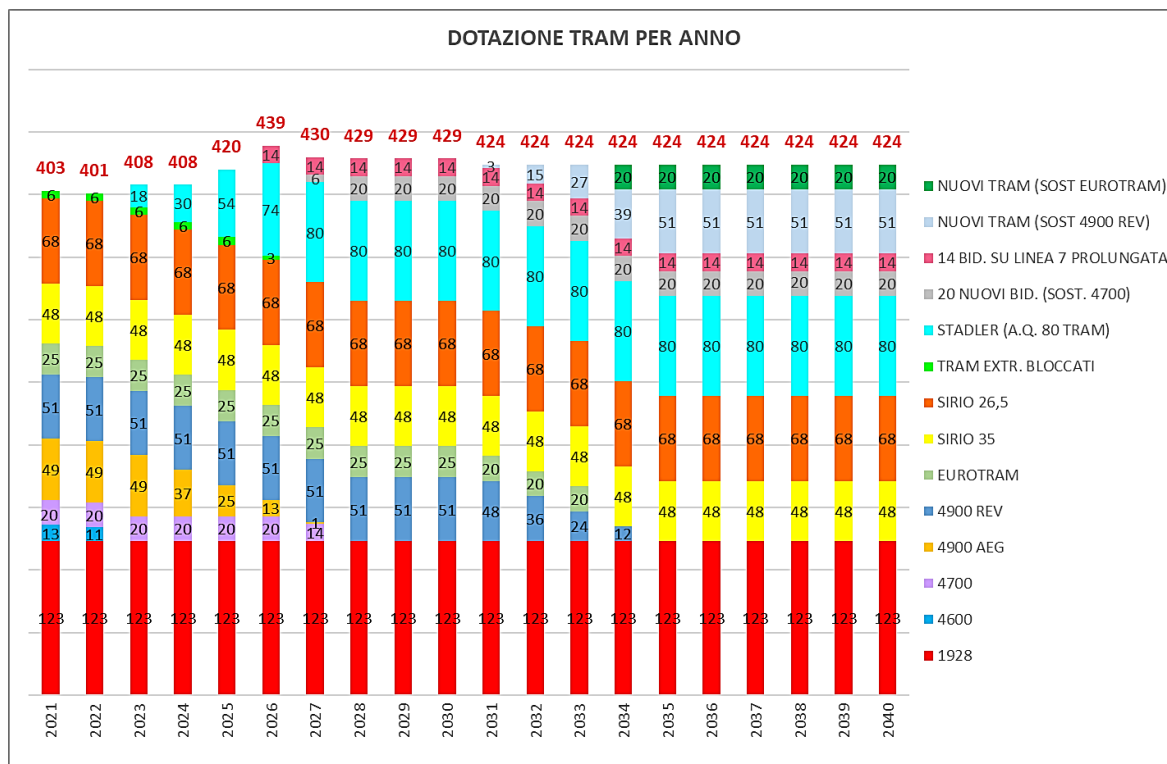


Fig. 4.6 Dotazione tram attesa per anno

Fonte: elaborazione ATM

Infine, ci tengo a precisare che tali indicazioni rappresentano chiaramente un’opzione di riferimento riguardante la formazione della flotta prevista a regime e il conseguente fabbisogno di tram, che certamente non rappresenta un vincolo imprescindibile nell’attribuzione/gestione del parco rotabile.

4.5 – Tram bidirezionali e dotazioni di bordo

Come anticipato più volte, la rete urbana per i nuovi sviluppi previsti negli anni a venire, così come le tranvie interurbane, avranno capilinea a tronchino; da ciò è scaturita la necessità di adottare tram bidirezionali.

A dispetto della nomenclatura attribuita al nuovo tram bidirezionale (Stadler Tramlink, in configurazione 3 casse e 3 carrelli) che a breve sarà integrato nella flotta di ATM, la vettura si ispira integralmente al tram Stadler Tango (di cui si riportano la scheda tecnica ed il *rendering* negli Allegati 6 e 7). La scelta di catalogare il veicolo con il nome Tramlink potrebbe essere motivata da strategie aziendali di *marketing*, poiché le vetture sono prodotte nella sede spagnola di Stadler Rail (sita a Valencia).

Nella progettazione delle vetture, oltre alla bidirezionalità ed all'accesso delle persone a ridotte capacità motorie, particolare attenzione è stata dedicata alla progettazione dei carrelli provvisti di tecnologia pivotante, al fine di evitare criticità importanti quali usure precoci delle rotaie e cerchioni, fenomeni di stridio in curva, nonché sicurezza e *comfort* di marcia.

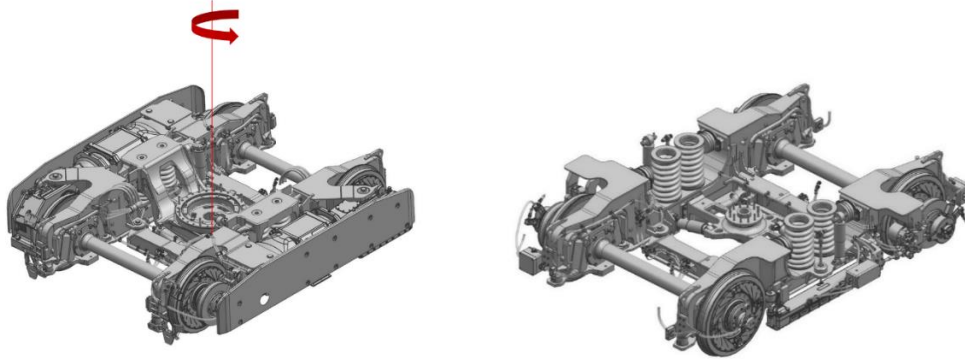


Fig. 4.7 Carrello motore pivotante (a sinistra) e portante non pivotante (a destra) (fonte: stadlerrail.com)

I carrelli sono dotati di un impianto frenante provvisto di azionamenti di frenatura meccanica totalmente indipendenti quanti sono i carrelli, che saranno equipaggiati di pattini elettromagnetici e di motori di trazione trifase autoventilati.

Azionamento e trazione ad inverter e recupero di energia (reimmessa in rete) in fase di frenatura, per conseguire importanti risparmi energetici, mediamente pari al 15% rispetto ad un veicolo tradizionale.

Per quanto concerne la sicurezza attiva e passiva i veicoli sono provvisti di molteplici dispositivi e di una fitta rete di sensori, fra i quali cito i più significativi:

- porte passeggeri con funzione di rilevamento ostacoli, basati sull'accertamento dell'avvenuto assorbimento di corrente del motore;
- impianto Registratore Statico di Eventi (RSE) e di videosorveglianza interconnesso *real time* con il Posto Centrale via *mobile router*;
- apparato per rilevare la presenza e la vigilanza attiva del conducente mediante dispositivo vigilante (detto anche "uomo morto"), tale che il mancato rilievo provocherà il taglio della trazione e la massima frenatura di servizio secondo logica *fail safe*;
- sistemi anticollisione ("*collision detection system*") nei confronti di pedoni, veicoli ed ostacoli incontrati lungo la marcia, mediante l'impiego di telecamere e sensoristica, sovrapponendosi alla frenatura del manovratore in modo graduale;
- presenza di due pedane per l'incarozzamento disabili per ciascun lato, poste una di fronte all'altra, del tram e di sicure postazioni a bordo per le persone a ridotta capacità motoria.

Inoltre, sono previsti nuovi impianti a protezione delle tratte a binario singolo e atti a impedire l'apertura delle porte sul lato sbagliato, mentre per la circolazione gli apparati terra-treno di bordo necessari saranno:

- il *Train Stop*;
- il Riconoscimento Banchina;
- la Radio.

Tali apparati sono parte integrante dei sistemi terra-treno, ma possono differire a seconda della linea e del contesto di impiego.

L'impianto integrato Train Stop si interfaccia con il circuito di sicurezza del veicolo per comandare la frenatura di emergenza.

Mediante l'impianto di Riconoscimento Lato Banchina, al riconoscimento di una banchina sinistra le porte sinistre, normalmente bloccate, vengono sbloccate, e le porte destre, normalmente sbloccate, vengono bloccate (in tal modo si previene l'apertura accidentale di quest'ultime in presenza di banchina sinistra).

È chiaro che i nuovi prolungamenti e le nuove linee urbane dovranno prevedere nuove fermate solo con banchina a destra e capilinea a tronchino con banchine su ambo i lati della vettura.

I tram sono predisposti per l'installazione di un diverso impianto Radio, a seconda del contesto di utilizzo: l'impianto AVM urbano su informazioni ben consolidate in ATM, trattandosi del medesimo impianto già in uso su tutta la flotta di superficie.

In ambito urbano, dal punto di vista della circolabilità ferroviaria, i nuovi tram bidirezionali possono essere impiegati su qualsiasi linea; l'allocazione dei tram alle linee sarà basata su criteri di opportunità: i nuovi tram bidirezionali (da 25,4 m, di cui sotto si mostra il *layout*) saranno infatti compatibili con tutte le linee urbane e la loro versatilità sarà ampiamente sfruttata.



Fig. 4.8 *Layout* tram bidirezionale (fonte: stadlerrail.com)

4.5.1 Contesti di impiego dei tram Stadler con caratteristiche analoghe a quelle previste per la rete milanese

Il mercato europeo e mondiale dei tram urbani è complesso ed articolato: i tram normalmente offerti sul mercato europeo dai costruttori sono generalmente dei prodotti *custom*, cioè adatti alle specifiche esigenze dei clienti/esercenti che spesso sono costretti ad evidenziare vincoli e peculiarità legati alle caratteristiche delle linee urbane esistenti, per lo più vetuste.

Il tram esaminato è un veicolo modulare a guida vincolata con elevate possibilità di personalizzazione: il mezzo può essere raffigurato come il classico tram urbano, oppure può essere impiegato in un contesto interurbano con soluzioni che permettono anche di soddisfare una molteplicità di esigenze di esercizio fino alla velocità massima prossima a 100 km/h.

Il veicolo può essere configurato diversamente a seconda delle esigenze, da 3 casse fino a 6, con pianale rialzato o parzialmente ribassato (fino al 70%). Stadler ammette configurazioni mono e bidirezionali, facilmente inseribili in un contesto urbano ipervincolato, dato che il veicolo presenta un raggio di curvatura minimo pari a 12m.

Per completezza, espongo qui di seguito un paio di contesti in cui viene impiegato il tram Stadler: si tratta di realtà molto differenti fra loro a testimonianza della versatilità del tram esaminato e che ci permettono di trarre qualche spunto per la seguente parte progettuale dell'elaborato.

Aarhus Letbane – Danimarca:

I tram del tipo TANGO forniti da Stadler sono veicoli innovativi a più unità modulari, integralmente a pianale ribassato e sono impiegati per il traffico urbano e suburbano di Aarhus.

Il design generale del veicolo si adatta alle difficili condizioni del percorso urbano ed al traffico cittadino, nonostante il tram sia lungo quasi 40 m, poiché presenta raggio di curvatura pari a 25 m e poco meno di 300 posti; inoltre, raggiunge una velocità massima di 100 km/h.



Fig. 4.9 Stadler Tango impiegato per la rete di trasporto danese di Aarhus (fonte: urbanrail.net)

Appenzello-St. Gallen-Trogen – Svizzera:

Chiudiamo la brevissima rassegna con il caso di San Gallo che è emblematico perché si tratta di una riqualificazione dell’infrastruttura preesistente unita però alla ricerca di una soluzione ingegneristica funzionale a offrire un servizio di trasporto di alta qualità pur attraversando integralmente il centro urbano.

Inoltre, questo esempio vede l’utilizzo del Tramlink Tango, che si integra perfettamente sia nell’ambiente cittadino che in quello della verdeggiante provincia di San Gallo.



Fig. 4.10 Stadler Tango presso la fermata di Marktplatz a San Gallo e lungo il tracciato (fonte: urbanrail.net)

Nella fattispecie, dagli anni '70 sono stati elaborati numerosi progetti di sottoattraversamento del tratto di linea compreso fra tra San Gallo e il sobborgo di Riethüsli con l’obiettivo di eliminare l'ultimo tratto a cremagliera tra San Gallo e Appenzello.

Solo nel 2006 le Ferrovie dell'Appenzello hanno deciso di aumentare i servizi tra San Gallo e Teufen, città limitrofa, a intervalli di 15 minuti e ciò ha inevitabilmente richiesto la riduzione del tempo di viaggio tra San Gallo e il distretto di Riethüsli; tale risultato era però perseguibile solo con la rimozione del tratto a cremagliera e quindi attraverso la realizzazione del passante per Ruckhalde.



Fig. 4.11 Stadler Tango presso la fermata di Riethüsli all’imbocco del tunnel Ruckhalde

Va però sottolineato che questo intervento sarebbe risultato antieconomico se ad esso non fosse seguita la realizzazione di un collegamento fra le due linee in attraversamento del centro città ossia la tratta Appenzell–St. Gallen e la ferrovia diretta a Trogen, sebbene i due rami avessero caratteristiche molto diverse.

Pertanto, il collegamento Appenzello-St. Gallen–Trogen è diventato un progetto strategico delle ferrovie elvetiche: l'opera richiesta è stata suddivisa in cinque sotto-progetti, di cui il tratto stazione di San Gallo–Riethüsli, compreso il proposto tunnel Ruckhalde, lungo circa 700 metri, è stato senza dubbio il più oneroso e complesso da realizzare.

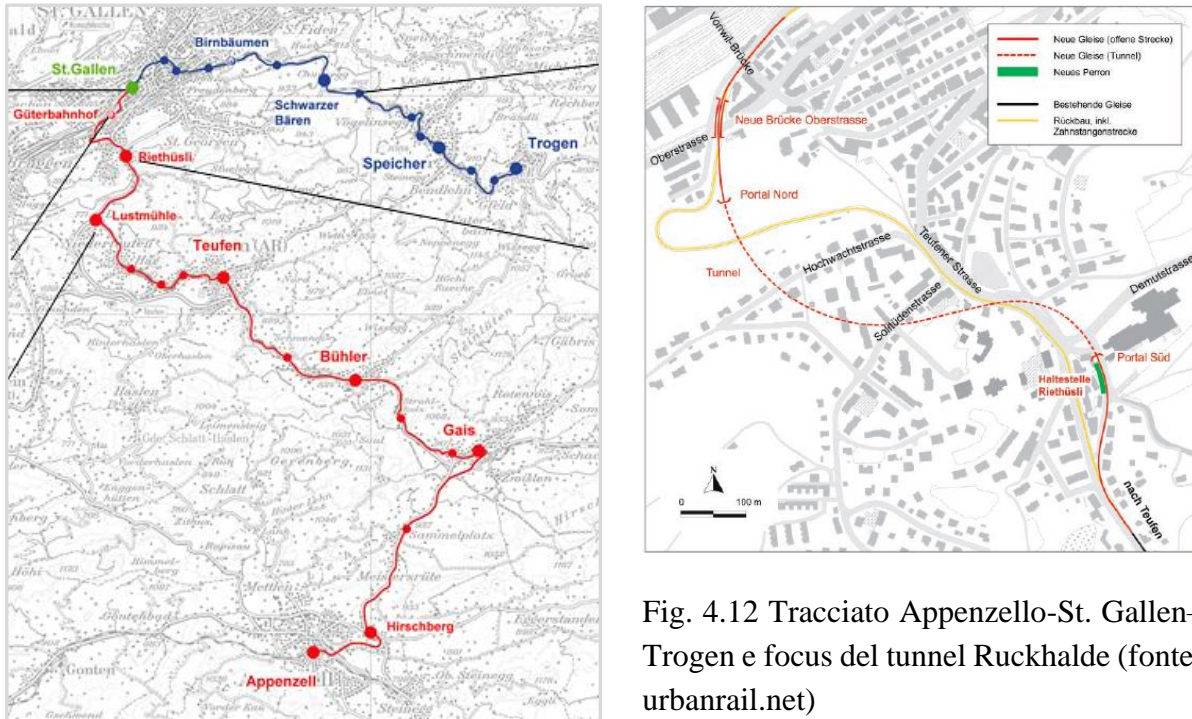


Fig. 4.12 Tracciato Appenzello-St. Gallen–Trogen e focus del tunnel Ruckhalde (fonte: urbanrail.net)

Oggi, la linea che attraversa la città ha apportato notevoli miglioramenti ai passeggeri: in primis un servizio cadenzato ogni 15 minuti tra San Gallo e Teufen e miglioramenti delle coincidenze con i treni Intercity da e per Zurigo.

Inoltre, l'eliminazione della sezione a cremagliera, tecnicamente complessa e costosa da gestire, con il tunnel di Ruckhalde ha permesso di utilizzare i treni a pianale ribassato (Tango) di nuova acquisizione più comodi e silenziosi, ma anche più economici rispetto ai mezzi precedentemente in uso.

Infine, va detto che il percorso del tunnel Ruckhalde ha eliminato la necessità di ben sei passaggi a livello, il che ha notevolmente aumentato la sicurezza del traffico nel sobborgo di Riethüsli.

Queste ed altre conseguenze scaturite dalla realizzazione del sottoattraversamento centrale, unito all'impiego di mezzi bidirezionali, tracciano le linee guida per possibili interventi di miglioramento della rete tranviaria in un contesto urbano.

5 – Adeguamento della rete di trasporto

Alla luce di quanto ho scritto finora, ormai è chiaro che il sistema di trasporto pubblico a impianto fisso e a guida vincolata è in grado di giocare un ruolo molto importante per la riduzione della quota modale privata, in quanto attraverso il potenziamento del sistema più forte si possono migliorare i livelli prestazionali, di accessibilità, di servizio e si possono porre valide basi per la strutturazione e la organizzazione di una rete integrata in area vasta.

In definitiva per i sistemi a guida vincolata si prevede:

- il potenziamento e prolungamento della rete, previa verifica della congruenza tra sviluppo urbanistico-insediativo e infrastrutture di trasporto;
- il miglioramento dei livelli di offerta e, in genere, delle prestazioni dei mezzi;
- una più efficace e razionale organizzazione delle relazioni intermodali e un più efficiente effetto-rete complessivo.

Inoltre, la trattazione di numerosi casi-studio ha certificato che la trasformazione del sistema trasportistico, teso a muovere le persone e non i veicoli, ha assunto sempre più spesso il ruolo di vero motore della riqualificazione urbana.

In tal senso, si annovera il caso della megalopoli di Istanbul che, a seguito della realizzazione delle prime linee tranviarie a servizio delle più rinomate attrazioni storico-artistiche cittadine (quali Aya Sofia, il palazzo Topkapi, la moschea Blu, il quartiere dei bazar, ecc.) avvenuta nei primi anni 2000, ha visto crescere costantemente il flusso turistico, dando così vita alla rinascita ed al ripopolamento di interi quartieri, altrimenti destinati all'abbandono e al degrado.

Siffatte conseguenze sono motivate dal fatto che la linea tranviaria, a differenza della linea ferroviaria preesistente che si sviluppa lungo la costa creando una vera e propria barriera tra il quartiere e il mare, ha sortito l'effetto di collante tra la parte antica e moderna della città turca, dando modo di ripensare ad interi spazi urbani poi riqualificati e ristrutturati (es. mediante la creazione di ampie aree pedonali nel centro storico).

Questo e gli altri esempi citati tracciano una linea guida per la presente sezione progettuale, la quale da essi certamente trae spunto, fermo restando che le specificità del contesto centro-cittadino di Milano richiederanno peculiari valutazioni (sia qualitative che quantitative) nell'implementazione degli scenari evolutivi e dei modelli di simulazione impiegati.

5.1 Modello di assegnazione impiegato

Prima di approfondire l'aspetto correlato alle proposte di rinnovamento della rete tranviaria e, conseguentemente, del servizio di trasporto nell'area centrale di Milano, è stata determinata la quota-parte di utenza interessata dai provvedimenti progettuali.

Si precisa che tale calcolo è stato prodotto a partire dagli *output* del modello di assegnazione, sviluppato appositamente da ATM per affrontare già negli '70-'80 la pianificazione delle reti di trasporto di competenza del Comune di Milano ed utilizzato successivamente anche in attività consulenziali, del quale ora fornirò una breve descrizione.

Tale algoritmo è il risultato di un'attività nel campo dello studio delle reti e della pianificazione dei trasporti che è iniziata negli anni 60' con la costituzione della prima base dati relativa alla mobilità per motivi di lavoro e studio e con l'approntamento di un primo modello di verifica della rete di trasporto pubblico.

Negli anni 70' questa attività ha condotto ad una prima ristrutturazione generale della rete di Milano, fondata sul nuovo concetto di "rete integrata" e alla conseguente adozione della tariffa oraria.

A partire da quella data si è costantemente seguita l'evoluzione della domanda di trasporto e della rete stessa, arricchendo il *software* di pianificazione, che poi negli anni è stato collaudato ed applicato a Milano per il Piano Trasporti del 1979 e in molte altre realtà urbane e miste di ogni dimensione (città di Pavia, Brescia, Genova, Varese, ecc.), come strumento per studiare i problemi concreti delle Aziende di trasporto e delle Amministrazioni locali.

Per comprendere la logica di funzionamento dell'algoritmo è necessario conoscere lo schema della pianificazione di trasporto, il quale poggia su tre modelli fondamentali:

- analisi della domanda;
- verifica della rete pubblica;
- verifica della rete privata.

A monte di questi si colloca un vasto parco di programmi che utilizzano i dati rilevati con le indagini O-D e quelli censuari (popolazione e addetti), consentendo di costruire i *files* di base della mobilità e ricavare da questi le matrici O-D degli spostamenti, le funzioni descrittive della mobilità e tutte le altre informazioni necessarie per la comprensione delle problematiche allo studio (come si può apprezzare dal seguente diagramma di flusso, elaborato con l'intento di chiarire i rapporti causa-effetto fin qui descritti).

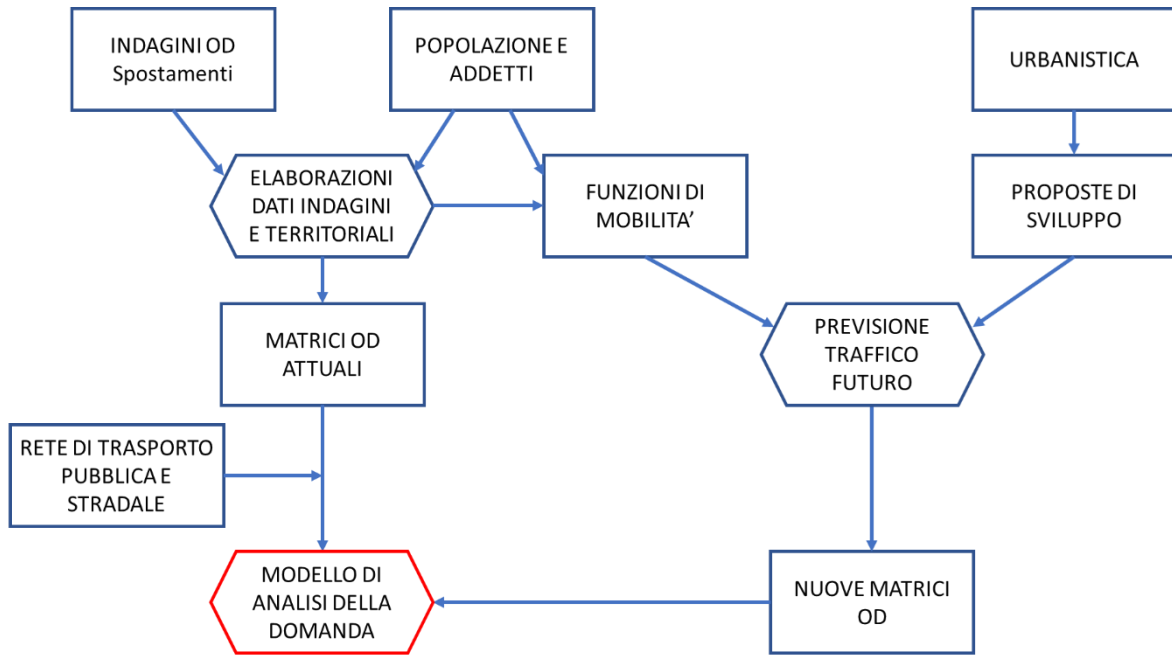


Fig. 5.1 Schema pianificazione trasporti (rete pubblica e privata) – *input e files* di base

Passando poi ai tre modelli fondamentali si deve innanzitutto dire che si tratta sostanzialmente di modelli di assegnazione del traffico: ciascuno di essi consente di determinare i carichi sulla rete che rappresenta e di calcolare il valore dei parametri che ne caratterizzano il funzionamento; questi modelli si configurano pertanto come strumenti di valutazione e verifica di ipotesi e mettono l'utente in grado di rispondere alla domanda "cosa succede se".

Come si vedrà dal seguente schema a blocchi, i tre modelli (evidenziati in rosso) sono fra loro strettamente correlati, sebbene ognuno svolga compiti e funzioni ben distinte; in particolare:

- il modello di analisi della domanda consente di orientare l'operatore nella lettura della gran massa di dati sugli spostamenti ricavati con le indagini O-D ed è di grande aiuto per effettuare verifiche di massima e quindi per la formulazione di ipotesi di progetto;
- i modelli di verifica della rete TPL e di quella stradale permettono di simulare il funzionamento delle reti e forniscono tutti gli elementi necessari per la loro completa definizione e valutazione.

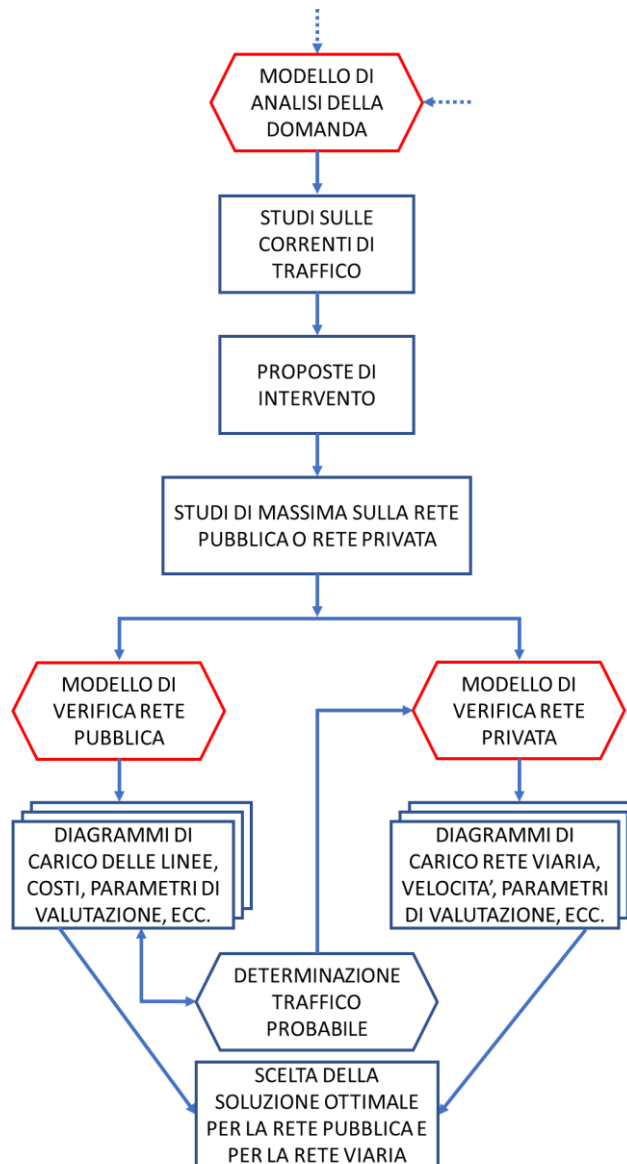


Fig. 5.2 Schema pianificazione trasporti (rete pubblica e privata) – *output* e modelli fondamentali

Va sottolineato che i predetti modelli vengono calibrati nella situazione attuale e solo quando sono in grado di riprodurre la realtà osservata sono impiegati per la verifica delle nuove ipotesi; le nuove realtà simulate possono anche prevedere sviluppi del territorio che influiranno sulla domanda di trasporto; in questi casi, la matrice O-D attuale viene aggiornata facendo riferimento alle funzioni di mobilità relative a situazioni già presenti nel territorio e che sono simili a quelle previste.

Qui nel seguito descivo brevemente le caratteristiche principali di ciascun modello, dei dati che è in grado di fornire e della loro utilizzazione.

5.1.1 Modello di analisi della domanda

Il modello è costituito da un grafo i cui archi riproducono l'insieme dei collegamenti esistenti o previsti nell'area; i nodi rappresentano invece i punti di origine e di destinazione degli spostamenti o semplicemente i punti di connessione degli archi. Ad ogni arco è abbinata una lunghezza ed una velocità che sintetizza ed esprime il livello di efficienza e quindi di attrazione del collegamento che l'arco rappresenta.

Al grafo vengono assegnati gli spostamenti O-D con una procedura "all or nothing" e i flussi di traffico risultanti su ogni arco vengono disegnati per evidenziare la loro distribuzione; a questa rappresentazione si può attribuire il significato di distribuzione naturale che si avrebbe se gli archi avessero capacità infinita e se ogni utente, persona o veicolo, potesse liberamente scegliere il percorso più breve per il suo spostamento. È un'ipotesi meramente teorica, ma che produce risultati di grande valore orientativo in sede di progetto.

Inoltre, il modello consente facilmente di inserire o togliere archi, di variare le velocità, di evidenziare la distribuzione degli spostamenti che hanno origine o destinazione in una determinata area o nodo.

Questa facilità di preparazione dei dati in ingresso, unitamente alla rapidità di risposta, fa del modello uno strumento molto agile per verificare in prima approssimazione un gran numero di ipotesi di progetto e scegliere quelle più promettenti da sottoporre poi a verifiche approfondite con altri modelli specifici; in particolare, esso è di grande aiuto per individuare i possibili tracciati delle linee di trasporto pubblico e si configura per questo problema come un valido strumento di supporto alle decisioni.

Per di più, sovrapponendo alle distribuzioni zonali (rappresentate mediante opportuni flussogrammi) lo schema delle linee, si può verificare la corrispondenza dei tracciati alle correnti di traffico; infine, se necessario, può essere evidenziata la distribuzione degli spostamenti che hanno origine specificatamente da una zona.

5.1.2 Modello di verifica della rete pubblica

Il modello si avvale di una rappresentazione della rete del tutto aderente alla realtà e cioè fa riferimento ai percorsi delle linee, che vengono descritti come successione di fermate la cui posizione sul territorio è individuata da coordinate geografiche. Le altre informazioni necessarie per la descrizione delle linee sono le velocità dei veicoli nei singoli tratti fra due fermate contigue e le frequenze.

Anche per i nodi O-D devono essere date le coordinate e, fatto ciò, il modello provvede automaticamente alla creazione dei collegamenti pedonali fra i nodi e le fermate, alla individuazione dei punti di interscambio fra le linee e al calcolo delle lunghezze di ciascun tratto.

Il cuore della procedura è costituito dalla ricerca, per ogni relazione O-D, del percorso minimo che si ipotizza verrà utilizzato dagli utenti, la cui valutazione è fatta in termini temporali ed include tutti gli elementi presi in considerazione nel processo decisionale dall'utente medio, ossia:

- intervallo temporale del tratto a piedi per raggiungere la prima linea;
- tempo di attesa e tempo di percorso in linea;
- tempo per eventuale percorso a piedi ed attesa per prosecuzione del viaggio su altre linee;
- intervallo temporale del tratto a piedi dalla fermata di discesa dell'ultima linea alla destinazione.

Oltre ai tempi effettivi di spostamento, nella determinazione del percorso minimo vengono considerati anche tempi di penalizzazione per i trasbordi, che esprimono sia il disagio per il cambio di veicolo che l'onere per il pagamento di eventuali tariffe suppletive. Inoltre, se anche solo per una parte del percorso può essere usato per più linee alternative, il modello considera questa possibilità e distribuisce il traffico fra queste in misura inversamente proporzionale agli intervalli di frequenza.

Una volta individuato e descritto il percorso minimo associato ad ogni relazione O-D vengono calcolati gli elementi utili per la valutazione della rete dal punto di vista funzionale, dal punto di vista dell'utente e da quello dell'esercente.

Gli elementi utili forniti sono:

- i diagrammi di carico delle linee;
- le matrici di interscambio;
- gli indici di efficienza della rete a livello dell'intera area e per ogni singola zona O-D;
- le risorse necessarie per gestire la rete (uomini e veicoli);
- i costi di esercizio per l'azienda.

Si tratta di elementi che dovranno essere analizzati attentamente per poter trarne le indicazioni necessarie alla messa a punto della rete; in particolare, i già tanto discussi diagrammi di carico devono risultare equilibrati ed i passeggeri presenti in vettura non devono superare la capacità massima delle linee stesse.

Infatti, anche per questo modello vengono fornite restituzioni grafiche sia dei flussi di traffico sulla rete che dei diagrammi di carico, con informazioni sui saliti (distinguendo gli apportati da altre linee) e discesi (conteggiando i ceduti ad altre linee) ad ogni fermata, oltre ovviamente i presenti in vettura.

Vengono inoltre elaborati degli indici descrittivi (relativi ai pendolari e ai residenti che usano i TPL) del livello di servizio della nuova rete prevista ed è interessante il confronto con la situazione attuale che mette in luce l'auspicato miglioramento apportato dalla nuova rete. A tal proposito, le variazioni prodotte alla rete non devono penalizzare eccessivamente gli utenti rispetto alla situazione che viene presa come riferimento.

Per consentire questo controllo, il modello evidenzia per l'intera area e per ogni nodo di origine le variazioni intervenute sui due parametri più significativi che sono:

- il numero dei trasbordi;
- il tempo di spostamento;

fornendo anche un elenco di tutte le relazioni O-D per le quali si ha un peggioramento significativo dei valori, rivelandosi estremamente utile per gestire il rapporto con l'utenza.

5.1.3 Modello di verifica della rete stradale

Il modello si avvale di un grafo per la rappresentazione della rete, dove i nodi corrispondono agli incroci e gli archi alle strade; anche qui la posizione dei nodi stradali sul territorio è data dalle loro coordinate geografiche e così pure quella dei nodi O-D. Oltre a ciò occorre fornire al modello una descrizione completa delle caratteristiche geometriche e funzionali delle strade nonché della presenza di veicoli in sosta e dei percorsi e frequenze di ogni linea di trasporto pubblico in sede promiscua.

Noti questi *input* il modello effettua automaticamente il *pre-loading* dei mezzi pubblici, il calcolo della lunghezza di ogni strada, della capacità oraria, della velocità di base e attribuisce ad ogni strada la curva di deflusso corrispondente alle sue caratteristiche; anche i collegamenti fra i nodi O-D ed i nodi stradali sono generati automaticamente.

La procedura di assegnazione utilizzata presuppone che tutto il traffico venga caricato interattivamente sulla rete e, al termine di ogni caricamento, si calcoli il coefficiente di occupazione di ogni strada e la velocità che ad esso corrisponde in base alle curve di deflusso precedentemente elaborate. Il procedimento è definito "di equilibrio" poiché si arresta solo quando si raggiungono le condizioni di equilibrio, e cioè quando l'ultima assegnazione differisce dalla precedente per meno del valore minimo fissato.

Tralasciando altre informazioni non utili in questa sede, va sottolineato che quest'ultimo modello è stato utilizzato a Milano fino alla diffusione dei cosiddetti modelli di derivazione commerciale, più specifici per l'analisi degli schemi di circolazione ed impiegati dalle organizzazioni delegate allo sviluppo di attività di pianificazione del traffico.

5.2 – Presentazione del caso-studio di Milano

La formulazione della strategia di riorganizzazione dei percorsi tranviari nell'area centrale di Milano non può prescindere dagli elementi chiave contenuti nei piani di sviluppo delle altre realtà urbane (italiane e non) interessate da provvedimenti infrastrutturali e funzionali simili, dai quali si può certamente prendere spunto.

In particolare, il caso di Firenze, sia pur descritto brevemente in precedenza, è rappresentativo di un *modus operandi* estendibile in altri contesti cittadini ove sono previsti interventi di potenziamento ed adeguamento infrastrutturale, specialmente in caso di attraversamenti tranviari di aree centrali ad alto valore storico-artistico, cui indubbiamente fa parte la Cerchia dei Navigli di Milano.

A tal proposito, si ricorda che nel corso dei capitoli precedenti è stata più volte attenzionata la strategia di segmentare le linee, unitamente all'inserimento di vetture bidirezionali, funzionale a garantire maggiore flessibilità all'esercizio tranviario; infatti, con questo approccio è possibile adeguare il servizio offerto alla mutevole esigenza di mobilità, specie su alcune linee diametrali in attraversamento del centro storico che presentano un grado di riempimento variabile lungolinea e ridotto nella direzione contro-carico.

In generale però le tratte critiche sono di difficile individuazione, dato che i disagi causati su una tratta si ripercuotono facilmente su quelle vicine, causando un "effetto domino" non facilmente prevedibile. Sono tuttavia note alcune "macro-zone" ad elevata criticità, tale da giustificare provvedimenti urgenti e possibilmente risolutivi dei punti di maggior conflitto.

Nel contesto urbano di Milano spiccano i seguenti nodi e tratti critici:

- l'area dei navigli con epicentro piazzale Cantore;
- l'area di smistamento del traffico privato verso le grandi direttrici nord (via Farini, viale Stelvio/Tunisia/Zara), le direttrici est e sud;
- l'area circostante Stazione Centrale;
- via Broletto e il nodo del Cordusio.

A queste vanno poi aggiunte le tre circonvallazioni e la grande viabilità di interconnessione fra le varie direttrici radiali, che presentano costantemente carichi di traffico elevati.

L'obiettivo strategico che ci si propone è quindi quello di riqualificare l'offerta di servizio che negli ultimi anni non si è mantenuta sempre al passo con una domanda in continua evoluzione e trasformazione, soprattutto per quanto riguarda gli spostamenti che interessano l'area metropolitana.

A ciò è conseguito un evidente squilibrio del rapporto domanda/offerta che si è espresso sottoforma di sbilanciamento della ripartizione modale a favore dell'utilizzo del mezzo individuale.

Lo scenario esplorativo indagato consiste in una variazione di alcuni percorsi tranviari con la finalità di verificare la fattibilità di riduzione degli attraversamenti del centro città, in particolare di quelli transitanti in via Orefici mediante Piazza Cordusio, con l'intento di creare un'area pedonale continua da Duomo a Piazza Castello, come indicato nel piano di mobilità urbana sostenibile comunale e metropolitano.

Nonostante ciò, il tram è compatibile in genere con le zone pedonali, percorse con adeguate limitazioni di velocità, e può renderle ben accessibili contrariamente a quanto si pensa di primo acchito: il tracciato obbligato e il transito cadenzato offrono infatti ai pedoni maggiore sicurezza rispetto a una circolazione aleatoria di veicoli a guida libera.

È infatti ormai prevalsa la consapevolezza dei molti effetti negativi del traffico motorizzato urbano e della necessità di un efficiente ed efficace trasporto pubblico; questo ha per logica conseguenza limitazioni del traffico nelle zone centrali, permettendo così la realizzazione di corsie o strade riservate ai tram, in aperto contrasto con il punto di vista passato, che considerava negativamente la sottrazione di spazio alla circolazione veicolare ordinaria.

Fatte tali premesse è ora opportuno richiamare i contenuti delle linee guida; in particolare, con riferimento al PUMS del Comune di Milano; di seguito vengono elencate e raffigurate (in Fig. 5.3) le ipotesi di intervento elaborate, comprendenti quelle che riguardano le linee tranviarie direttamente interessate dai provvedimenti di adeguamento (sottolineate), ossia la 2 (Bausan – Negrelli), 12 (Rosario – Molise) e 14 (Cimitero Maggiore – Gratosoglio).

L'ipotesi di scenario considerata prevede:

- modifica di percorso del tram 2 da Bovisa a Molise (nella figura in rosso);
- linea n. 12 attestata a Cairoli (nella figura in grigio);
- divisione del tram 14 in due tronconi: il n. 14 da Cairoli a Musocco (in viola) ed il n. 8 da Armorari a Lorenteggio (verde scuro);
- arretramento del capolinea del tram 15 a Missori (in blu);
- il tram n. 19 devia per Cenisio-Bramante-Broletto e prende il percorso del tram n. 2 sino al capolinea Negrelli/S. Cristoforo (in arancio);
- linea n. 27 limitata a piazza Fontana (in rosso scuro);
- il n. 19 sui Bastioni occidentali viene sostituito dalla linea n. 10 Centrale-Porta Genova-XXIV maggio (in azzurro).

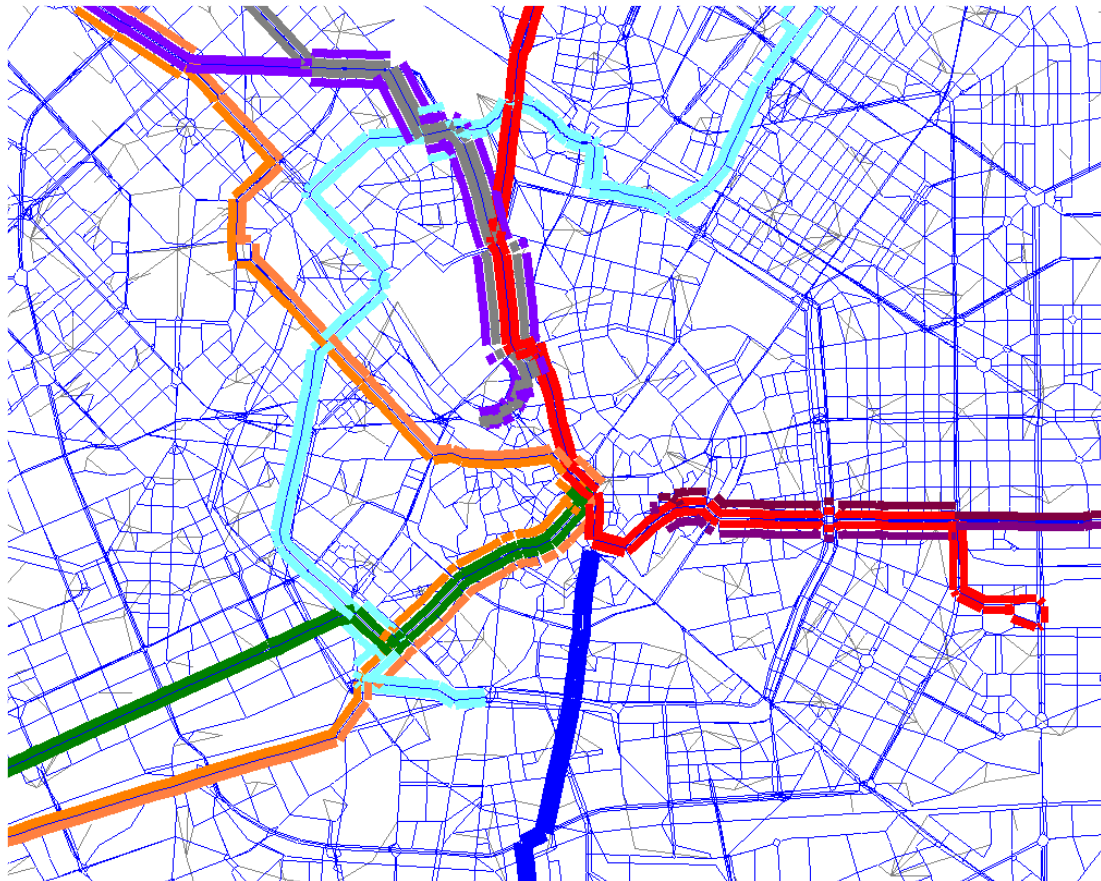


Fig. 5.3 Ipotesi di razionalizzazione dei percorsi tranviari in centro

Fonte: elaborazione PUMS del Comune di Milano

Lo scenario riprodotto dall'Ente comunale, sebbene rappresenti solo uno dei possibili schemi funzionali in grado di coprire le relazioni descritte, è risultato con rapporto benefici/costi significativamente positivo, in quanto le simulazioni non hanno evidenziato possibili perdite di utenza, mentre comporta significativi risparmi in costo di esercizio.

A questo punto, individuate le linee oggetto di studio, si formulano delle ipotesi di intervento che prevedono la realizzazione di due *hub* tranviari, di cui uno localizzato nel quadrante settentrionale presso Piazza Castello/Largo Cairoli, mentre l'altro in quello meridionale in corrispondenza di Piazza Missori. In aggiunta, si prevede il dimensionamento di un capolinea tronco presso Piazza Edison/via Armorari, funzionale ad evitare l'attraversamento di Piazza Cordusio delle tre linee esaminate.

Prima di passare all'analisi numerica è però doveroso inquadrare l'area attenzionata da tale Studio, con particolare riferimento a Piazza Cordusio e le vie limitrofe che la collegano a Largo Cairoli e a Piazza Duomo.

5.2.1 Piazza Cordusio

Piazza Cordusio è un luogo speciale a Milano, di grande importanza per la sua localizzazione, storia, valore collettivo, paesaggio architettonico e ruolo nel sistema dei trasporti pubblici.

Oggi P.zza Cordusio, assieme al Foro Bonaparte, è l'esempio unico a Milano di un progetto coerente e coevo, urbanistico ed architettonico, con la geometria ellittica che ha fatto della piazza un unicum per rarità di forma.

La via degli Orefici è anch'essa figlia dei piani urbani che hanno demolito gli isolati medioevali, preservando però l'antica vocazione commerciale che continua fino ad oggi, oltre ad essere un'importantissima tratta della rete tranviaria.



Fig. 5.4 Via Orefici negli anni '30 (fonte: blog.urbanfile.org)

Infatti, Cordusio è da sempre un nodo di “mobilità” nelle sue più diverse accezioni, in cui la commistione di mezzi è ancora la medesima: persone, carrozze e carretti, fino a poco dopo, con l'arrivo del tram e progressivamente delle automobili; non a caso il primo semaforo milanese è all'incrocio di Via Orefici e Via Torino. Il ruolo del Cordusio come perno del sistema tranviario milanese è immediatamente successivo al suo ridisegno.

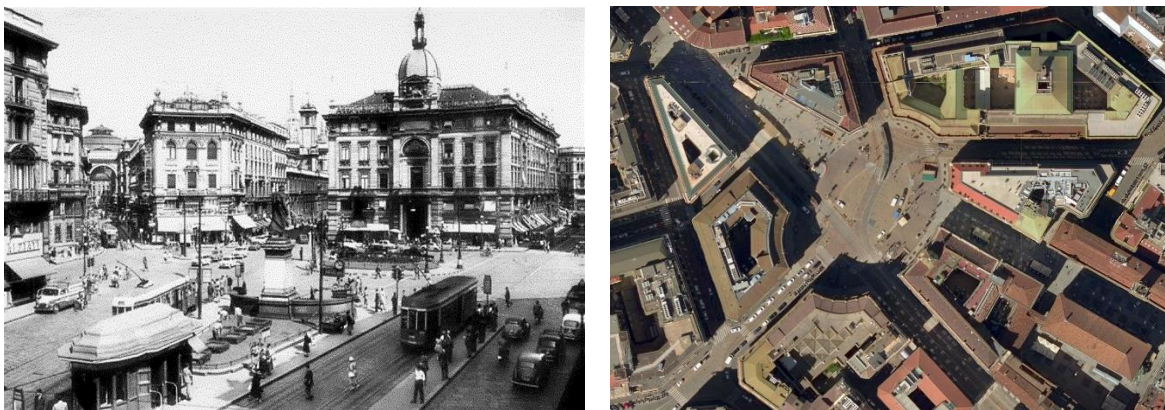


Fig. 5.5 Assetto definitivo di Piazza Cordusio nel secondo dopoguerra e oggi (fonte: blog.urbanfile.org)

Il ruolo di fulcro della mobilità viene sottolineato dalla decisione di realizzare al Cordusio una fermata della nuova Linea Metropolitana 1, con un'opera faraonica e delicatissima che venne inaugurata nel 1964, dopo aver aperto e poi richiuso praticamente tutta la piazza. Infine, nel 1998, dopo molte discussioni e proteste, s'inaugurò la pedonalizzazione di Via dei Mercanti e Via Dante, lasciando in mezzo Piazza Cordusio aperta al traffico.

Riassumendo, si può concludere che le modifiche intervenute nel tempo in Piazza Cordusio sono state causate, principalmente, da interventi riguardanti la mobilità.

Per questo l'approccio in un progetto di riqualificazione deve essere molto attento a non alterarne i valori laddove, nel passato, si è disegnata una identità molto forte, patrimonio della città e dei milanesi. La rigenerazione del Cordusio, quindi, deve avere come finalità ridare evidenza alla grande qualità dello spazio pubblico, persa nell'uso e nelle trasformazioni viabilistiche che ha subito.

Pertanto, gli obiettivi che ci si propone nell'affrontare un progetto di riqualificazione della Piazza possono essere di seguito così riassunti:

- restituire decoro e dignità ad uno spazio pubblico strategico del centro storico di Milano;
- approcciare le soluzioni con una visione integrata del sistema, che comprende le vie di accesso, in particolare Via Orefici, Via Cordusio e Via Tommaso Grossi fino a Largo S. Margherita;
- estendere l'uso pedonale della Piazza e del tratto sud di Via Dante, sia in attraversamento al passaggio dei binari che nell'uso complessivo della Piazza e del trapezio del tratto iniziale di Via Dante;
- migliorare l'efficienza del servizio pubblico in un nodo fondamentale del sistema tranviario milanese, con interventi non radicali che mettano a frutto tecnologie innovative e simulazioni avanzate garantendo la sicurezza dei pedoni;
- introdurre elementi decorativi vegetali con funzione di mitigazione dell'isola di calore e abbellimento.

Attualmente, il ruolo principale dell'area è quello di convogliare i flussi di mobilità veicolare e tranviaria che attraversano o sono diretti in centro, a scapito dell'originaria qualità dello spazio pubblico e dell'esperienza pedonale.

Vi è inoltre un forte fenomeno di occupazione non regolamentare dello spazio centrale della Piazza Cordusio da parte di veicoli in sosta; ciò non toglie che la Piazza sia un importantissimo snodo della pedonalità, percorso ogni giorno da migliaia di persone che per svago o per lavoro frequentano il centro di Milano.

Per chiarire l'assetto viario circostante la Piazza, sia stradale che tranviario, nelle immagini successive sono evidenziate le vie convergenti alla Piazza ed i percorsi tranviari in attraversamento.

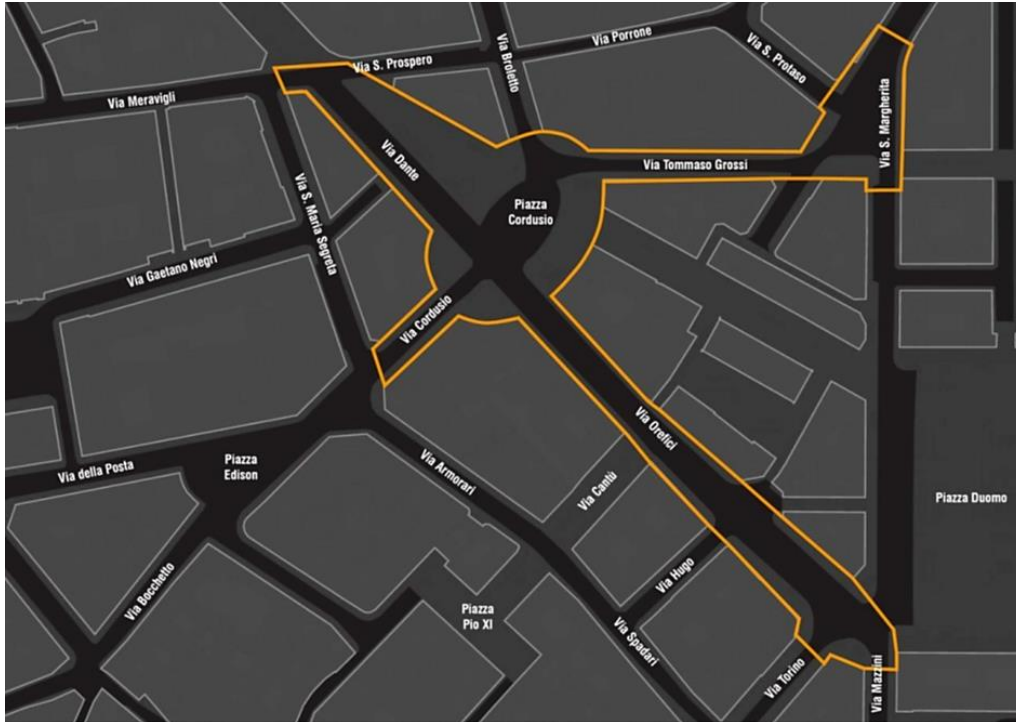


Fig. 5.6 Viabilità limitrofa a Piazza Cordusio (fonte: blog.urbanfile.org)

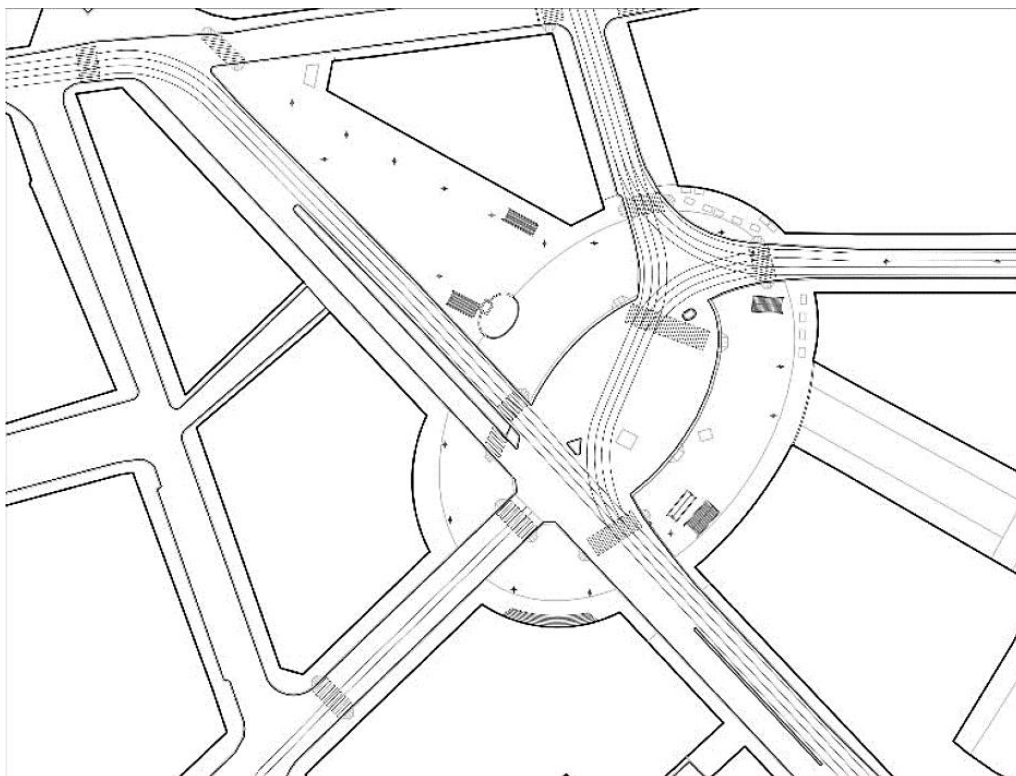


Fig. 5.7 Attuali percorsi tranviari in attraversamento di Piazza Cordusio (fonte: blog.urbanfile.org)

5.2.2 Rete tranviaria in attraversamento di Piazza Cordusio

Come anticipato, Piazza Cordusio è nata come spazio pubblico aperto ed omogeneo, per poi trasformarsi nel fulcro del sistema tranviario milanese alla fine dell'Ottocento; oggi la Piazza è il punto dove convergono le direttrici tranviarie nord di Via Meravigli-Dante e Via Broletto, che proseguono verso sud lungo Via Orefici.

Anche la stazione "Cordusio" della linea della metropolitana M1, realizzata nel 1964, contribuisce a definire il carattere di *hub* del trasporto pubblico della Piazza.

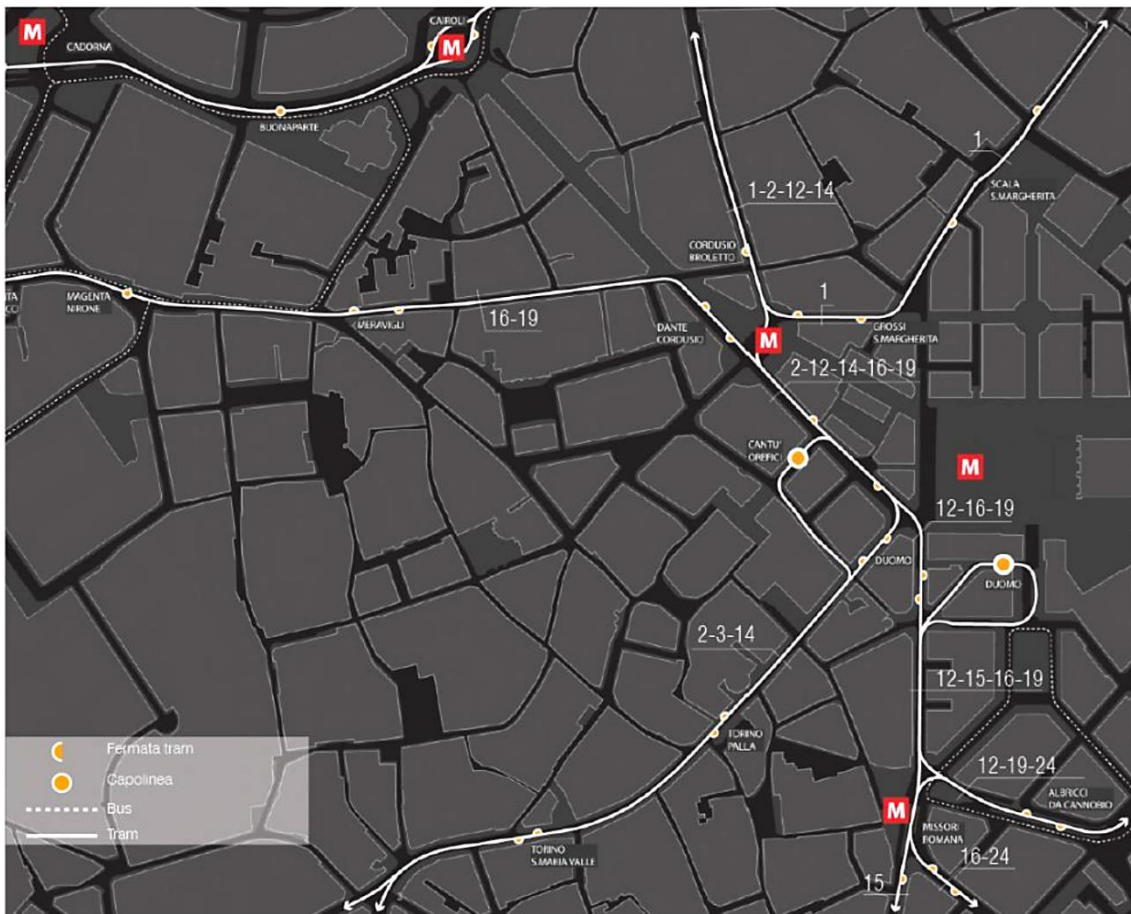
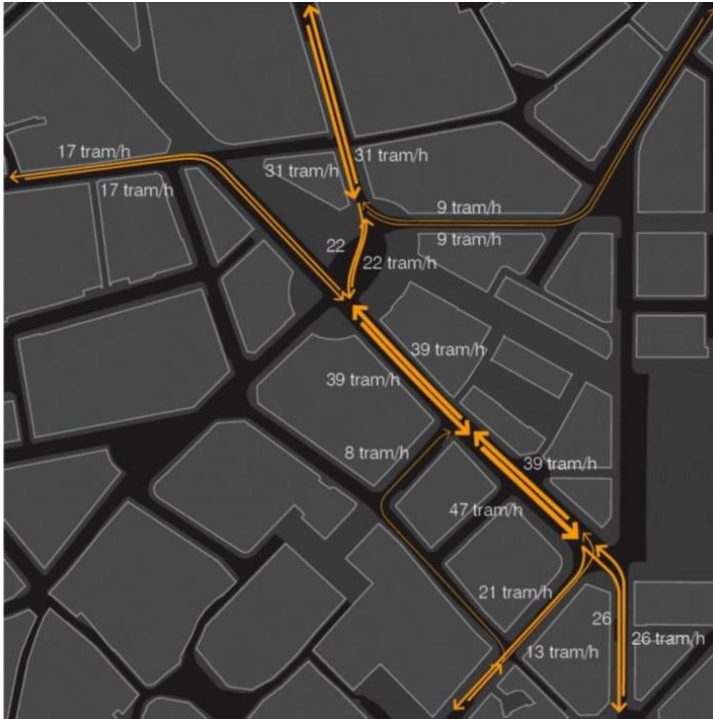


Fig. 5.8 Rete tranviaria ed interscambi metropolitani nell'area centrale (fonte: blog.urbanfile.org)



Per comprendere la centralità dello snodo di Cordusio nei confronti del servizio tranviario offerto si riporta la rappresentazione grafica del numero di transiti nell'ora di punta mattinale, dalla quale emerge l'ingente frequenza lungo il collegamento di Via Orefici (una vettura ogni 75 secondi circa) e le direttrici più trafficate ossia a Nord Via Broletto e a Sud Via Mazzini.

Fig. 5.9 Frequenza cumulata dei tram nell'area di progetto (fonte: blog.urbanfile.org)

5.2.3 Assetto viario e criticità rilevate

L'area di progetto si trova nella più interna Zona a Traffico Limitato del Comune di Milano: vigono regole piuttosto severe per l'accessibilità, che è limitata ai possessori di permesso, ai taxi e alle operazioni di carico e scarico in determinati orari. Ad eccezione di Via Cordusio e Via Orefici, tutte le vie nella zona di progetto possono essere percorse solo da veicoli con specifica autorizzazione.

Nonostante le restrizioni di accesso presenti nella zona, tuttavia, i volumi di traffico lungo le direttrici non riservate sono tali in alcuni casi da creare accodamenti ed intralciare il servizio tranviario, durante le ore di punta.

Per esempio, il flusso di veicoli proveniente da Via Cordusio è piuttosto intenso nell'ora di punta del mattino e risulta in code lungo Via Cordusio e Via Santa Maria Segreta.

Inoltre, il verde veicolare di Via Cordusio coincide con il verde pedonale di Via Orefici, situazione non ideale per smaltire le svolte in destra: i veicoli che da Via Cordusio intendono attraversare la Piazza traggono vantaggio dall'ampiezza della via per sfilare a lato dei veicoli accodati (si vedano le immagini seguenti). Si evidenziano anche fenomeni di accodamento dei taxi in Piazza Cordusio che interferiscono con i tram.



1.1 Fig. 5.10 Conflitto fra i veicoli provenienti da Via Cordusio e pedoni in attraversamento su Via Orefici (fonte: Google Street View)



Fig. 5.11 Veicoli in attraversamento della Piazza che occupano il sedime tranviario(fonte: Google Street View)

Anche l'altro itinerario aperto, costituito da Via S. Protaso e Via S. Prospero, è caratterizzato da volumi di traffico piuttosto intensi (circa 500 autoveicoli ed altrettanti moto e motorini) se paragonati alla geometria stradale e al contesto. Questo flusso interferisce con l'attraversamento pedonale che collega la parte pedonalizzata di Via Dante con quella che si estende verso Piazza Cordusio.

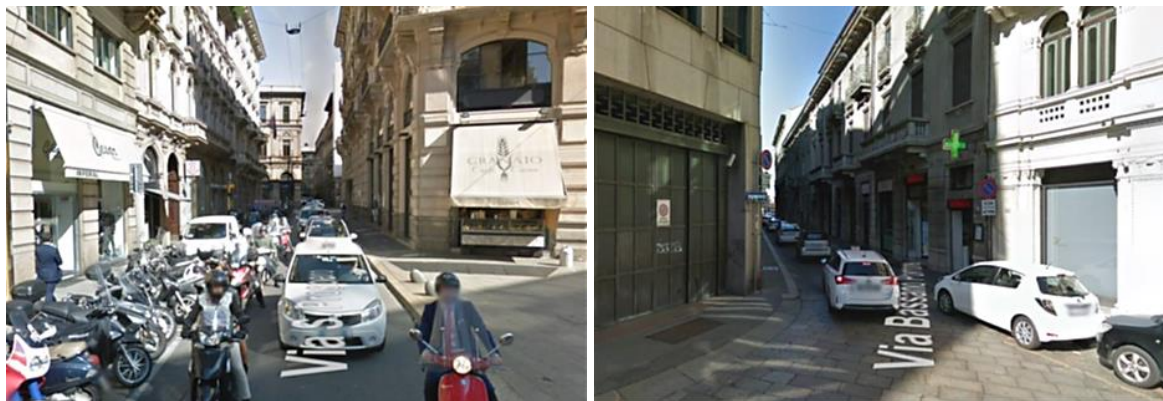


Fig. 5.12 Accodamenti in Via S. Prospero, Porrone e S. Protaso (fonte: Google Street View)

5.2.4 Flussi di traffico che interessano l'area di Piazza Cordusio

Per ottenere una chiara comprensione dei fenomeni di mobilità nell'area, sono stati effettuati dei rilievi di traffico e pedonali, che alimentano un modello di micro-simulazione finalizzato a testare e rifinire gli scenari di progetto. I rilievi sono stati effettuati in un giorno feriale, nelle fasce orarie che vanno dalle 7:30 alle 9:30 e dalle 17:30 alle 19:30. Le ore di punta identificate sono per il mattino 8:30-9:30 e per il pomeriggio 18:30-19:30.

I dati rilevati dimostrano che al mattino è molto forte la relazione veicolare Meravigli – Dante – Orefici, oltre che il transito a margine di Piazza Duomo in direzione del Teatro della Scala. Nell'ora di punta del pomeriggio diventa invece prominente la relazione est-ovest che da Via S. Prospero prosegue in Via Meravigli.

Si evidenzia inoltre che, a causa delle regole di accesso alla ZTL, il numero di moto e motorini in transito nella zona rilevata equivale o supera, in alcuni tratti, quello delle automobili. A fronte di valori molto alti di veicoli/ora, si deve quindi tenere conto del fatto che gran parte di questi veicoli sono di piccole dimensioni; a tal proposito, i seguenti flussogrammi rappresentano le moto (a destra) separatamente dagli autoveicoli (a sinistra).

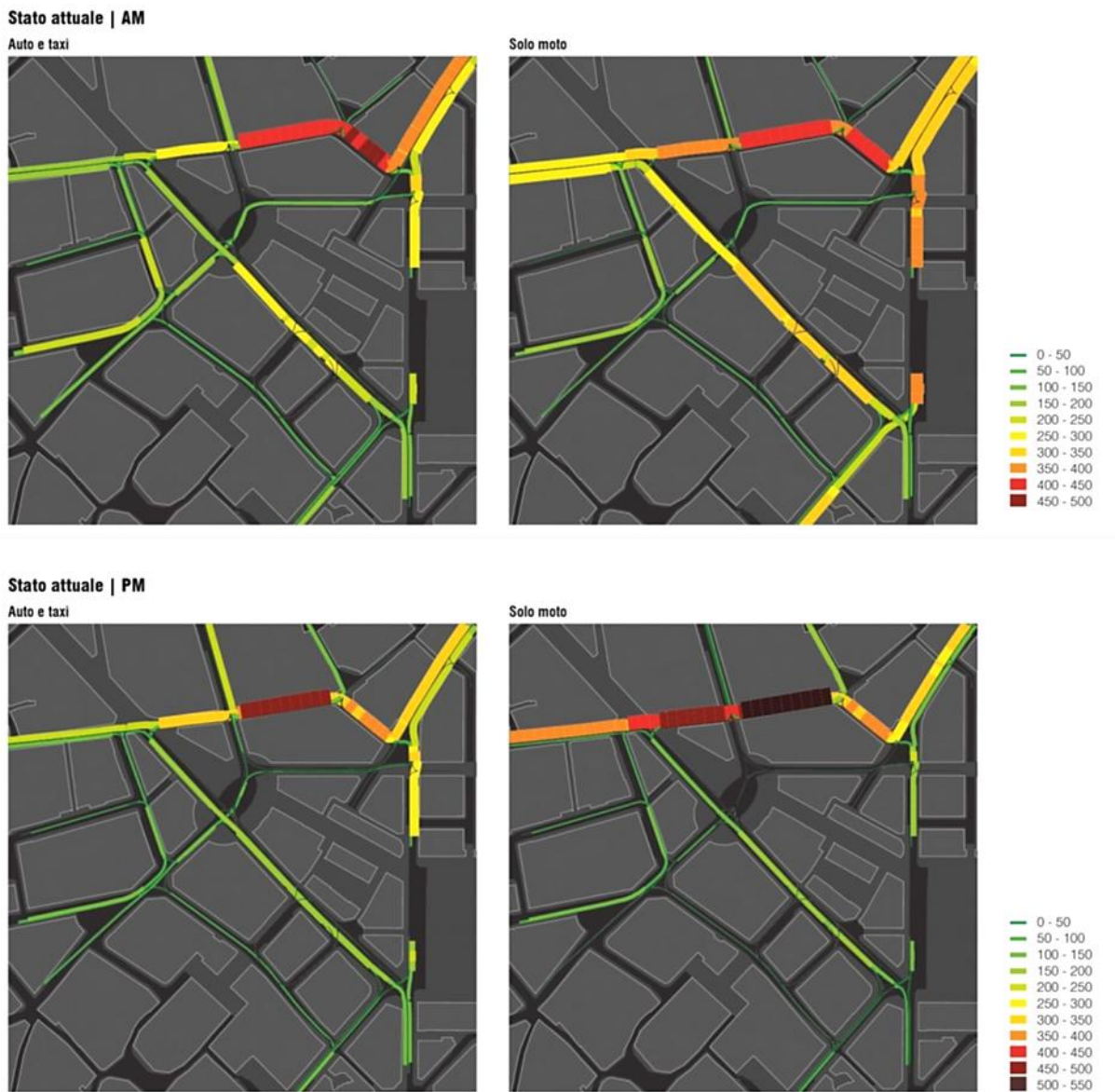


Fig. 5.13 Intensità dei flussi veicolari allo stato attuale, ora di punta del mattino (AM) e del pomeriggio (PM)

Fonte: Elaborazione Freyrie Flores Architettura e Mobility in Chain

5.2.5 Un punto critico per la pedonalità in centro

Nell'asse pedonale ideale che va da Piazza Castello a Piazza Duomo e San Babila (si veda l'immagine seguente), la zona di Piazza Cordusio costituisce una discontinuità percettiva e funzionale: l'attraversamento che collega Via Dante e Via Mercanti all'interno dell'ellisse, non solo non valorizza questa direttrice pedonale con materiali e dimensioni adeguate, ma presenta anche criticità nell'utilizzo a causa dei ridotti tempi di verde per l'attraversamento e delle interferenze con i tram in transito.



Fig. 5.14 L'asse pedonale che collega il Castello al Duomo e Piazza S. Babila (fonte: blog.urbanfile.org)

L'entità dei flussi tranviari, la crescente dimensione dei tram in uso e la complessità dei conflitti veicolari nella Piazza, fanno sì che i tram delle linee 12 e 14 provenienti da Via Broletto e diretti in Via Orefici, quando fermi al semaforo che dà su Via Dante, occupino con il retro del veicolo l'attraversamento pedonale, ostacolando il passaggio dei pedoni (come si evince dalle figure seguenti).

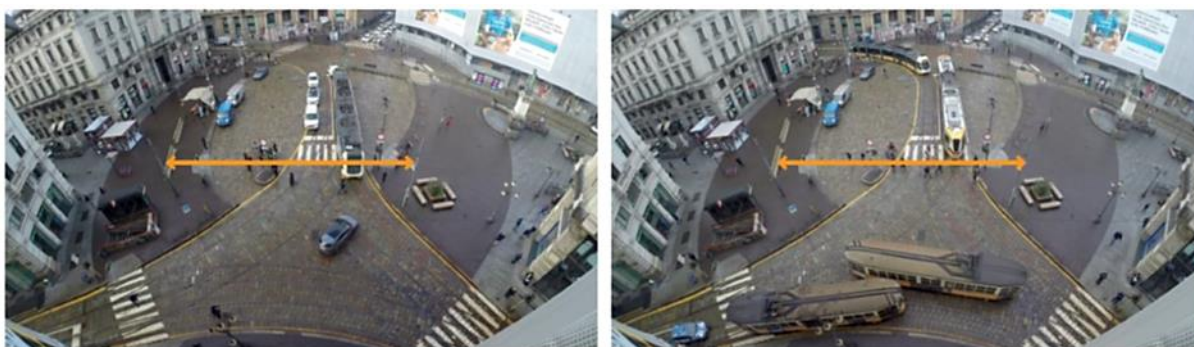


Fig. 5.15 Tram occupano l'attraversamento pedonale in centro alla piazza (fonte: blog.urbanfile.org)

Ne derivano situazioni di pericolo o quantomeno di scarso *comfort*, soprattutto in relazione all'entità dei flussi pedonali rilevati in attraversamento: basti pensare che ogni dieci minuti, nell'ora di punta del mattino, circa 165 persone utilizzano questo attraversamento, mentre nell'ora di punta del pomeriggio si raggiunge un valore di 620 persone.

Come ho già avuto modo di scrivere, tali valori sono frutto di modelli di micro-simulazione, pertanto devono essere considerati delle stime indicative rappresentative degli ordini di grandezza del fenomeno studiato.

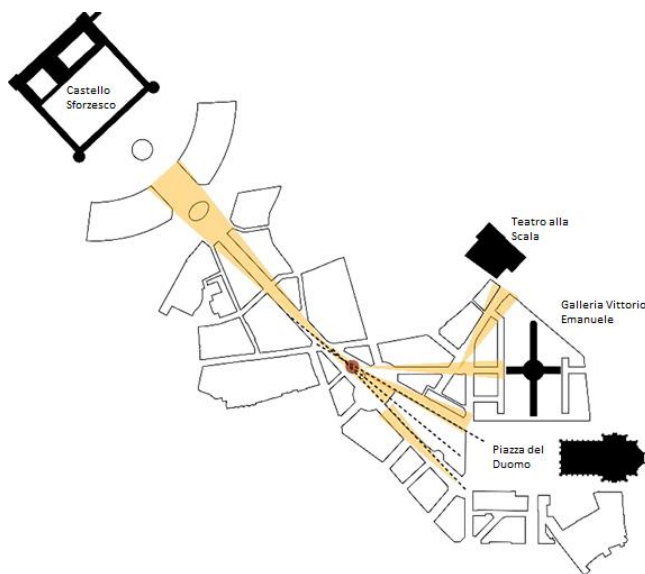
Inoltre, dall'osservazione delle dinamiche nelle due ore di picco, che sono state anch'esse restituite nel modello di simulazione, emerge al mattino una forte relazione tra il trasporto pubblico (uscite della metro, fermate del tram) e Via Cordusio, in direzione di Piazza Affari. Al pomeriggio diventa invece dominante il passaggio lungo Via Dante e Via Mercanti.

Le vie Orefici e Tommaso Grossi, invece, sono di fatto 'percorsi di servizio' o 'scorciatoie' utilizzati dai pedoni che frequentano abitualmente la zona, ma estranee alle dinamiche di ricreazione e turistiche; per di più, la zona di Largo Santa Margherita non viene assolutamente percepita come il naturale prolungamento della Galleria, quanto piuttosto come uno spazio dove parcheggiare moto e motorini.

La qualità e la storia di questi luoghi devono tuttavia essere recuperate per dare continuità ed ampliare gli spazi simbolo del centro di Milano, e una decisa revisione delle dinamiche di mobilità deve essere parte della visione di questo progetto.

Il sistema del Cordusio:

Parlando di percezione e prospettiva, va detto che il nodo di Cordusio oltre ad essere una piazza è un sistema urbano composto di spazi, edifici e relazioni viarie e monumentali: infatti è stato ideato come nodo di connessione tra Duomo, Galleria e Castello (già nel progetto della Via Napoleonica), drena un grande flusso di pedoni cittadini e turisti e vi passano molte linee tramviarie e la Metro 1.



Per questo la riqualificazione della Piazza riguarda anche gli altri elementi componenti il sistema e che non sono stati interessati dalle riqualificazioni del passato: la porzione di Via Dante tra Via Meravigli e Piazza Cordusio; Via degli Orefici, fino alla connessione con l'angolo di Piazza Duomo e Via Torino; Via Tommaso Grossi e Largo S. Margherita.

Fig. 5.16 Sistema del Cordusio (fonte: blog.urbanfile.org)

5.3 – Segmentazione delle linee

La realizzazione degli hub tranviari, come anticipato, è prevista dal PUMS del Comune di Milano e dai Piani di sviluppo della rete; a tal riguardo, lo scenario progettuale formulato si concentra dapprima su quello settentrionale localizzato nei pressi di Piazza Castello/Largo Cairoli e poi sull'ipotesi di realizzare l'attestamento tronco presso Piazza Tommaso Edison, entrambi funzionali alla segmentazione delle linee tranviarie in attraversamento di Piazza Cordusio.

Tuttavia, in questo elaborato ho tralasciato il dimensionamento dell'hub meridionale presso Piazza Missori, poiché tale provvedimento non incide sulla circolazione tranviaria nell'area esaminata.

Ancora una volta, ci tengo a rimarcare che il posizionamento di un nuovo capolinea è fortemente vincolato alla scarsa disponibilità di spazio nell'area circostante che, peraltro, nella fattispecie, risulta essere assolutamente pregiata e di interesse storico-culturale.

Pertanto, l'obiettivo alla base di questo lavoro è quello di minimizzare gli impatti che un siffatto intervento potrebbe suscitare sull'ambiente e sul paesaggio urbano limitrofo; sebbene, come riscontrato più volte negli esempi considerati, l'infrastruttura tranviaria in genere può integrarsi facilmente nel tessuto urbano ipervincolato (si ricordano gli esempi di Nizza e Bruxelles).

Si tratta infatti di infrastrutture certamente meno impattanti dal punto di vista occupazionale se comparate agli anelli di inversione necessari per l'attestamento di linee tranviarie esercite con vetture monodirezionali.

Anche se, nonostante sia sufficiente un solo binario tronco dato l'impiego di mezzi bidirezionali, per garantire la flessibilità dell'offerta di servizio è richiesta la realizzazione di un secondo binario. In merito a ciò, per minimizzare lo spazio occupato si prevede di realizzare una banchina allargata disposta ad "isola", ossia interposta alla coppia di binari.

A queste considerazioni non seguirà un livello dettagliato di progettazione, comprensivo di specifiche geometriche riferite agli attestamenti e ai raccordi tranviari, poiché non costituisce il punto focale del presente Studio.

In tal senso, mi limiterò ad effettuare un dimensionamento di massima in cui verranno rappresentate le linee d'asse dei tracciati e non le singole rotaie, anche per non inquinare il disegno, pur rispettando le distanze necessarie imposte dai vincoli di accessibilità pedonale, di viabilità stradale e circolazione tranviaria.

5.3.1 – Attestamento in Piazza Castello

La localizzazione dell'attestamento, come ho anticipato poc'anzi, è frutto di un'attenta valutazione basata sull'individuazione di spazi disponibili unita però alla ricerca di un luogo che sia facilmente collegabile ad infrastrutture preesistenti così da limitare gli oneri realizzativi.

Al contempo, non ho tenuto conto solo dei bisogni ed obiettivi aziendali, bensì ho riposto grande attenzione a massimizzare i benefici che tale provvedimento potrà apportare all'utenza (ad esempio semplificando e velocizzando l'interscambio), cercando parimenti di minimizzare gli impatti negativi che potrebbe scaturire su di essa (in primis la rottura di carico per gli utenti in attraversamento).

Per poter individuare la soluzione definitiva, durante la redazione del presente Studio ho elaborato diverse ipotesi realizzative.

Ipotesi 1 – Attestamento nell'intersezione fra Piazza Castello e via Quintino Sella:

Dapprima ho immaginato di localizzare il capolinea tronco in Piazza Castello, presso l'intersezione con via Quintino Sella, prevedendo uno sbinamento lungo il viale pedonale che delimita l'area del Castello Sforzesco.

Si tratta un'opzione certamente poco impattante dal punto di vista visivo e paesistico poiché non avrebbe creato un ostacolo fisico ai pedoni che da Cairoli M1 sono diretti al Castello, al contempo però sarebbe stato meno agevole l'interscambio con la stazione ferroviaria e metropolitana di Cadorna, poste a circa 800m di distanza.



Fig. 5.17 Attestamento presso l'intersezione Piazza Castello/via Quintino Sella

Ipotesi 2 – Attestamento in via Pietro Paleocapa:

Un'ulteriore ipotesi che ho formulato prevede la localizzazione dell'attestamento tranviario in via Pietro Paleocapa, facilitando così l'interscambio con Cadorna FN M1 M2 e, al contempo, condizionando la circolazione delle autolinee che terminano la loro corsa in via Stefano Jacini e/o servono la stazione ferroviaria.

In aggiunta, questo scenario avrebbe richiesto la posa ex novo di oltre 200m di tracciato, con non trascurabili oneri di cantierizzazione e lavorazione, specialmente considerando il trafficato nodo viario di Piazzale Luigi Cadorna.



Fig. 5.18 Attestamento presso via Pietro Paleocapa

Ipotesi 3 – Attestamento in via Luca Beltrami:

Alla luce di queste considerazioni, successivamente ho elaborato la soluzione che prevede la collocazione del nuovo hub settentrionale presso via Luca Beltrami (si veda l'elaborazione grafica in Fig. 5.21), ossia l'asse di comunicazione fra Largo Cairoli e Piazza Castello, una



strada che fino a pochi anni fa era percorsa da veicoli motorizzati ed ora, a seguito di un'importante azione di riqualificazione (tuttora in fase di completamento come si evince dall'immagine seguente), è interdetta al traffico veicolare.

Fig. 5.19 Lavori in corso in via Luca Beltrami – luglio 2022

Fonte: blog.urbanfile.org

Tale posizione è strategica poiché adiacente alla fermata M1 di Cairoli ed anche facilmente raggiungibile a piedi dalla stazione FS di Milano Cadorna (sita a circa 500m, si veda l'immagine seguente), specialmente in un contesto così pregiato dal punto di vista paesistico ed architettonico ove peraltro negli ultimi anni sono stati compiuti numerosi interventi viabilistici atti a promuovere la mobilità leggera.

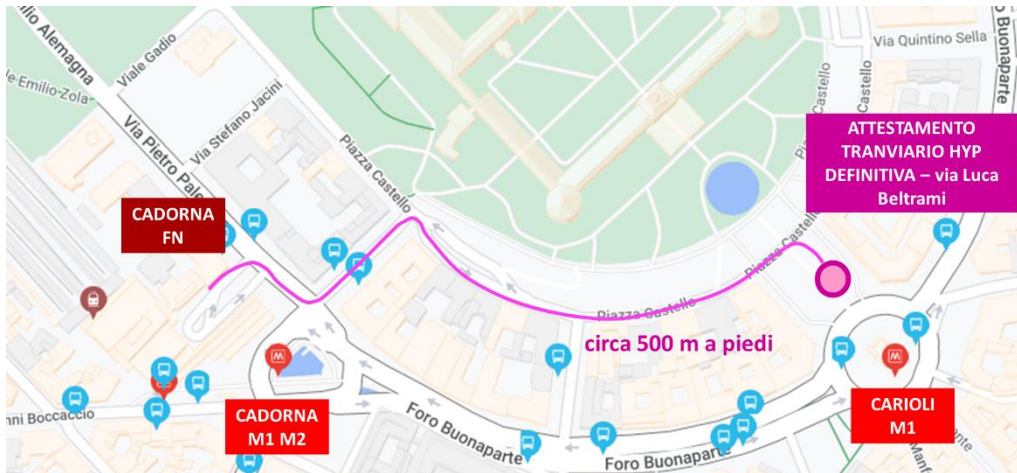


Fig. 5.20 Interscambio a piedi con Cadorna FN

Sebbene l'area scelta per la realizzazione dell'attestamento sia senza dubbio funzionale agli interscambi, al contempo non si può negare che rappresenti un *unicum* per Milano; pertanto, è lecito che nascano molti interrogativi correlati a questa ipotesi progettuale; è quindi necessario formulare un'analisi multi-criteri e relazionare i costi ai benefici ottenibili in sede di studio di fattibilità tecnico-economica, in modo da comprendere se essa sia la soluzione ottimale.

Tuttavia, come anticipato nel capitolo scorso, oggi esistono molti esempi di integrazione fra zone urbane di pregio ed infrastrutture tranviarie, specialmente se si tratta di nuove realizzazioni, per le quali l'impiego di nuovi armamenti e vetture moderne, correlate alla possibilità di omettere la presa di contatto aerea (mediante sistema APS già sperimentato in molte realtà europee di valore architettonico, ad esempio Place Messena a Nizza), riducono fortemente le interferenze con i vincoli circostanti.

In tal senso, come si evince dal seguente disegno progettuale, l'occupazione di via Luca Beltrami è relegata solo alla porzione laterale, lasciano così ampio spazio alla circolazione pedonale/ciclabile; peraltro, anche la visuale prospettica di Piazza Castello da Largo Cairoli e, idealmente, da Piazza Cordusio, non sembra essere pregiudicata da tale realizzazione.

Inoltre, si precisa che il raccordo tratteggiato (mostrato in figura) è opzionale, in quanto non si prevede la necessità di attestare in via Beltrami provenendo da via Ricasoli, però tale comunicazione potrebbe essere percorribile in condizioni non ordinarie per effettuare una precedenza oppure per disimpegnare la sede in caso di vettura guasta.

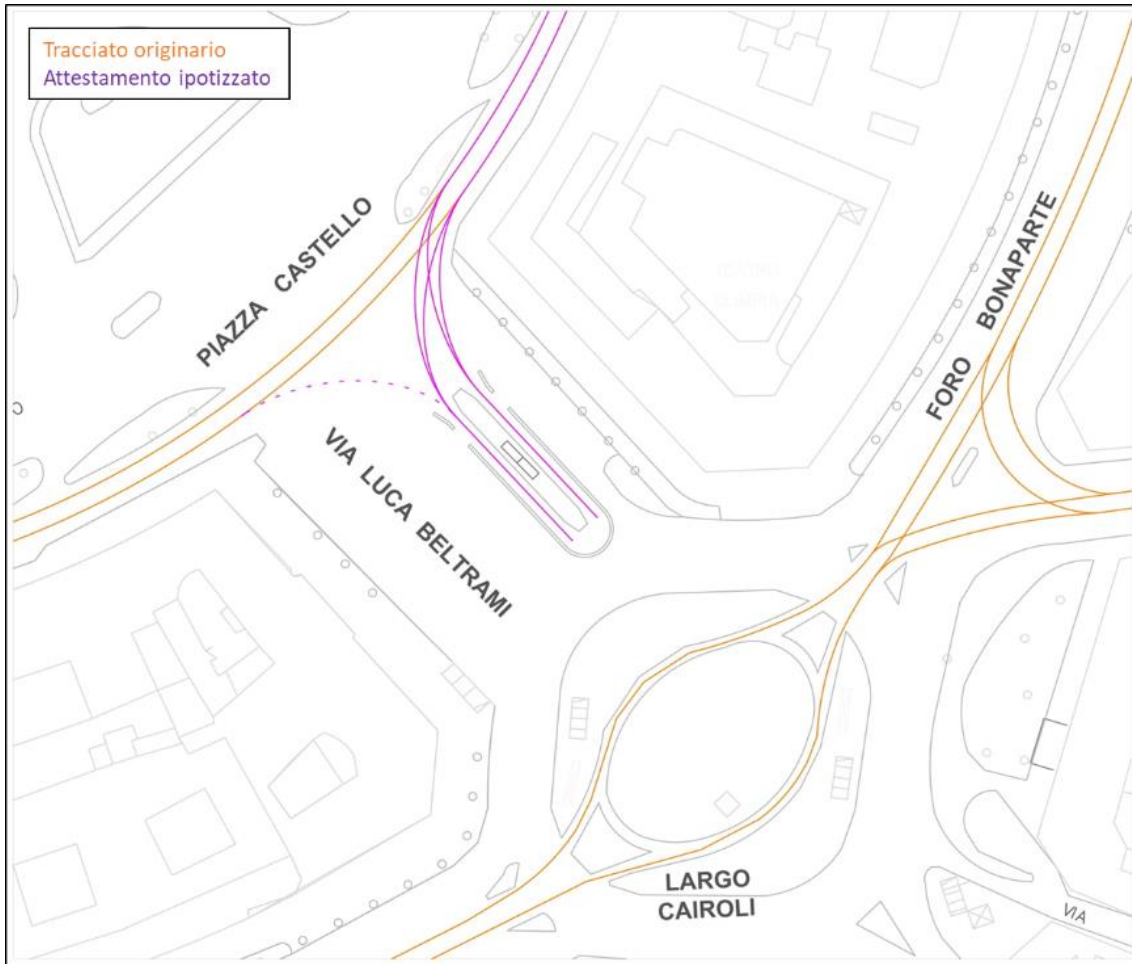


Fig. 5.21 Ipotesi di attestamento presso Piazza Castello

Il tracciato si mostra lineare e non necessita la realizzazione di alcuna deviate se non quelle di raccordo con il nuovo attestamento; a tal proposito, si predispongono un doppio binario al capolinea poiché, come preannunciato, esso garantisce la flessibilità del servizio offerto e consente eventuali margini di potenziamento dell'esercizio.

Si tratta di un attestamento con banchina ad "isola" per minimizzare l'occupazione del suolo pubblico e limitare l'impatto visivo che una siffatta opera potrebbe arrecare; inoltre, la preesistenza del doppio binario in Piazza Castello non richiede a priori un ampliamento della sede tranviaria, dato che attualmente questo tratto di rete è percorso unicamente dalla linea 4 che attesta (ad anello) in via Ricasoli.

Il posizionamento del nuovo capolinea modificherà inevitabilmente il tracciato delle linee tranviarie che altrimenti attraverserebbero Piazza Cordusio, ossia la 2, 12 e 14, le quali invece che intraprendere la deviatà da Foro Bonaparte a via Tivoli, proseguendo poi per via Mercato, via Ponte Vetro ed infine via Broletto, seguirebbero il percorso del tram 4 lungo via Quintino Sella e Piazza Castello (si veda la figura seguente).

Così facendo, gli oneri realizzativi sarebbero relegati al raccordo finale in corrispondenza dell'attestamento presso via Luca Beltrami e alla fermata stessa.

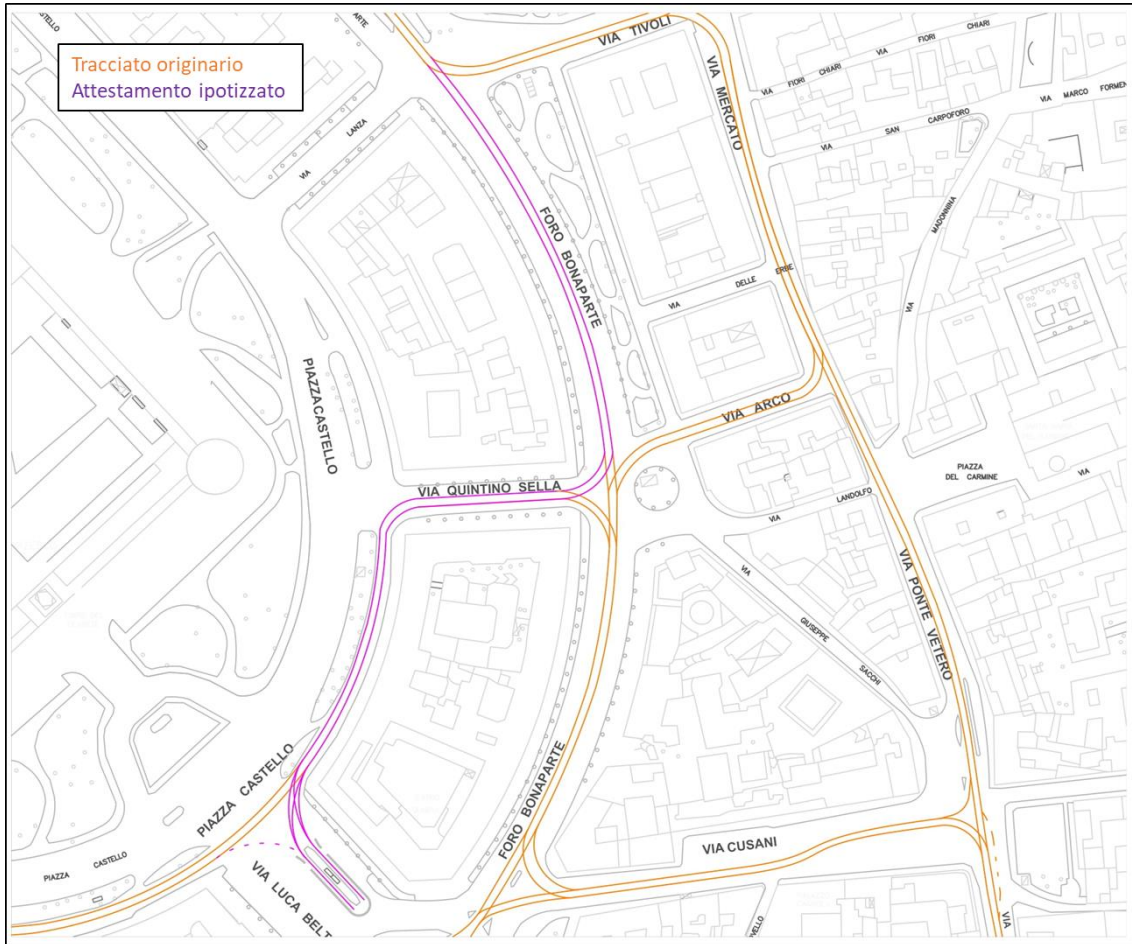


Fig. 5.22 Modifica di percorso ipotizzata – attestamento in via Luca Beltrami

5.3.2 – Attestamento in Piazza Tommaso Edison

La segmentazione delle linee impone evidentemente la realizzazione anche dell'altro attestamento a servizio dei tre rami meridionali così individuati; va detto però che la scelta del luogo più idoneo dipende come sempre da molti fattori, siano essi occupazionali, urbanistici e viabilistici.

In tal caso, il posizionamento del capolinea risente ancor più di quanto visto prima della carenza di spazio disponibile, ragion per cui l'unica area idonea acciò è stata individuata in

corrispondenza di Piazza Tommaso Edison, ove convergono via Armorari e via Cordusio. A ben vedere si tratta di una superficie limitata, oggi adibita a parcheggio, che però potrebbe essere riqualficata e trasformata in un attestamento tronco per le linee esercite con nuove vetture bidirezionali.



Fig. 5.23 Sosta presso Piazza Edison (fonte: Google Street View)



Fig. 5.24 Immagine satellitare di Piazza Edison e vie limitrofe (fonte: Google Street View)

Dato che la circolazione veicolare nell'area è già pesantemente influenzata dalle restrizioni riguardanti buona parte delle vie adiacenti dirette verso Piazza Cordusio e via Torino, l'intervento di adeguamento infrastrutturale che ho elaborato, si propone di non impattare ulteriormente sulla viabilità locale.

La presente ipotesi progettuale dovrà necessariamente essere assoggettata ad una valutazione multi-disciplinare, considerando l'accessibilità alla rete di trasporto pubblico locale, la sostenibilità economica e gli impatti suscitati su tutti i portatori di interessi.

Nella fattispecie, l'interscambio con la rete metropolitana presso la vicina fermata di Cordusio M1 è intervisibile ed agevole percorrendo via Cordusio per circa 200m; al contempo, è possibile raggiungere a piedi la fermata metropolitana di Duomo M1 M3, attraversando sempre via Cordusio ed il tratto finale di via Orefici, per un totale di circa 400m (come mostrato nella seguente cartografia).



Fig. 5.25 Percorso pedonale dal nuovo attestamento alle fermate metropolitane adiacenti

Con riferimento al nuovo attestamento in Piazza Edison, lo spazio disponibile per l'inserimento è limitato; per cui è ragionevole credere che sia necessario modificare i percorsi pedonali lungo via Armorari, limitandone l'estensione laterale pur rispettando i limiti minimi previsti a norma di legge.

Inoltre, su via Spadari non è immaginabile la realizzazione di un doppio binario, che svincolerebbe il percorso diretto al nuovo attestamento dall'anello tranviario per via Cesare Cantù e quindi per via Orefici.

Tuttavia, per far fronte a questa grande limitazione, ho immaginato di realizzare un raccordo che colleghi via Armorari a via Cesare Cantù ed uno sbinamento lungo via Armorari, in sintonia al vecchio tracciato che, ivi, prevedeva un punto di sosta per effettuare incroci/precedenze (si veda il tratteggio viola nell'immagine seguente).

Alla luce di quanto espresso e con le medesime giustificazioni fatte prima con riferimento al capolinea di via Beltrami, ipotizzo un attestamento tronco a doppio binario con banchina ad "isola" interposta, ammissibile dato l'impiego di moderne vetture bidirezionali.

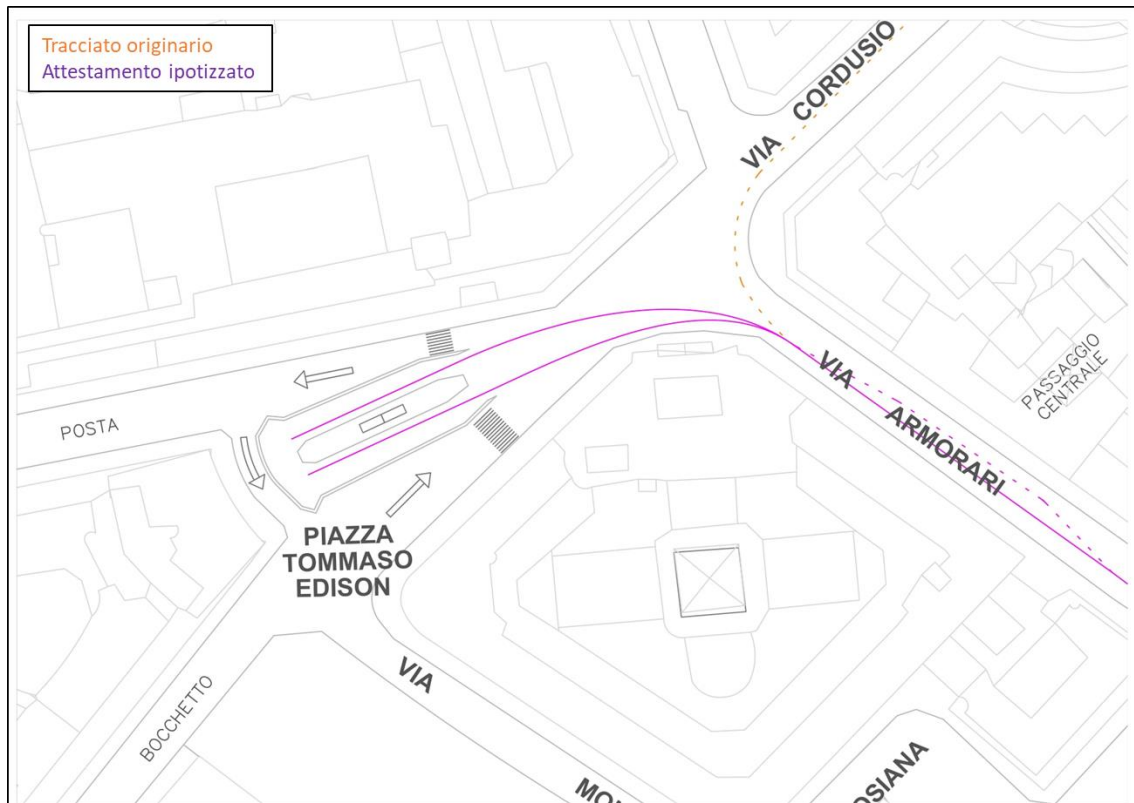


Fig. 5.26 Ipotesi di attestamento in Piazza Tommaso Edison

Riassumendo, il percorso diretto al nuovo capolinea tronco è lineare in destinazione (da via Torino si devia lungo via Spadari e poi via Armorari), mentre in origine implica l'attraversamento parziale di via Orefici, attraverso via Cesare Cantù (si veda la seguente figura), limitando comunque l'ingente numero di corse che attualmente insistono su di essa.

5.4 – Simulazione e analisi numerica

Riferendoci all'area centrale di Milano, l'algoritmo di assegnazione consente di simulare i dati correlati all'utenza delle linee tranviarie in attraversamento di Piazza Cordusio a partire dai parametri caratterizzanti la rete (input del modello), quali lunghezza della linea, velocità commerciale e frequenza.

I valori numerici ottenuti derivano dalla matrice OD del 2005, opportunamente aggiornata al 2019 (periodo pre-Covid e, pertanto, rappresentativo di una situazione ordinaria), tenendo conto che nel corso degli ultimi anni si è verificato un sensibile trasferimento modale di utenza ai TPL, di cui si è tenuto debitamente conto nel processo di simulazione.

I risultati derivanti dalla simulazione, per linea, direzione e fermata, racchiudono le seguenti informazioni:

- passeggeri saliti;
- passeggeri apportati, ossia quelli che accedono al veicolo a partire da altri mezzi TPL;
- passeggeri discesi;
- passeggeri ceduti, ossia quelli in uscita dal veicolo e diretti ad altri mezzi TPL;
- passeggeri presenti in vettura, distinguendo quelli che sono saliti in origine e quelli che sono diretti a destinazione.

Dalla scala di zonizzazione potrebbe derivare l'accuratezza del modello, specie nell'individuazione della fermata di destinazione, in quanto la simulazione non considera che invece l'ultima parte di tragitto può essere percorsa a piedi o con modalità leggera alternativa; ciò detto, alcune fermate site nell'area centrale potrebbero risentire di flussi sovrastimati.

Infine, preme ricordare che la zonizzazione su cui si basa il modello di assegnazione non fa corrispondere necessariamente il nodo ad una fermata del sistema di trasporto, pertanto più propriamente si parlerà di località e zone e non di fermate per maggiore chiarezza espositiva.

5.4.1 Utenza coinvolta – scenario attuale

A margine dell'inquadramento urbanistico-territoriale e della proposta locativa dei nuovi attestamenti, è necessario stimare la quota-parte di utenti interessati dai diversi scenari di intervento servendosi opportunamente del modello di assegnazione commentato in precedenza.

A partire dai risultati del processo di simulazione, a valle di un'onerosa fase di trattamento dei dati, ho elaborato i diagrammi di carico di ogni linea e per entrambe le direzioni, propedeutici alla determinazione della frazione di utenza coinvolta dall'intervento di adeguamento infrastrutturale che riguarderà le linee in attraversamento di Piazza Cordusio.

Ricordiamo infatti che l'attività prevede di segmentare le linee diametrali considerate così suddivise in due porzioni radiali, che si atterranno ai nuovi capilinea tronchi (descritti al Par. 5.4), funzionali all'impiego di mezzi bidirezionali.

Gli utenti in attraversamento e, quindi, interessati da tali modifiche sono stati determinati e distinti per linea, direzione e distanza percorsa oltre Piazza Cordusio.

A tal proposito, ho individuato delle fermate/zone di riferimento identificative della rispettiva micro-area di destinazione e peculiari a ciascuna linea, rispetto alle quali quantificare la frazione di utenti presenti in vettura e quelli in destinazione, in modo da comprendere la portata della domanda in attraversamento.

In tal senso, data l'asimmetria dell'area centrale soggetta alla riqualificazione, lungo l'asse Nord – Sud le località scelte sono tre/quattro nel quadrante meridionale (rispettivamente: Piazza Cordusio, Duomo, Carrobbio/Missori e Beccaria – si veda Fig. 5.28), a seconda della linea considerata, e due in quello settentrionale (ossia Ponte Vetero/Cusani e Marengo/Lanza – si veda Fig. 5.29) indistintamente per tutte le linee.

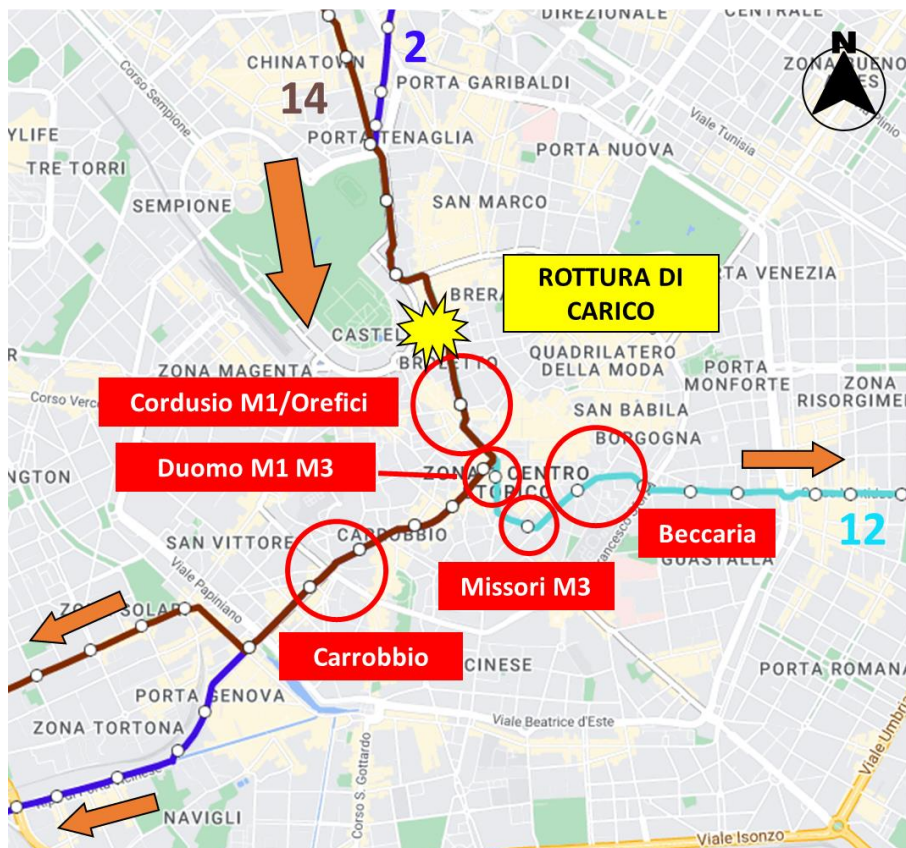


Fig. 5.28 Micro-aree di riferimento lato Sud

Percorrendo il ramo Nord, il nuovo attestamento sarà adiacente a Largo Cairoli, non lontano dell'attuale fermata di Via Ponte Vetero/Cusani; pertanto, gli utenti insoddisfatti sono quelli già saliti che attraversano P.za Cordusio e vanno oltre.

In senso contrario, il nuovo attestamento sarà posto nei pressi di Piazza Cordusio, in Piazza Edison, ove attualmente non è presente l'infrastruttura; pertanto, gli utenti insoddisfatti sono quelli presenti in vettura che attraversano P.za Cordusio e proseguono.

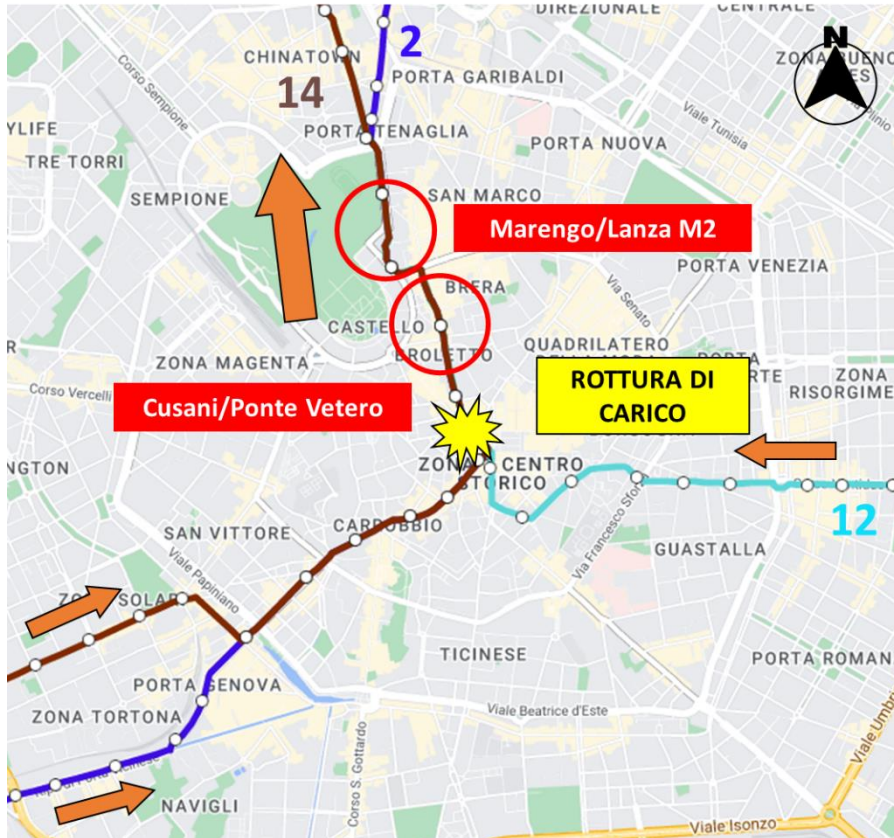


Fig. 5.29 Micro-aree di riferimento lato Nord

Peraltro, rispetto alla frazione di utenti interessata, ci si dovrà interrogare con quali modalità alternative, preferibilmente leggere, potrà essere soddisfatta tale esigenza di mobilità residua.

Una volta inquadrato il contesto e fatte le dovute precisazioni riguardanti la logica operativa, nel seguito analizzerò singolarmente le linee attenzionate, commentando il criterio analitico perseguito nella trattazione dei dati.

LINEA 2 Bausan-Negrelli:

➤ direzione Negrelli:

Le tre zone di destinazione prese come riferimento e mediante le quali identifico delle microaree del centro storico di Milano a distanza crescente dal luogo di intervento, ossia Piazza Castello, sono:

- zona 1 = Piazza Cordusio/Orefici;
- zona 2 = Duomo;
- zona 3 = Largo Carrobbio.



Fig. 5.30 Tratto centrale linea 2 – direzione Negrelli

➤ direzione Bausan:

Analogamente, in direzione Nord, le due località di destinazione prese come riferimento, rispetto al nuovo capolinea sito in Piazza Edison, sono:

- zona 1 = Cusani;
- zona 2 = Lanza/Marengo.



Fig. 5.31 Tratto centrale linea 2 – direzione Bausan

Nella tabella seguente sono mostrati i passeggeri passanti per entrambe le direzioni sulla linea 2 nella biora di punta; colgo ancora una volta l’occasione di ricordare che i luoghi evidenziati hanno valenza solo indicativa, dato che potrebbero non coincidere con la zonizzazione sulla quale è implementato il modello di simulazione (es. Marengo è interposta fra la fermata di Lanza M2 ed Arena).

In attestamento	Bausan (Nord) → Negrelli (Sud)	Negrelli (Sud) → Bausan (Nord)
Presenti in vettura	255	276

Tab. 5.1 Utenti in attraversamento sulla linea 2 – biora di punta situazione attuale

LINEA 12 Roserio-Molise:

➤ direzione Molise:

Su questo ramo, in destinazione, ho individuato quattro zone di pertinenza, ossia:

- zona 1 = Piazza Cordusio/Orefici;
- zona 2 = Duomo;
- zona 3 = Missori;
- zona 4 = Beccaria/Larga).

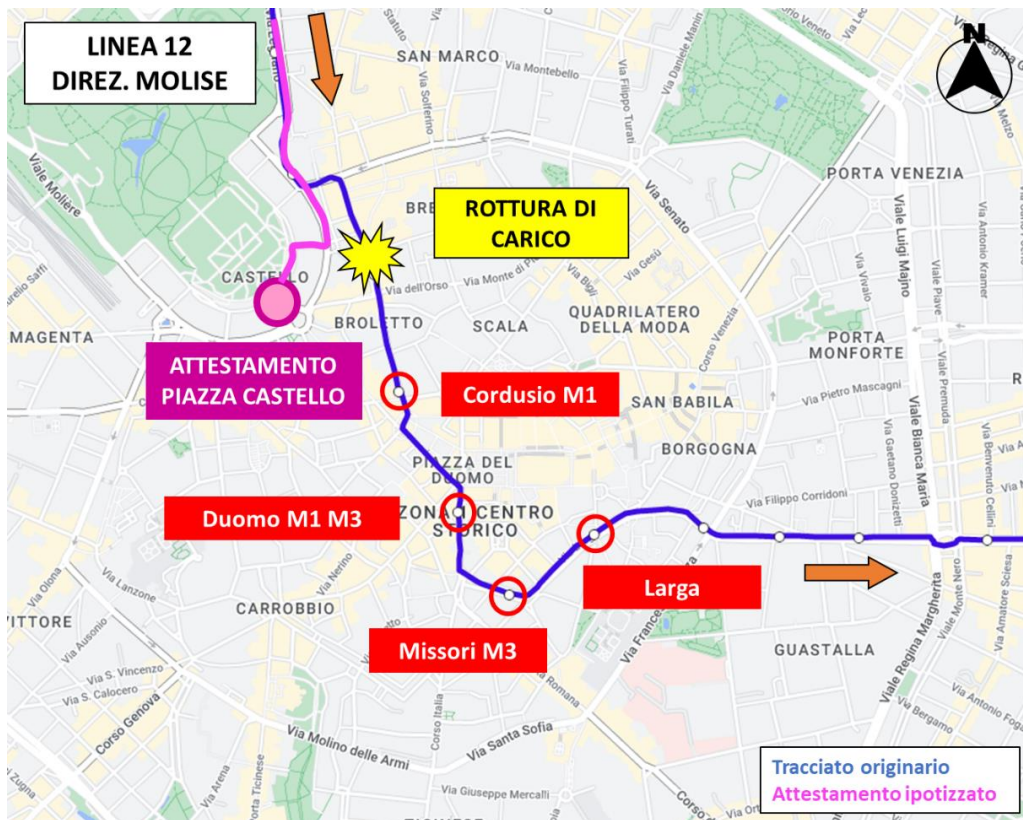


Fig. 5.32 Tratto centrale linea 12 – direzione Molise

➤ direzione Roserio:

Con riferimento a questo ramo della linea si può facilmente comprendere che le vetture atterreranno al nuovo hub tranviario di Piazza Missori, non approfondito in questo Studio, che dovrebbe essere realizzato lungo la linea senza la necessità di introdurre nuovi raccordi, come peraltro è indicato nei Piani di sviluppo della rete.

Sebbene per il ramo meridionale della linea 12 il capolinea sia diverso, le due località di destinazione prese come riferimento sono analoghe al caso precedente:

- zona 1 = Cusani;
- zona 2 = Lanza/Marengo.

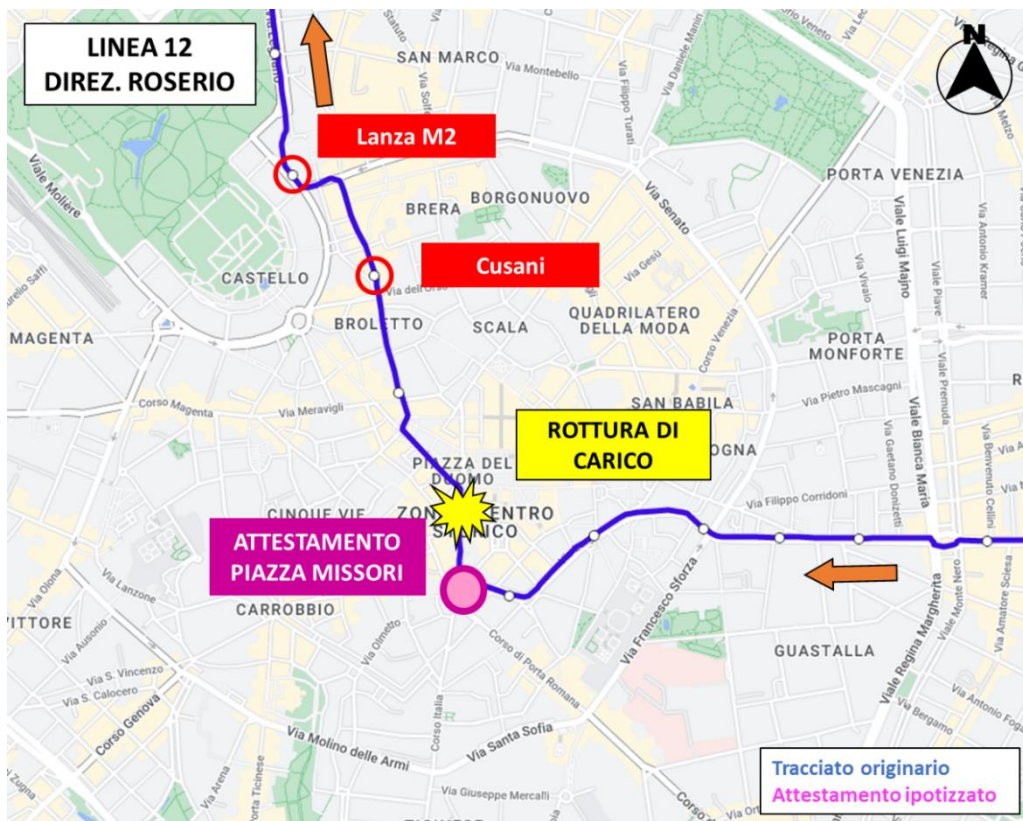


Fig. 5.33 Tratto centrale linea 2 – direzione Bausan

Fatte salve le considerazioni già espresse per la linea precedente, nella tabella sottostante sono tabellati i passeggeri passanti per entrambe le direzioni sulla linea 12 nella biora di punta:

In attestamento	Roserio (Nord) → Molise (Sud)	Molise (Sud) → Roserio (Nord)
Presenti in vettura	1057	582

Tab. 5.2 Utenti in attraversamento sulla linea 12 – biora di punta situazione attuale

LINEA 14 Cimitero Maggiore-Molinetto di Lorenteggio:

➤ direzione Molinetto di Lorenteggio:

Esattamente come per la linea 2 sono state scelte le seguenti località di attinenza:

- zona 1 = Piazza Cordusio/Orefici;
- zona 2 = Duomo;
- zona 3 = Largo Carrobbio).



Fig. 5.34 Tratto centrale linea 14 – direzione Molinetto di Lorenteggio

➤ direzione Cimitero Maggiore:

Con la stessa logica discussa nei casi precedenti, i luoghi di pertinenza che ho scelto sono:

- zona 1 = Cusani;
- zona 2 = Lanza/Marengo.



Fig. 5.35 Tratto centrale linea 14 – direzione Cimitero Maggiore

Vale quanto scritto per le altre linee, pertanto ci si limita a tabellare i dati riferiti all'utenza passante per Piazza Cordusio.

In attestamento	Cim. Magg. (Nord) → M.tto di Lorenteg. (Sud)	M.tto di Lorenteg. (Sud) → Cim. Magg. (Nord)
Presenti in vettura	1281	523

Tab. 5.3 Utenti in attraversamento sulla linea 14 – biora di punta situazione attuale

Sommando i valori tabellati riferiti alle tre linee analizzate si desume che nella biora di punta mattinale, oggi sono interessati da tale intervento circa **4000 utenti**, come tabellato di seguito:

Totale utenti in attraversamento		% sul totale di saliti
NORD → SUD	2593	49,7
SUD → NORD	1381	16,9
In Piazza Cordusio	3974	29,7

Tab. 5.4 Totale di utenti in attraversamento sulle tre linee – situazione attuale

Rispetto ai risultati mostrati ho poi voluto distinguere la frazione di utenza in attraversamento per zone percorse e per destinazioni mediante i seguenti passaggi analitici:

- in primis ho determinato il totale di utenti presenti in vettura nella nuova fermata di attestamento (risp. Cusani da Nord e Piazza Cordusio da Sud), come descritto in precedenza;
- quindi ho calcolato la frazione di utenti in attraversamento presente nelle differenti fermate di riferimento;
- infine, sottraendo l'ultima quantità alla prima ho così stimato il numero di passeggeri in attraversamento aventi destinazione nella rispettiva fermata.

Inoltre, il calcolo della percentuale di utenti in attraversamento per ogni direttrice è stato realizzato considerando la sommatoria di utenti saliti entro la nuova stazione di attestamento, in quanto i restanti non saranno interessati dall'intervento di adeguamento in esame.

Si riassumono di seguito i valori numerici desunti dai passaggi analitici descritti finora:

utenti in attraversamento da NORD		% sul tot. da NORD
passanti in zona 1	2344	90,4
passanti in zona 2	1216	46,9
passanti in zona 3	499	19,2
passanti in zona 4	253	9,8

Tab. 5.5 Frazione di utenti in attraversamento da Nord nelle zone di riferimento – situazione attuale

Quindi, provenendo da Nord, il numero di utenti in attraversamento di Piazza Cordusio, oltrepassata la stessa, subisce una riduzione progressiva con tasso di dimezzamento ad ogni zona percorsa (si vedano le percentuali nella tabella precedente).

Inoltre, sempre con riferimento ai medesimi dati, appare molto rilevante la percentuale di utenti che, provenienti dal quadrante settentrionale, attraversano Piazza Cordusio, segno della grande attrattività della zona.

Allo stesso tempo, come si evince dalla tabella seguente, il trend di decrescita si mostra più contenuto in senso opposto; per di più è molto minore il tasso di utenti che, originando da Sud, ha l'esigenza di attraversare la Piazza, forse grazie alla maggiore predisposizione all'interscambio oppure semplicemente perché i poli attrattori sono localizzati lungo linea prima della rottura di carico.

utenti in attraversamento da SUD		% sul tot. da SUD
passanti in zona 1	716	51,8
passanti in zona 2	502	36,4
passanti in zona 3	-	-
passanti in zona 4	-	-

Tab. 5.6 Frazione di utenti in attraversamento da Sud nelle zone di riferimento – situazione attuale

Tutto ciò testimonia che una frazione non trascurabile di passeggeri in attraversamento di Cordusio ha comunque l'esigenza di percorrere più zone dell'area centrale oltre la Piazza e non solo un breve tratto.

Quindi, in caso di segmentazione, potrebbe emergere una criticità nel soddisfacimento di questo bisogno di mobilità anche qualora venga prevista l'integrazione del servizio con modalità leggere alternative.

Per completare il quadro, mi sono poi domandato quanti fossero gli utenti che oltre ad attraversare il nodo di Cordusio fossero destinati specificatamente ad una zona piuttosto che ad un'altra; pertanto, sempre servendomi del modello di assegnazione ho determinato, per ogni località di riferimento, la frazione di utenti ivi in destinazione.

utenti in attraversamento da NORD		% sul tot. da NORD
destinati in zona 1	249	9,6
destinati in zona 2	1128	43,5
destinati in zona 3	717	27,7
destinati in zona 4	216	8,3

Tab. 5.7 Frazione di utenti destinati da Nord alle zone di riferimento– situazione attuale

Dalla tabella precedente si può osservare che della grande mole di utenti in attraversamento da Nord, solo una porzione contenuta sia effettivamente diretta in zona 1, ossia in Cordusio, mentre molto consistente è la percentuale di destinatari in zona 2 e 3 (Duomo e Carobbio rispettivamente).

La parte residuale in attraversamento va quasi ad esaurirsi entro il perimetro della Cerchia dei Navigli, a riprova che la maggior parte degli attraversamenti si esaurisce in zona centrale.

Con riferimento al ramo contrapposto, si nota invece che i passanti diretti oltre Cordusio scendono prevalentemente a Cusani.

utenti in attraversamento da SUD		% sul tot. da SUD
destinati in zona 1	665	48,2
destinati in zona 2	214	15,5
destinati in zona 3	-	-
destinati in zona 4	-	-

Tab. 5.8 Frazione di utenti destinati da Sud alle zone di riferimento– situazione attuale

Quanto anticipato per i passeggeri in attraversamento viene riconfermato dall'analisi dei poli di destinazione, che sostanzialmente sono defilati rispetto alla zona più centrale, segno che la rottura di carico intermedia possa generare un aumento del tempo di viaggio effettivo dovuto all'interscambio obbligato e un conseguente disagio per l'utenza.

5.4.2 Utenza coinvolta – scenario futuro

L'analisi numerica sopra-esposta permette di stimare la portata del fenomeno di attraversamento indagato, ossia della frazione di utenza che, passando oltre Cordusio, oggi sarebbe interessata dall'attività di adeguamento.

Al contempo, però, ci si dovrà interfacciare anche con un contesto mutevole, dipendente parimenti dall'evoluzione dell'offerta di servizio e della rete infrastrutturale e, quindi, non solamente correlate al sistema tranviario urbano.

Pertanto, nel modello di simulazione, sono stati introdotti altri dati in *input* comprendenti le modifiche ad oggi previste sulla rete tranviaria e quella metropolitana/ferroviaria, in particolare:

- prolungamento della linea M1 fino a Monza Bettola;
- attivazione della linea M4;
- adeguamento e potenziamento della rete tranviaria in accordo al PdB e PUMS del Comune di Milano;
- riqualificazione del sistema di segnalamento della linea M2;
- realizzazione della *circle line* ferroviaria a collegamento dell'area Nord-Occidentale della periferia di Milano con quella Sud-Occidentale (Rho-Albairate).

L'approccio analitico che ho utilizzato per lo studio dello scenario futuro ricalca pedissequamente quello commentato in precedenza per i dati attuali, pertanto si omettono i passaggi ed i ragionamenti già affrontati.

Discorso analogo vale anche per le località di riferimento (rispetto alle quali sono stati determinati gli utenti in attraversamento) che rimangono inalterate in quanto le modifiche di percorso previste su alcune linee riguardano solamente i tratti periferici.

Vengono ora esaminate singolarmente le linee attenzionate con il medesimo ordine di prima.

LINEA 2 Bovisa FN-San Cristoforo:

Come si evince dalla nomenclatura della linea, è previsto il prolungamento in direzione Nord della stessa per realizzare l'interscambio con la stazione ferroviaria suburbana di Milano Bovisa che, peraltro, rappresenta la stazione più prossima all'omonimo polo universitario del Politecnico di Milano.

Parimenti, il tratto meridionale subirà un'estensione con attestamento tronco fino all'incrocio con via Manfredonia, posta in prossimità della stazione ferroviaria suburbana di Milano San Cristoforo, così da facilitarne l'accesso, previa opera di scavalco del Naviglio Grande, che oggi è pregiudicato da un interscambio oggettivamente scomodo se effettuato a piedi.

Senza ripetere procedimenti già visti prima per l'analisi numerica degli utenti attuali, seguono i valori tabellati degli utenti in attraversamento nello scenario evolutivo.

In attestamento	Bovisa (Nord) → S.Cristoforo (Sud)	S.Cristoforo (Sud) → Bovisa (Nord)
Presenti in vettura	220	293

Tab. 5.9 Utenti in attraversamento sulla linea 2 – biora di picco scenario futuro

LINEA 12 Roserio-Molise:

La modellazione non considera alcuna modifica di tracciato per tale linea, pertanto si assume che l'attestamento in Cairoli anticipato dal PUMS di Milano non sia ancora realizzato.

Analogamente a prima, seguono i valori tabellati degli utenti in attraversamento riferiti alla situazione prevista.

In attestamento	Roserio (Nord) → Molise (Sud)	Molise (Sud) → Roserio (Nord)
Presenti in vettura	1189	612

Tab. 5.10 Utenti in attraversamento sulla linea 12 – biora di picco scenario futuro

LINEA 14 Cimitero Maggiore-Gratosoglio:

Nel ramo superiore la linea si mantiene inalterata rispetto allo scenario attuale, mentre in quello inferiore, in prossimità della località di Carrobbio, il tracciato devia seguendo pedissequamente parte della linea 3 (Duomo-Gratosoglio) che verrà sostituito da tale servizio.

Ciò rappresenta una scelta trasportistica funzionale all'ormai annunciata attivazione della linea metropolitana M4, con la quale l'attuale linea 14 entrerebbe in concorrenza, visto la vicinanza ed il parallelismo dei due percorsi.

Ancora una volta in tabella si riportano i valori degli utenti in attraversamento nel panorama modificato.

In attestamento	Cim. Maggiore (Nord) → Gratosoglio (Sud)	Gratosoglio (Sud) → Cim. Maggiore (Nord)
Presenti in vettura	1339	683

Tab. 5.11 Utenti in attraversamento sulla linea 14 – biora di picco situazione futura

Dalla somma dei valori tabellati si desume che nella biora di punta mattinale, nello scenario futuro, si prevede possano essere interessati da tale intervento **oltre 4000 utenti, con un incremento pari a circa il 10% rispetto alla situazione odierna**, come riassunto di seguito:

Totale utenti in attraversamento		% sul totale di saliti
NORD → SUD	2748	36,2
SUD → NORD	1588	21,2
In Piazza Cordusio	4336	28,8

Tab. 5.12 Totale di utenti in attraversamento sulle tre linee – situazione futura

La quantificazione della frazione di passanti e destinatari per zona è stata compiuta come descritto nel sotto-paragrafo precedente, pertanto in questa sede evita di ripetere il *modus operandi* seguito.

Sono qui tabellati i valori numerici desunti dalle calcolazioni effettuate:

utenti in attraversamento da NORD		% sul tot. da NORD
passanti in zona 1	2395	87,2
passanti in zona 2	1123	40,9
passanti in zona 3	617	22,5
passanti in zona 4	264	9,6

Tab. 5.13 Frazione di utenti in attraversamento da Nord delle zone di riferimento – situazione futura

Anche nello scenario evolutivo evidenzio il trend già riscontrato nello schema attuale, ossia un'estesa platea di utenti che, provenienti da Nord, attraversano Piazza Cordusio e, in particolare le zone adiacenti ad essa.

Analogamente a quanto visto prima, da Sud la percentuale di passanti è più contenuta, pur essendo comunque significativa.

utenti in attraversamento da SUD		% sul tot. da SUD
passanti in zona 1	837	52,7
passanti in zona 2	625	39,4
passanti in zona 3	-	-
passanti in zona 4	-	-

Tab. 5.14 Frazione di utenti in attraversamento da Sud delle zone di riferimento – situazione futura

In particolare, dai risultati si evince che anche nello scenario evolutivo è riscontrabile un tasso di decremento di utenza in transito proveniente da Nord con progressivo dimezzamento su ciascuna zona attraversata, mentre si mantiene più ridotto controverso.

La trattazione numerica degli utenti in attraversamento si chiude con i valori attribuiti ai destinatari, distinti sempre per zona e direttrice.

utenti in attraversamento da NORD		% sul tot. da NORD
destinati in zona 1	353	12,8
destinati in zona 2	1272	46,3
destinati in zona 3	506	18,4
destinati in zona 4	174	6,3

Tab. 5.15 Frazione di utenti destinati da Nord alle zone di riferimento – situazione attuale

Buona parte degli utenti in attraversamento da Nord sono diretti in zona 2 e 3 (Duomo e Carrobbio), esattamente come per lo scenario attuale, mentre ancor più limitata è la frazione di utenti residuali che attraversano tali zone, riversandosi in zona 4 o, addirittura, esternamente alla Cerchia dei Navigli.

Con riferimento ai dati dei passanti provenienti da Sud, si vede ancora una volta che l'estesa maggioranza è diretta in zona 1, ossia a Cusani, segno che non è così rilevante l'esigenza di mobilità oltre Piazza Cordusio.

utenti in attraversamento da SUD		% sul tot. da SUD
destinati in zona 1	751	47,3
destinati in zona 2	212	13,4
destinati in zona 3	-	-
destinati in zona 4	-	-

Tab. 5.16 Frazione di utenti destinati da Sud alle zone di riferimento – situazione attuale

In prima impressione questi risultati potrebbero sembrare poco significativi per lo Studio, invece così non è poiché si possono riscontrare dei fenomeni interessanti, i quali peraltro hanno influenzato il metodo che ho impiegato successivamente per l'analisi numerica della rete segmentata.

Infatti, richiamando quanto scritto finora, si può riconoscere che:

- la quasi totalità degli utenti provenienti dai rami settentrionali dei percorsi tranviari attraversano Piazza Cordusio;
- circa metà degli utenti che originano dal quadrante meridionale necessita di attraversare Piazza Cordusio;
- degli utenti provenienti da Nord, la maggior parte è destinata in zona 2 (Duomo) e 3 (Carobbio), meno in zona 1 (Cordusio) e in misura ancora minore in zona 4 (Larga), mentre quasi trascurabile è l'utenza in attraversamento diretta esternamente alla Cerchia dei Navigli;
- coloro che giungono da Sud sono per lo più diretti in zona 1 (Cusani);
- in base ai risultati percentuali ed anche ai valori numerici, sembrerebbe che l'esigenza di mobilità di attraversamento sia maggiore per gli utenti che vengono dai rami settentrionali rispetto a quelli meridionali (probabilmente perché chi arriva da Sud giunge a destinazione già prima di Piazza Cordusio);
- il dimensionamento del servizio di trasporto dovrebbe tenere conto dello sbilanciamento di carico evidenziato nelle due direttrici, velocizzando e facilitando l'attraversamento e gli interscambi per chi proviene soprattutto da Nord.

6 – Evoluzione della domanda di trasporto attesa

I provvedimenti infrastrutturali che ho discusso nel capitolo precedente influiranno direttamente sia sull'utenza che oggi utilizza il servizio di trasporto offerto sia su quella prevista nel futuro, alla luce delle modifiche anticipate dai Piani di Sviluppo della rete.

Affinché possa essere valutata la sensibilità degli utilizzatori alle variazioni di rete è stato necessario aggiornare i parametri di input del modello di assegnazione, imponendo la segmentazione delle tre linee tranviarie in attraversamento di Piazza Cordusio da/per via Broletto (ossia la 2, 12 e 14). Questo ha generato inevitabilmente tre linee aggiuntive, poiché ho distinto il ramo settentrionale da quello meridionale di ciascuna linea considerandole di fatto del tutto indipendenti; oltretutto, gli interventi ipotizzati propongono la modifica fisica del percorso nei tratti di raccordo ai nuovi attestamenti tronchi di Cairoli/Edison e Missori.

Va precisato che nel definire le caratteristiche del servizio offerto nei tratti di raccordo da realizzare ex novo mi sono riferito a quelle degli archi di percorso adiacenti, data l'esigua distanza fra le fermate e la parziale condivisione del tracciato (ad esempio per il tratto che va da Lanza a Cairoli passando per Quintino Sella/Piazza Castello ho considerato le proprietà riferite alla linea 4, che però lo percorre in senso invertito); inoltre, ho deciso di non introdurre altri nodi di riferimento, data la limitatezza dell'area esaminata.

Analogamente a quanto fatto per l'analisi numerica dell'utenza nello scenario di rete attuale (rif. Par. 5.4.1) e in quello consolidato dei Piani di Sviluppo (PUMS di Milano e PdB – rif. Par. 5.4.2), qui di seguito presenterò e commenterò i valori degli attraversamenti riferiti allo schema di rete con le ipotesi di segmentazione che ho discusso nel capitolo precedente.

Preme sottolineare che tali risultanze numeriche sono frutto di un'attività di manipolazione degli input di rete che ho eseguito, non senza di difficoltà, sul modello di assegnazione; è stato infatti necessario creare tre linee nuove e modificarne altrettante, dato che la segmentazione genera tre coppie di linee, attribuirgli un percorso fatto di un certo numero di archi e conferirgli le caratteristiche del servizio offerto (frequenza, velocità commerciale, lunghezza, ecc.).

6.1 – Segmentazione delle linee

Per garantire la confrontabilità del disegno di rete segmentata con quello odierno inalterato, ho deciso di mantenere invariati i livelli di servizio offerto (in primis la frequenza) durante il processo di modifica dei parametri caratterizzanti ciascuna linea tranviaria interessata dagli interventi di adeguamento.

Partendo dalla zonizzazione sulla quale si basa il modello di assegnazione impiegato (opportunamente calibrato sulla rete di trasporto di Milano), ho adattato solamente la capacità offerta alla capienza delle vetture bidirezionali, pari a 150 posti cad. (si tratta di un valore cautelativo, poiché teoricamente dovrebbe essere di poco maggiore pur trattandosi solo di stime per ora).

Con lo stesso ordine seguito nel capitolo precedente, analizzerò ciascuna linea, ponendo particolare attenzione ai diagrammi di carico ottenibili a partire dagli *output* numerici della simulazione. In particolare, i valori sono stati estratti nell'applicativo *Microsoft Excel*, mediante una *macro* creata appositamente per rielaborare i dati numerici, renderli così più intellegibili e soprattutto rappresentabili su di un grafico.

6.1.1 Linea 2 segmentata

Alla luce delle modifiche di rete avanzate, la linea 2 subirà inevitabilmente una frammentazione in due parti, dalla quale deriva anche la nomenclatura dei nuovi tratti così ottenuti.

- il ramo Nord, che atterrerà in via Luca Beltrami;
- il ramo Sud, con capolinea in Piazza Tommaso Edison.

LINEA 2 NORD Bausan – Cairolì:

Come si evince dal grafico seguente, il ramo Nord della linea 2 è interessato da un volume di utenza contenuto e pressoché costante, ricalcando l'andamento osservato nei diagrammi di carico riferiti allo scenario di rete attuale, rispetto ai quali si riscontra solamente una sensibile diminuzione del flusso di passeggeri.

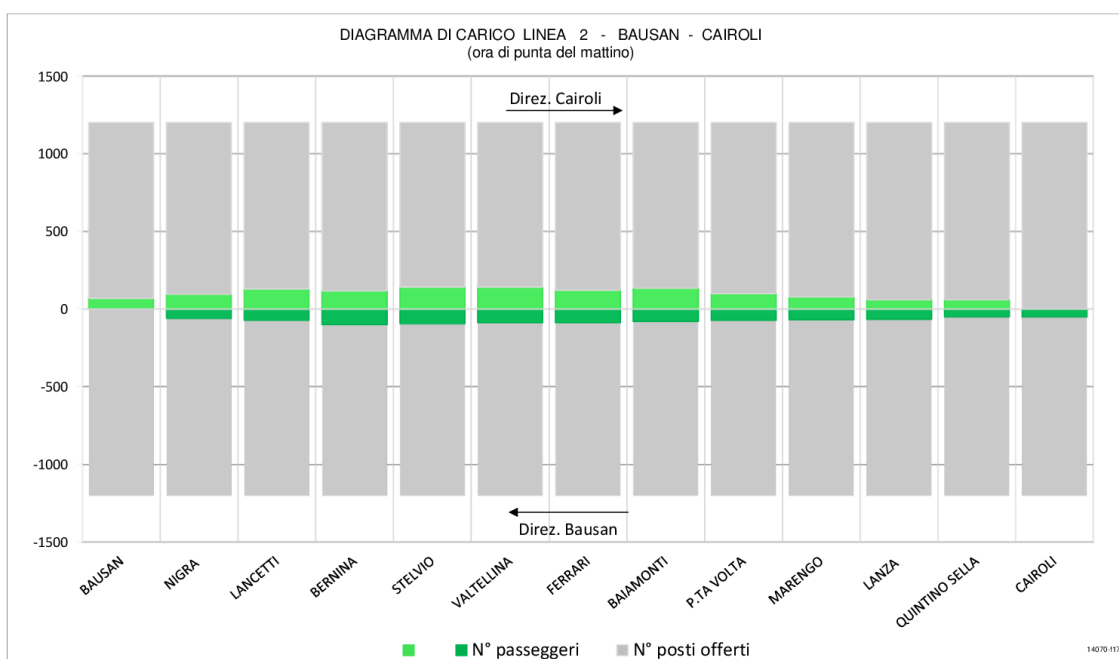


Fig. 6.1 Diagramma di carico linea 2 Nord (Bausan – Cairolì)

Fonte: elaborazione ATM

Il carico si mantiene costante e largamente inferiore alla capacità di servizio offerta in entrambe le direzioni; a tal proposito, si potrebbe pensare di dimensionare un servizio ad hoc limitando l'esubero di offerta, per esempio riducendo la frequenza oraria.

Un'alternativa potrebbe essere quella di utilizzare mezzi meno capienti, contraddicendo però la discussa proposta di adeguamento infrastrutturale, funzionale proprio all'impiego delle vetture bidirezionali in esame.

LINEA 2 SUD Edison – Negrelli:

Dal grafico a barre, in direzione Negrelli, è osservabile una rottura di carico presso le località Resistenza Partigiani e Cantore, motivata probabilmente dalla vicinanza di importanti poli attrattori (in primis l'Università Cattolica) e dell'interscambio con la metro M2 (nella fermata di S. Agostino); segue un aumento del flusso di utenti in corrispondenza della stazione ferroviaria di Porta Genova, nonché capolinea di altre linee tranviarie.

In senso invertito il carico cresce progressivamente fino al tratto compreso fra l'interscambio di Porta Genova e quello di Duomo, in corrispondenza del quale si verifica un'apprezzabile rottura di carico.

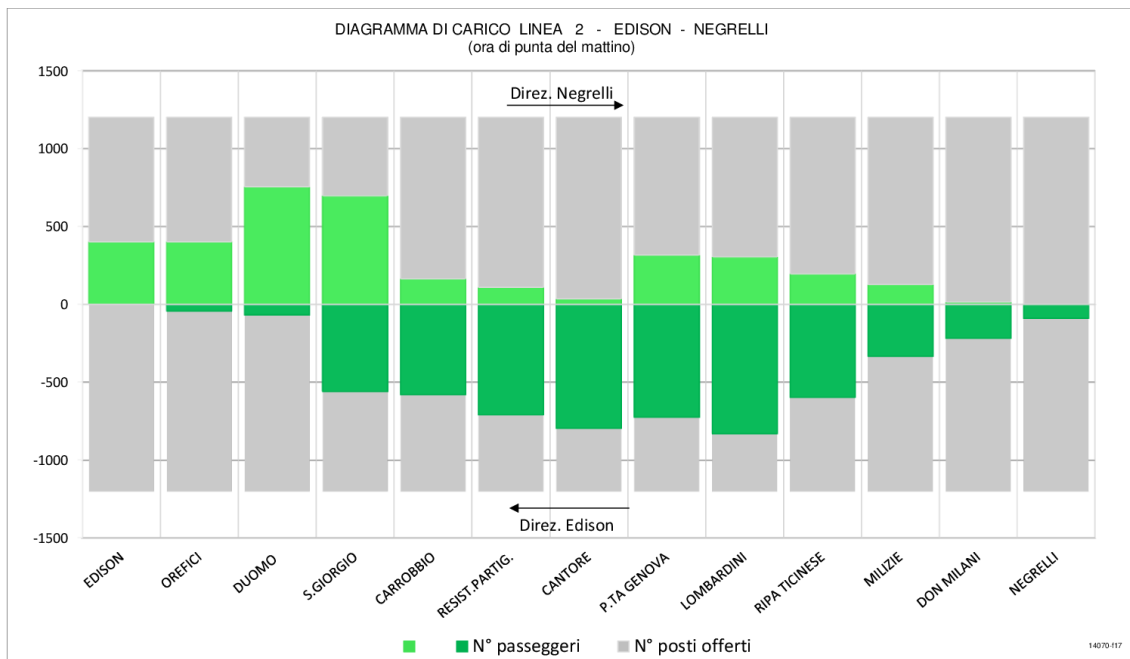


Fig. 6.2 Diagramma di carico linea 2 Sud (Edison – Negrelli)

Fonte: elaborazione ATM

Questo fenomeno dimostra che la segmentazione della linea 2 in Piazza Cordusio, con attestamento in Piazza Edison, agli occhi dell'utenza, non risulta una soluzione efficace per interscambiare con il sistema metropolitano in Cordusio, ragion per cui i passeggeri preferiscono anticipare lo scambio modale in Duomo.

Tale scelta potrebbe essere motivata da un minor tempo di viaggio complessivo e dalla maggiore combinazione di percorsi offerta dall'interscambio in Duomo, presso cui transitano ben due linee metropolitane a dispetto della sola M1 che serve la fermata Cordusio.

6.1.2 Linea 12 segmentata

Analogamente a prima, la linea in questione risente della realizzazione dei nuovi attestamenti tronchi in area centrale, che impone la ripartizione della stessa in due tratte:

- Roserio – Cairolì, con attestamento in via Luca Beltrami;
- Missori – Molise, con capolinea in Piazza Missori.

LINEA 12 NORD Roserio – Cairolì:

L'andamento del carico mostrato in figura segue quello già osservato nella condizione attuale inalterata, specialmente in direzione Roserio, ove non si apprezzano significativi picchi e rotture di carico, con un'offerta di servizio che eccede largamente la domanda prevista.

In particolare, verso Cairolì evidenzio un calo globale del flusso, con picco quasi dimezzato rispetto alla situazione odierna; ciò nonostante, si assiste ad un incremento di flusso in corrispondenza dell'interscambio con la M5 presso le fermate di Gerusalemme, Cenisio e Monumentale.

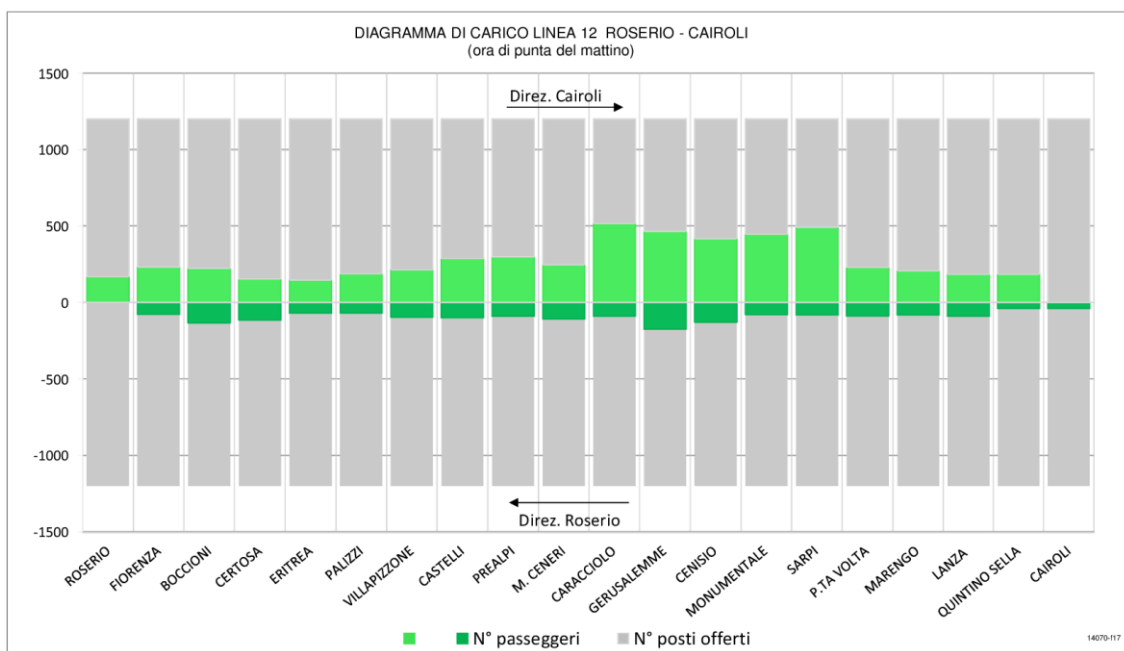


Fig. 6.3 Diagramma di carico linea 12 Nord (Roserio – Cairolì)

Fonte: elaborazione ATM

L'aumento del volume di passeggeri che interscambia con le fermate metropolitane della linea M5 potrebbe essere motivato dalla dilatazione dei tempi di viaggio della linea tranviaria, provocata dall'imposta interruzione della stessa, ipotizzata in questa sede.

LINEA 12 SUD Missori – Molise:

Rispetto alla situazione attuale, il tratto meridionale della linea subisce un calo vistoso dell'utenza che, in realtà, già oggi risulta contenuta.

Probabilmente ciò è motivato dalla limitata estensione di questa nuova tratta, la quale potrebbe quindi essere sostituita da un altro servizio di trasporto più competitivo, efficace ed efficiente, come la linea tranviaria 27, con la quale, oggi, condivide buona parte del tracciato.

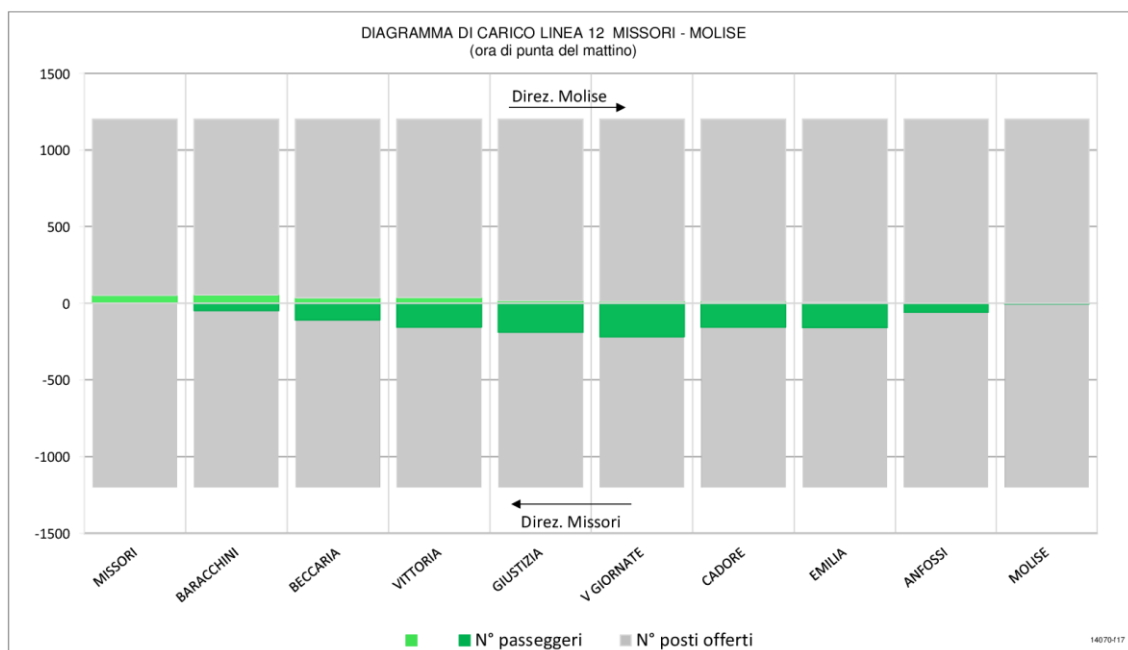


Fig. 6.4 Diagramma di carico linea 12 Sud (Missori – Molise)

Fonte: elaborazione ATM

Dal grafico a barre sembra infatti annullarsi quasi del tutto il flusso diretto a Molise, mentre, controverso, l'evoluzione del carico è certamente più apprezzabile, con riempimento crescente soprattutto in corrispondenza dell'interscambio con la filovia 92 presso Cantore.

6.1.3 Linea 14 segmentata

Valgono le considerazioni fatte per la linea 2, visto che con essa condivide entrambi gli attestamenti tronchi, individuando le tratte:

- Cimitero Maggiore – Cairolì, con capolinea in via Luca Beltrami;
- Edison – Molinetto di Lorenteggio, con attestamento in Piazza Edison.

Colgo l'occasione per ricordare che tale linea è oggi annoverata fra le linee di forza, però con l'attivazione della M4, avente tracciato quasi parallelo rispetto al ramo meridionale della tranvia, potrebbe subire una contrazione del flusso di utenti. A tal proposito, il Piano di Bacino ne prevede la riconversione nell'attuale linea 3 (Duomo-Gratosoglio), con l'obiettivo di potenziare la relazione Centro - periferia Sud, lasciata in parte inservita dalla nuova linea metropolitana.

LINEA 14 NORD Cimitero Maggiore – Cairolì:

Confrontando il diagramma di carico della tratta con quello della linea odierna, complessivamente emerge una riduzione dell'utenza, specialmente in direzione centro nel tratto compreso fra gli interscambi con la linea M5 (Portello – Cenisio), ritenuta probabilmente più performante.

Il *trend* si mantiene invece pressoché inalterato in senso opposto, dove si osserva ancora un sostanziale appiattimento del carico fra Monumentale/Garibaldi e Cairolì, probabilmente perché l'utenza reputa più conveniente servirsi del sistema metropolitano per muoversi lungo questo tragitto.

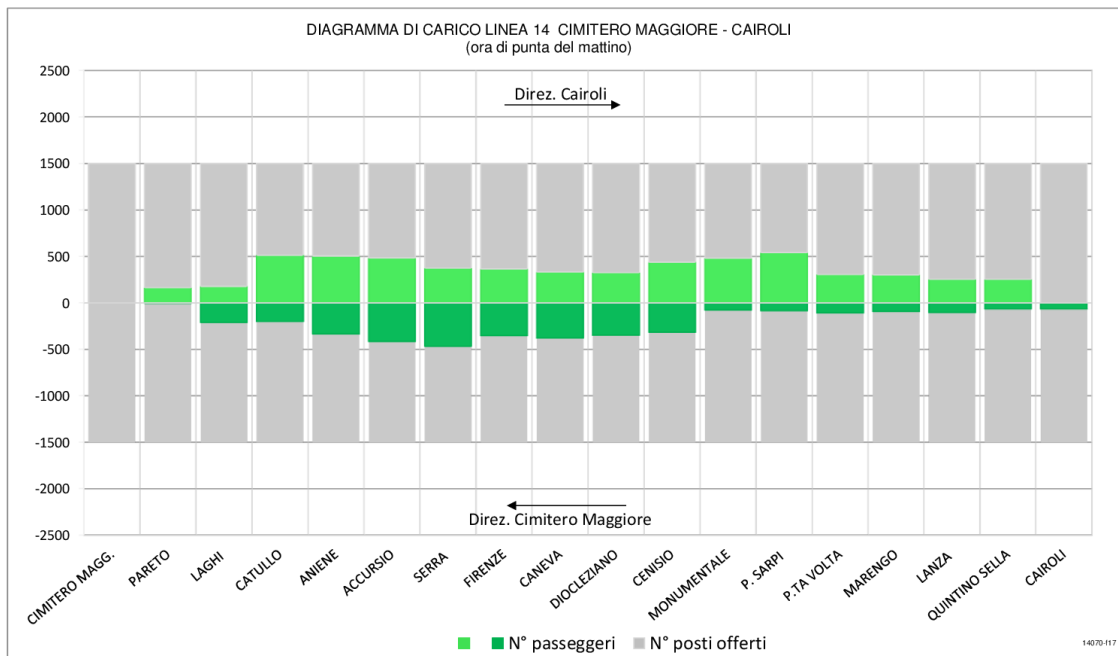


Fig. 6.5 Diagramma di carico linea 14 Nord (Cimitero Maggiore – Cairolì)

Fonte: elaborazione ATM

LINEA 14 SUD Edison – Molinetto di Lorenteggio:

Il tratto meridionale della linea invece non risente in alcun modo del calo di utenza, che si mantiene sui valori originari, a dispetto di quanto ci si potrà attendere con l’attivazione di M4.

In direzione periferia evidenzio il picco di carico presso la stazione Duomo, d’interscambio con il sistema metropolitano, segue un ricarico più isolato presso l’interscambio con la M2 a Sant’Agostino, in zona Solari.

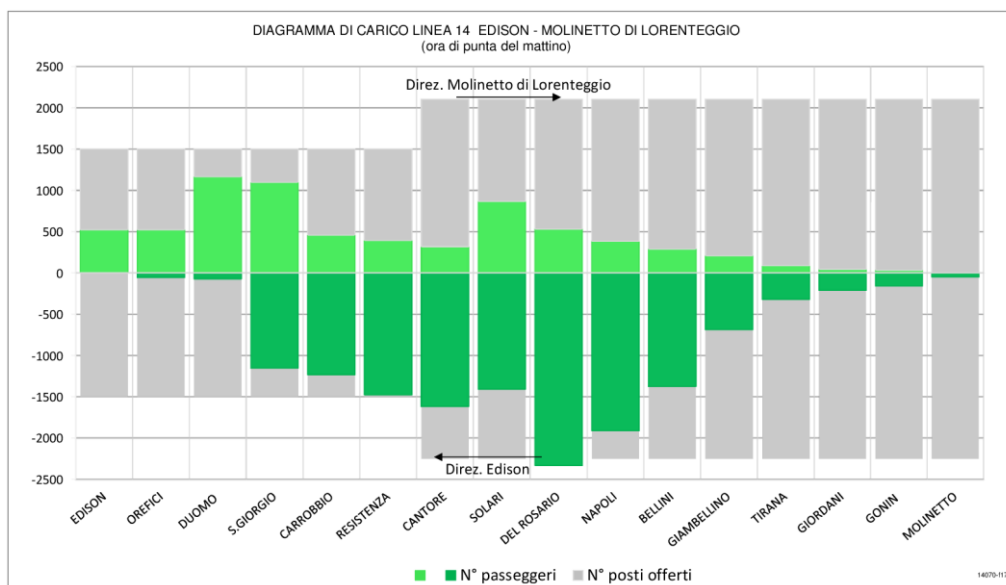


Fig. 6.6 Diagramma di carico linea 14 Sud (Edison – Molinetto di Lorenteggio)

Fonte: elaborazione ATM

Controverso, il tasso di occupazione è nettamente più elevato e progressivamente crescente, con un balzo significativo in corrispondenza della fermata di interscambio con la filovia 90 (circolare destra) presso P.zza Napoli, ove il carico sembra addirittura raggiungere e superare il valore di saturazione. Segue uno scarico parziale, propedeutico al riempimento costante delle fermate successive.

Ben più marcato è lo scarico che si verifica una volta raggiunta l’area centrale, in corrispondenza di via Torino/Duomo, oltre al quale non si assiste ad un ingente ricarico nel ramo ascendente, analogamente a quanto osservato nella situazione attuale.

Questo fenomeno, già riscontrato per la linea 2 (con la quale condivide il percorso in area centrale), sembra certificare che la rete segmentata renda più svantaggioso l’interscambio metropolitano a Cordusio a fronte di una maggiore pressione sulla fermata M1/M3 di Duomo.

Per di più, il servizio offerto, per corrispondere efficacemente ai livelli di domanda, può contare su corse di rinforzo nel tratto periferico maggiormente carico, grazie all’anello di inversione a Porta Genova FS; pertanto, la segmentazione della linea in zona Cordusio garantirebbe maggiore flessibilità al servizio offerto e rappresenta una valida strategia in tal caso.

6.2 – Confronto simulazioni della rete odierna e segmentata

Per apprezzare il peso degli effetti scaturiti dai provvedimenti di frammentazione proposti, ho eseguito un confronto numerico tra i risultati derivanti dal processo di simulazione correlati alla situazione attuale (domanda con rete inalterata) e allo scenario ipotizzato (domanda con rete segmentata), dapprima riferendoli all'intera rete di trasporto di Milano e, poi, concentrandosi specificatamente sulle zone d'influenza delle linee tranviarie in esame.

6.2.1 Dati riferiti all'intera rete

Riguardo all'intera rete di TPL del Comune di Milano, è interessante osservare il modo in cui vengono interpretate, da parte del modello di simulazione, gli effetti sortiti dalle proposte di intervento studiate.

In particolare, canalizzerò l'attenzione sull'evoluzione del numero di utenti simulato nei due scenari di confronto, con l'auspicio di comprendere se sia lecito attendersi una diminuzione complessiva, una crescita degli utilizzatori dei servizi di trasporto oppure ancora una condizione invariata.

Non posso però disaccoppiare questo risultato numerico dagli effetti pratici che tali provvedimenti hanno sul livello di servizio offerto, espresso, in primis, in termini di tempo di viaggio e, conseguentemente, sottoforma di distanza percorsa per singola relazione O-D.

Inoltre, preciso che per garantire una confrontabilità fra gli scenari proposti ho scelto di non modificare gli altri parametri del livello di servizio offerto (quale la frequenza e la velocità commerciale).

Ciò detto, di seguito sono tabellati e comparati i valori numerici per ciascuno scenario di rete proposto, riferiti all'intera rete urbana di Milano.

		UTENTI [-] - ORA DI PUNTA			
		RETE ATTUALE	RETE SEGMENTATA	delta	delta %
NUMERO DI LINEE PER RELAZIONE O-D	0	6.067	6.062	-5	-0,1
	1	156.627	155.119	-1.508	-1,0
	2	227.281	228.280	999	0,4
	3	113.051	113.433	382	0,3
	> 3	21.431	21.533	102	0,5
	tot. Utenti Tpl	518.390	518.365	-25	0,0
	n° medio di linee per relazione O-D	2,0	2,0	0,0	0,0

Tab. 6.1 Confronto del numero di utenti nei diversi scenari – intera rete

Tralasciando il numero di utenti che si prevede percorrano il tragitto a piedi (a cui corrispondono 0 linee per relazione O-D), che si mantiene pressoché inalterato e pari a circa l'1% degli spostamenti complessivi, si evidenzia un calo degli utenti che realizzano lo spostamento servendosi solamente di una linea TPL.

Questa tendenza è giustificabile alla luce dell'ipotizzata segmentazione, la quale impone l'interscambio per gli utenti in attraversamento dell'area centrale; ne consegue un inevitabile aumento dell'utenza che raggiunge la destinazione servendosi di due o più linee di trasporto pubblico.

Questo commento trova conferma anche nel lieve aumento di distanza che viene mediamente percorsa dagli utenti facenti uso di un'unica linea per coprire la relazione O-D, mentre ciò sembra non essere vero per chi si serve di più linee, come indicato dai valori in tabella sottostante.

		DISTANZA MEDIA PERCORSA [m] - ORA DI PUNTA			
		RETE ATTUALE	RETE SEGMENTATA	delta	delta %
NUMERO DI LINEE PER RELAZIONE O-D	0	723	724	1	0,1
	1	7.536	7.567	31	0,4
	2	16.439	16.405	-34	-0,2
	3	21.673	21.586	-87	-0,4
	> 3	26.295	26.253	-42	-0,2
distanza media pesata - utenti Tpl		15.298	15.303	5	0,0

Tab. 6.2 Confronto della distanza percorsa nei diversi scenari – intera rete

Infine, seppur non sembra essere particolarmente significativo dal punto di vista numerico e della discussione, per completezza sono riportati i dati riferiti al tempo di viaggio.

Tale parametro è sostanzialmente immutato nel caso in cui venga usata una sola linea TPL, tanto che sembra essere compensato l'incremento di distanza atteso, mentre osservo una leggera contrazione degli intervalli temporali di viaggio richiesti agli utenti che si servono di più linee, in accordo a quanto detto per la distanza percorsa.

		TEMPO MEDIO DI VIAGGIO [sec] - ORA DI PUNTA			
		RETE ATTUALE	RETE SEGMENTATA	delta	delta %
NUMERO DI LINEE PER RELAZIONE O-D	0	713	713	0	0,0
	1	1.831	1.831	0	0,0
	2	3.019	3.013	-6	-0,2
	3	3.897	3.887	-10	-0,3
	> 3	4.859	4.855	-4	-0,1
tempo medio pesato - utenti Tpl		2.928	2.927	-1	0,0

Tab. 6.3 Confronto del tempo di viaggio nei diversi scenari – intera rete

6.2.2 Dati riferiti alle zone O-D interessate dai percorsi tranviari

Calandosi nello specifico, ho poi voluto approfondire il confronto numerico della domanda simulata fra lo scenario di rete pre e post intervento, riferendomi però al territorio interessato dai tracciati delle linee tranviarie analizzate (rispettivamente 2, 12 e 14). A valle di questa comparazione, sarà inoltre interessante evidenziare l'eventuale correlazione fra gli effetti risentiti a livello di micro-area e quelli a scala comunale.

A ben vedere, non mi sono limitato alle zone attraversate dagli itinerari tranviari, bensì ho considerato caso per caso l'area di influenza degli stessi sulle zone limitrofe, correlandola all'assetto viario ed urbano che le caratterizza.

La porzione di territorio così individuata è suddivisa in una settantina di zone che si sviluppano lungo le linee e poi a raggiera rispetto a quella più centrale, che possiamo ritenere baricentrica su Piazza Duomo.

Per una maggiore comprensione della logica adoperata, ho suddiviso l'area in esame in tre parti distinte che rispettivamente identificano:

- la porzione settentrionale dei tracciati;
- la porzione centrale dei tracciati (con tratte in condivisione);
- la porzione meridionale dei tracciati;

mostrate nelle seguenti elaborazioni grafiche, che ho prodotto con molta attenzione e dovizia di particolari, cercando di evidenziare le zone prese in considerazione nell'analisi numerica, senza però pregiudicare la chiarezza rappresentativa dell'immagine.

Nella prima immagine ho riprodotto il quadrante centrale di Milano, dove le linee, allo stato attuale, si sovrappongono lungo via Broletto e via Orefici.

Per di più, come ho già avuto modo di scrivere, l'analisi degli attraversamenti sulla rete odierna fa emergere che gran parte degli utenti delle linee tranviarie in esame ha come destinazione una fermata compresa nella Cerchia dei Navigli; pertanto, ho scelto di esaminare tutte le zone che la caratterizzano, pur non essendo tutte nel raggio di influenza delle tranvie.

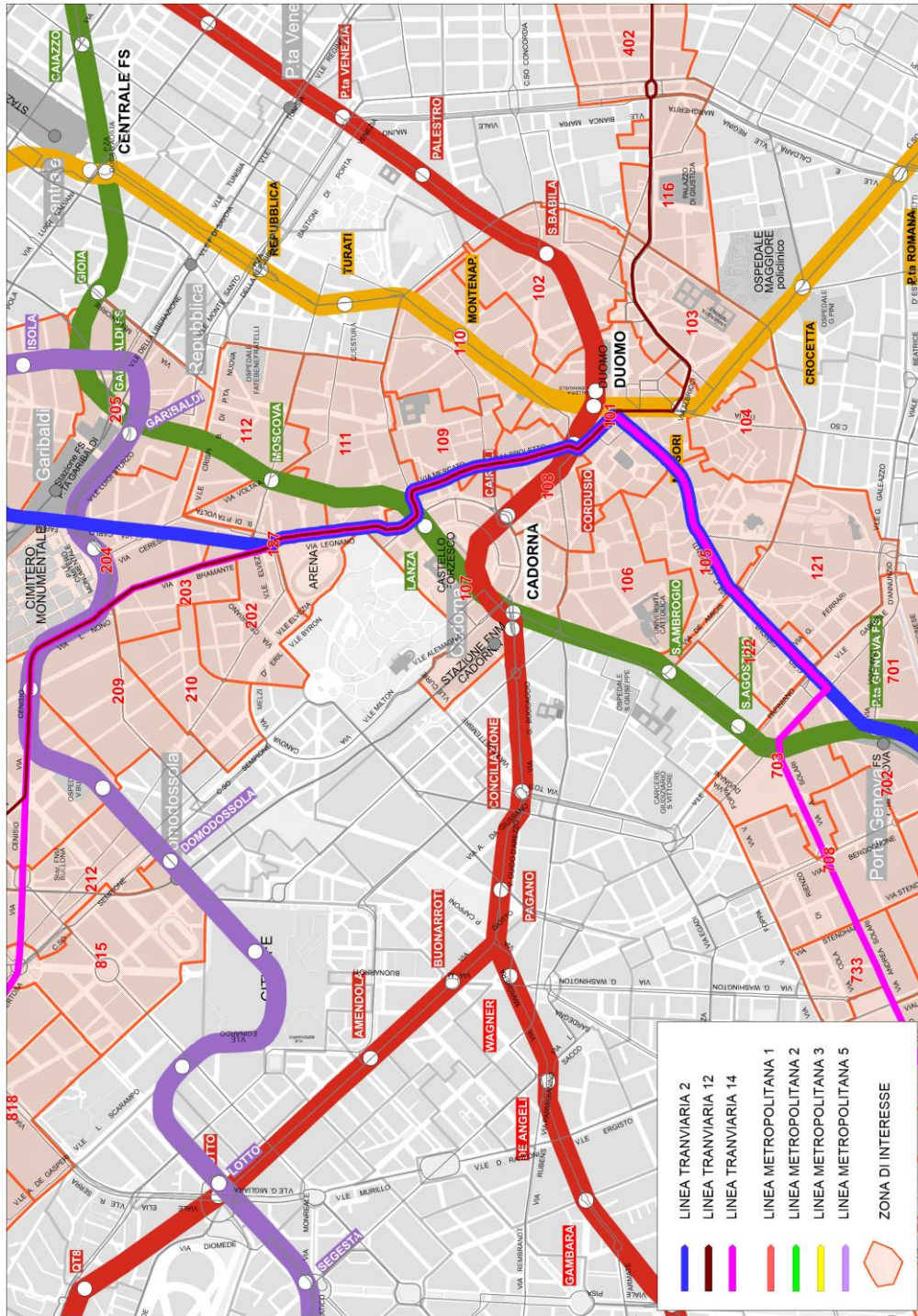


Fig. 6.7 Zonizzazione impiegata dal modello – Quadrante Centro

Fonte: elaborazione ATM

Sebbene con un livello di dettaglio minore, dovuto alla vista più estesa, ho raffigurato il quadrante settentrionale, nel quale le linee 12 e 14 hanno un tracciato quasi parallelo ed individuano un'ampia fascia di influenza interposta fra i percorsi della linea M1 ed M3, garantendo un servizio essenziale per coloro che originano e/o sono diretti lungo tale direttrice.

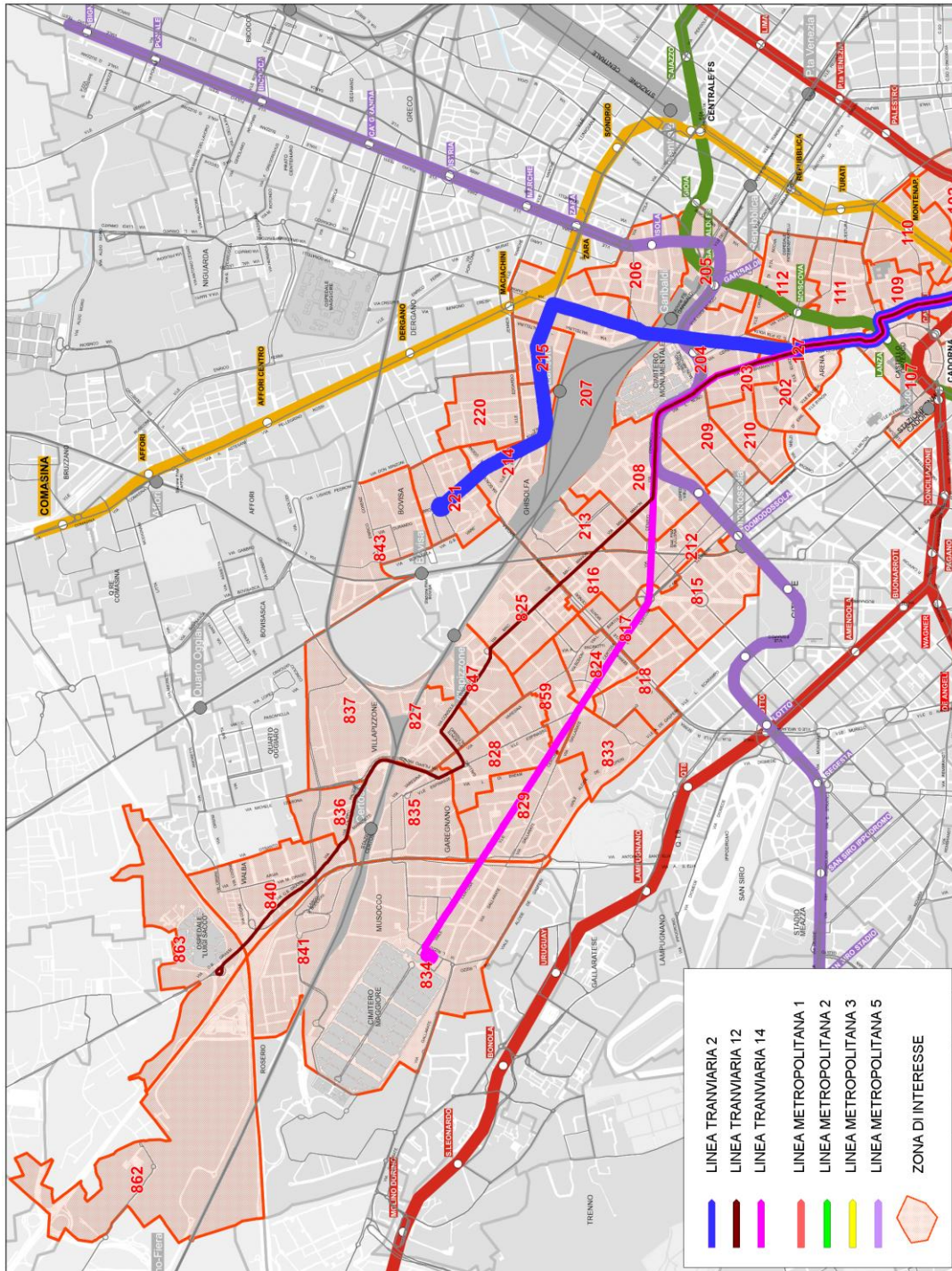


Fig. 6.8 Zonizzazione impiegata dal modello – Quadrante Nord

Fonte: elaborazione ATM

Con la medesima scala usata sopra, ho ritratto lo sviluppo delle linee nel quadrante meridionale, evidenziando che sono quasi del tutto sovrapposti i tracciati delle linee 2 e 14, secondo la direttrice che a breve sarà interessata dal nuovo percorso di M4.

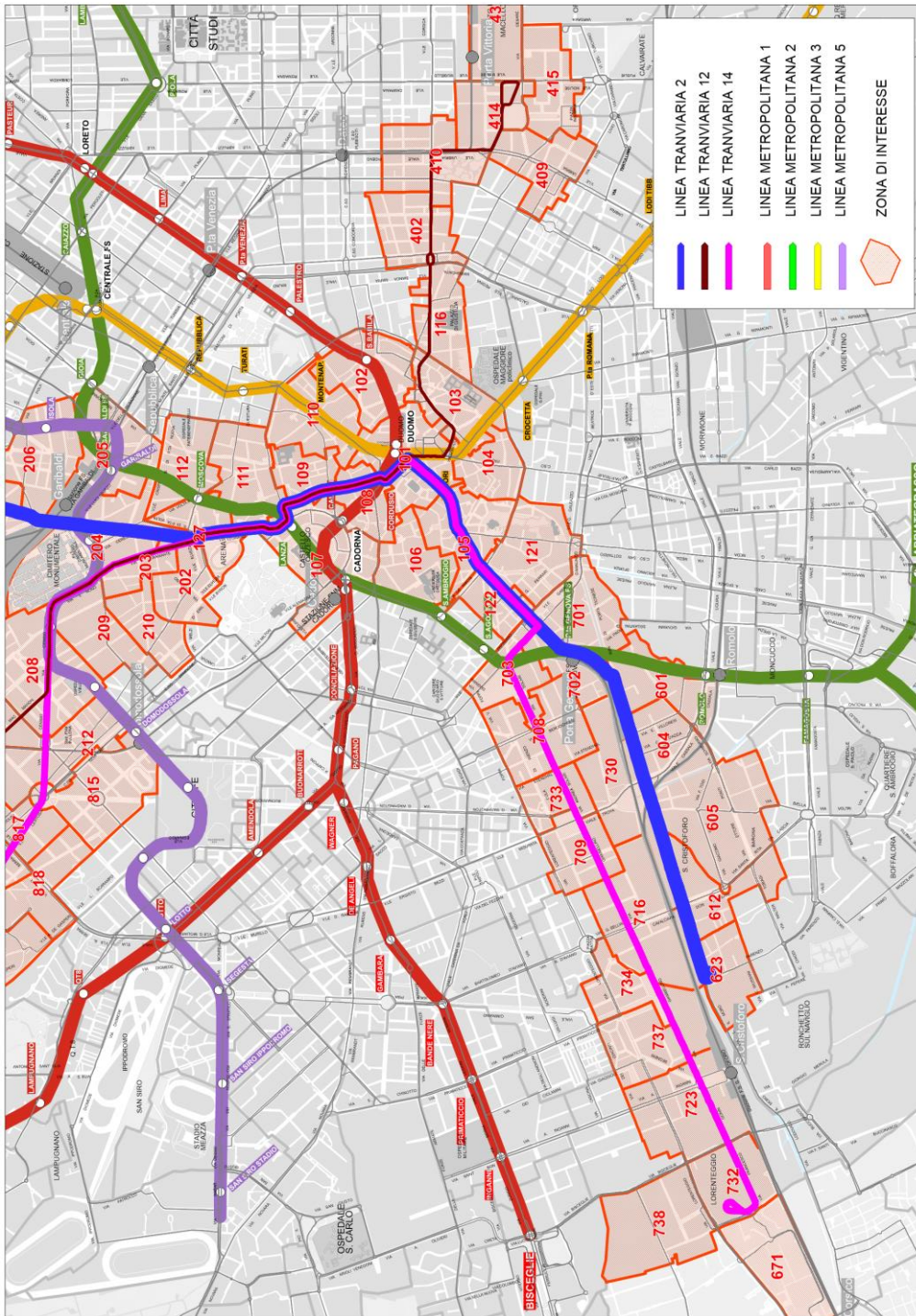


Fig. 6.9 Zonizzazione impiegata dal modello – Quadrante Sud

Fonte: elaborazione ATM

Le zone sono state analizzate singolarmente, distinguendole poi come luoghi di origine e di destinazione, ma per non appesantire troppo la trattazione ho riportato solamente il resoconto finale dei confronti, sul quale sono mostrate unicamente le variazioni percentuali fra lo scenario odierno e quello ipotizzato.

In particolare, mi sono soffermato sull'analisi di come varia il numero di linee TPL utilizzate per completare lo spostamento per ciascuna relazione O-D.

A titolo esemplificativo mostro e commento qui di seguito una coppia di tabelle (riferite alle zone intese come origine e destinazione) riprodotte secondo tale logica, mentre le restanti si omettono per non appesantire la Tesi.

CONFRONTO [%] DI UTENTI IN ORIGINE (PRE E POST SEGMENTAZIONE) PER SINGOLA ZONA NELLA BIORA DI PUNTA - PORZIONE CENTRALE DEI TRACCIATI (TRATTE IN CONDIVISIONE)						
Zone di ORIGINE	Linee interessate	Numero di linee per relazioni O-D				Variazione del n° medio di linee per relazioni O-D
		1	2	3	> 3	
208	12 e 14	-42,4	30,3	17,6	0,0	0,23
209	12 e 14	-37,8	29,7	27,5	0,0	0,23
203	12 e 14	-37,1	26,1	31,1	0,0	0,29
210	12 e 14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
127	2, 12 e 14	-15,0	13,9	8,2	0,0	0,08
202	2, 12 e 14	-18,8	15,4	9,7	0,0	0,10
111	2, 12 e 14	-6,7	11,5	0,0	0,0	0,05
107	2, 12 e 14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
109	2, 12 e 14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
110	2, 12 e 14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
108	2, 12 e 14	-2,2	3,6	0,0	0,0	0,01
101	2, 12 e 14	3,2	3,1	0,0	0,0	0,02
104	2, 12 e 14	-6,6	9,8	0,0	0,0	0,03
105	2 e 14	-9,1	14,3	2,9	0,0	0,05
106	2 e 14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
122	2 e 14	-0,5	1,0	0,0	0,0	0,00
121	2 e 14	-7,5	4,1	6,7	0,0	0,03
730	2 e 14	-1,4	1,1	0,0	0,0	0,01
701	2 e 14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00

Tab. 6.4 Confronto in origine dell'utenza nei diversi scenari – quadrante centrale

Esaminando i valori in tabella appare che:

- si ha una netta diminuzione delle relazioni O-D percorse con una sola linea TPL, com'è lecito attendersi a seguito della segmentazione imposta sulle linee tranviarie;
- sia maggiore il numero di relazioni O-D coperte da due o più linee TPL, in analogia con il commento precedente;
- l'aumento del numero di linee TPL utilizzate riguarda soprattutto le zone interessate contemporaneamente dalle linee 12 e 14 (si vedano le zone evidenziate in rosso), mentre è meno tangibile, seppur non trascurabile, anche nei tratti in comune delle tre linee (sottolineate in giallo).

In destinazione il risultato del confronto fra la domanda pre e post segmentazione è meno significativo dal punto di vista numerico, poiché (nella tabella seguente) sono meno evidenti i fenomeni già rilevati per le zone intese come origine dello spostamento.

CONFRONTO [%] DI UTENTI IN DESTINAZIONE (PRE E POST SEGMENTAZIONE) PER SINGOLA ZONA NELLA BIORA DI PUNTA - PORZIONE CENTRALE DEI TRACCIATI (TRATTE IN CONDIVISIONE)						
Zone di DESTINAZIONE	Linee interessate	Numero di linee per relazioni O-D				Variazione del n° medio di linee per relazioni O-D
		1	2	3	> 3	
208	12 e 14	-2,7	1,1	0,5	-22,2	0,01
209	12 e 14	0,0	-1,0	1,3	0,0	0,02
203	12 e 14	0,0	-1,5	4,8	0,0	0,01
210	12 e 14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
127	2, 12 e 14	-3,5	1,5	0,0	0,0	0,00
202	2, 12 e 14	-0,4	2,4	-2,4	-3,3	-0,01
111	2, 12 e 14	-4,3	1,8	8,6	0,0	0,03
107	2, 12 e 14	-1,6	2,4	-3,7	0,0	0,00
109	2, 12 e 14	-0,8	3,0	-9,4	0,0	-0,01
110	2, 12 e 14	-1,4	0,5	0,0	0,0	0,00
108	2, 12 e 14	-2,2	1,5	0,0	0,0	0,01
101	2, 12 e 14	-6,0	4,0	0,1	-3,7	0,02
104	2, 12 e 14	-7,1	2,8	4,0	0,0	0,03
105	2 e 14	-7,4	-0,4	5,2	9,1	0,05
106	2 e 14	-0,9	0,6	0,0	0,0	0,01
122	2 e 14	-3,4	2,3	0,0	0,0	0,01
121	2 e 14	-13,3	0,1	3,7	0,0	0,04
730	2 e 14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
701	2 e 14	-2,1	1,0	0,0	0,0	0,00

Tab. 6.5 Confronto in destinazione dell'utenza nei diversi scenari – quadrante centrale

Nonostante ciò emerge sempre la diminuzione delle relazioni O-D collegate da una sola linea TPL e, conseguentemente, cresce invece il numero di quelle che necessitano di due o più linee per essere connesse.

Trattandosi di zone centrali comprese nella Cerchia dei Navigli, interrogandomi sul risultato, potrei motivare questa tendenza col fatto che:

- gli spostamenti in origine da tali zone sono per lo più di breve distanza e risentono maggiormente della dilatazione del tempo di viaggio causata dall'imposta rottura di carico in attestamento centrale e, quindi, della concorrenza di altri sistemi di trasporto più performanti;
- gli spostamenti che originano da zone periferiche e sono diretti nel centro storico hanno un maggiore sviluppo spaziale, a fronte di un minor numero di servizi concorrenziali a disposizione, mostrandosi conseguentemente meno sensibili all'interruzione di percorso.

Il confronto fra utenza della rete odierna e segmentata non si limita al numero di linee per relazione O-D, infatti è possibile determinare come evolve il numero di utenti che percorrono una certa distanza in un dato intervallo temporale.

In tal senso, partendo dagli *output* del modello di simulazione, analogamente a quanto scritto prima con riferimento all'intera rete di trasporto, posso osservare che:

- a parità di linee utilizzate, per i tragitti a corto raggio cresce sensibilmente la distanza percorsa per servire la relazione O-D, e ciò motivabile dall'imposizione di interscambio in area centrale, a maggior ragione per gli utenti del centro storico;
- a parità di linee utilizzate, per i percorsi di medio raggio si riduce la tratta da percorrere, sinonimo che coloro che non sono interessati ad arrivare precisamente nelle zone centrali si serviranno di altre linee/sistemi di trasporto tangenziali che lambiscono tali aree senza però attraversarle.

Ciò è suffragato dai dati riferiti all'intervallo temporale che dimostrano:

- una marcata dilatazione de tempo di viaggio per le brevi percorrenze;
- una lieve riduzione del tempo necessario per i percorsi radiali di medio raggio, per lo più del tipo periferia-centro (e viceversa).

Individuate le zone d'influenza e fatti i debiti confronti numerici, passo ora ad analizzare come varia il volume di utenti nei due scenari esaminati, dapprima in termini assoluti per sistema di trasporto utilizzato per relazione O-D e poi considerandoli come reciproca combinazione.

Tenendo conto di quanto scritto prima in merito al fatto che la quasi totalità degli utenti interessati dai provvedimenti originano e terminano lo spostamento entro i confini dell'area centrale di Milano, ossia quella circoscritta dalla Cerchia dei Navigli, ho considerato solamente le relazioni O-D che le appartengono.

È una scelta non certo motivata dalla volontà di semplificare l'onere computazionale, anche perché intraprendere una valutazione ad ampio spettro richiederebbe un consumo di risorse che non è detto siano giustificabili.

In particolare, tenendo conto che la gran parte degli utenti che si serve delle linee tranviarie per l'attraversamento centrale, numeri alla mano, raramente proviene o è diretto in aree periferiche.

Osservando le tabelle seguenti appare chiaro che **la segmentazione favorisce l'utilizzo del sistema metropolitano, che vede aumentare di ben quattro punti percentuale il numero di passeggeri, a fronte invece di un calo quasi sovrapponibile dell'utenza che si serve delle linee urbane di superficie; rimane pressoché inalterata l'utilizzazione dei restanti sistemi di trasporto.**

CLASSIFICAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI PER TIPO DI LINEE UTILIZZATE - ORA DI PUNTA e RETE ATTUALE		
SPOSTAMENTI EFFETTUATI CON L'USO DI	n° utenti	% sul totale
METROPOLITANE	8.459	34,3
URBANE DI SUPERFICIE	12.945	52,5
FERROVIE	1.951	7,9
AUTOMOBILISTICHE INTERURBANE AZIENDALI	484	2,0
AUTOMOBILISTICHE INTERURBANE PRIVATE	801	3,3

Tab. 6.6 Spostamenti per linee utilizzate nell'ora di punta – rete attuale

CLASSIFICAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI PER TIPO DI LINEE UTILIZZATE - ORA DI PUNTA e RETE SEGMENTATA		
SPOSTAMENTI EFFETTUATI CON L'USO DI	n° utenti	% sul totale
METROPOLITANE	9.627	38,3
URBANE DI SUPERFICIE	12.309	48,9
FERROVIE	1.973	7,8
AUTOMOBILISTICHE INTERURBANE AZIENDALI	482	1,9
AUTOMOBILISTICHE INTERURBANE PRIVATE	776	3,1

Tab. 6.7 Spostamenti per linee utilizzate nell'ora di punta – rete segmentata

Volendo dare senso a tali considerazioni, si possono riconoscere dei fenomeni che riassumo qui brevemente:

- la maggiore ripartizione verso i sistemi metropolitani è giustificata dal fatto che gli utenti preferiscono accedervi direttamente aggirando i sistemi urbani di superficie sempre meno performanti alla luce delle modifiche di rete ipotizzate;
- la crescente predisposizione verso i sistemi sotterranei è agevolata dall'ingente numero di fermate di interscambio distribuite nell'area centrale, evitando così di dover percorrere tratti a piedi, anche di breve estensione.

Queste giustificazioni trovano riscontro nelle seguenti tabelle che, a differenza delle precedenti, mostrano, per ogni sistema/combinazione di sistemi di trasporto, il numero effettivo di utenti che se ne servono.

CLASSIFICAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI PER TIPO DI LINEE UTILIZZATE E LORO COMBINAZIONI - RETE ATTUALE		
TIPI DI LINEE UTILIZZATE	n° utenti	% sul totale
METROPOLITANE	757	5,4
URBANE DI SUPERFICIE	5.737	41,2
METROPOLITANE + URBANE DI SUPERFICIE	5.024	36,0
FERROVIE	2	0,0
METROPOLITANE + FERROVIE	503	3,6
URBANE DI SUPERFICIE + FERROVIE	221	1,6
METROPOLITANE + URBANE DI SUPERFICIE + FERROVIE	965	6,9
METROPOLITANE + URBANE DI SUPERFICIE + AUTOMOBILISTICHE INTERURBANE AZIENDALI	361	2,6
METROPOLITANE + URBANE DI SUPERFICIE + AUTOMOBILISTICHE INTERURBANE PRIVATE	370	2,7

Tab. 6.8 Spostamenti per combinazione di linee utilizzate nell'ora di punta – rete attuale

Com'era immaginabile, nella rete attuale, solo il 10 % dell'utenza delle linee metropolitane si serve solo di quest'ultime per effettuare lo spostamento, infatti una frazione consistente combina tale modo di trasporto con quelli urbani di superficie.

Non può dirsi lo stesso per gli utenti delle linee di superficie che invece in buona parte non interscambiano con altri sistemi di trasporto lungo la relazione O-D.

Con riferimento alla rete segmentata, nella tabella che segue si evidenziano importanti aspetti riguardanti le modifiche delle abitudini di mobilità:

- cresce **circa del 35%** il numero di utenti che si serve unicamente delle linee metropolitane per compiere lo spostamento, ovviando così all'interruzione di percorso delle linee tranviarie in attraversamento centrale;
- di contro, **decresce di oltre il 20%** il volume di passeggeri che utilizzano solamente i sistemi urbani di superficie, segno che le proposte di adeguamento sono mal percepite dall'utenza, che li valuta negativamente dal punto di vista del livello di servizio offerto;
- la combinazione di spostamenti effettuati con sistemi metropolitani e ferroviari (inteso come servizio ferroviario urbano, ossia il passante) **incrementa di oltre il 20%**, probabilmente perché l'utenza considera in modo sempre più favorevole i sistemi sotterranei a fronte delle modalità urbane superficiali;
- si assiste ad un aumento moderato (pari a circa il 10%) degli spostamenti che combinano i sistemi urbani di superficie con quelli metropolitani, grazie alla rilevante disponibilità di fermate di interscambio.

CLASSIFICAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI PER TIPO DI LINEE UTILIZZATE E LORO COMBINAZIONI - RETE SEGMENTATA		
TIPI DI LINEE UTILIZZATE	n° utenti	% sul totale
METROPOLITANE	1.164	8,4
URBANE DI SUPERFICIE	4.523	32,5
METROPOLITANE + URBANE DI SUPERFICIE	5.771	41,5
FERROVIE	2	0,0
METROPOLITANE + FERROVIE	660	4,7
URBANE DI SUPERFICIE + FERROVIE	232	1,7
METROPOLITANE + URBANE DI SUPERFICIE + FERROVIE	853	6,1
METROPOLITANE + URBANE DI SUPERFICIE + AUTOMOBILISTICHE INTERURBANE AZIENDALI	354	2,5
METROPOLITANE + URBANE DI SUPERFICIE + AUTOMOBILISTICHE INTERURBANE PRIVATE	340	2,4

Tab. 6.9 Spostamenti per combinazione di linee utilizzate nell'ora di punta – rete segmentata

A corredo di queste considerazioni ho riprodotto i diagrammi di carico riferiti ai due scenari studiati, potendo così apprezzare non solo numericamente, ma anche graficamente, l'evoluzione della domanda attesa sull'intera rete TPL di Milano.

Per completezza riassumo qui gli *step* seguiti nell'elaborazione dei diagrammi di carico:

- a partire dalla matrice O-D (aggiornata al 2017) e dal programma di verifica di rete, ho assegnato il *file* di tutti i percorsi a ciascuna linea tranviaria attenzionata;
- prese le tre linee ho evidenziato tutti gli archi che le caratterizzano;
- di questi archi ho considerato solo quelli appartenenti all'area centrale, dato che la quasi totalità degli spostamenti su tali linee presentano relazione O-D compresa nella Cerchia dei Navigli;
- dalla matrice ho estratto solo le relazioni O-D aventi percorsi caratterizzati da archi in comune con quelli delle linee tranviarie: in pratica si va a ricostruire il percorso di coloro che si servono delle tre linee nell'area centrale;
- a partire da tali relazioni ho ricostruito le sottomatrici O-D delle linee tranviarie e riferite all'area centrale di Milano;
- con queste sottomatrici O-D ho effettuato nuovamente l'assegnazione dei percorsi precedentemente individuati sulle tre linee, così da ottenere i volumi di traffico con cui poter elaborare i flussogrammi.

Sempre con riferimento all'albero dei flussi, qui rappresentati con scala 1:30.000, ho preferito vincolare la raffigurazione dei flussi sugli archi qualora venga raggiunta la soglia minima di 10 utenti, per evitare di inquinare la rappresentazione con flussi del tutto trascurabili.

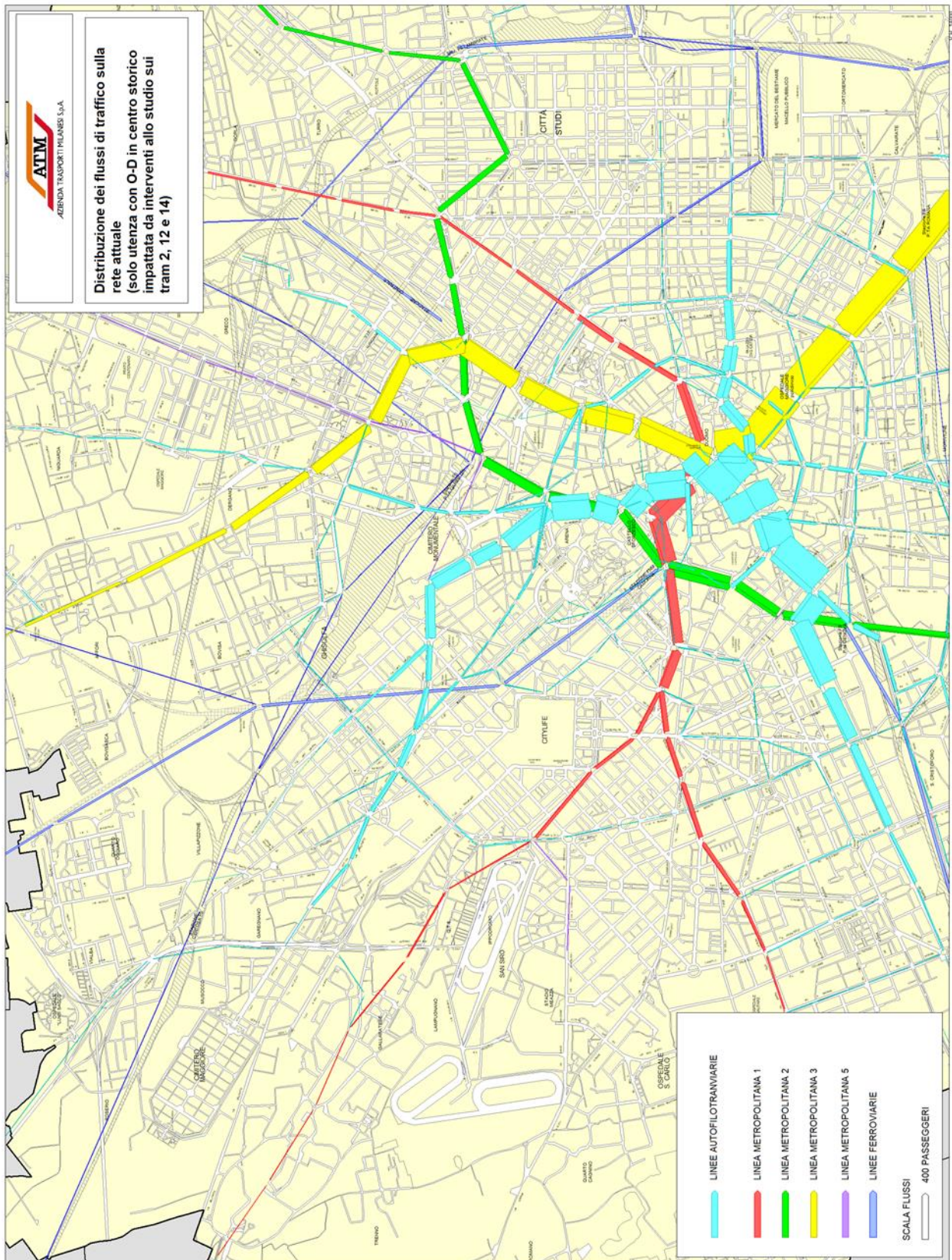


Fig. 6.10 Albero dei flussi dell'utenza interessata dai provvedimenti – rete attuale e ora di punta

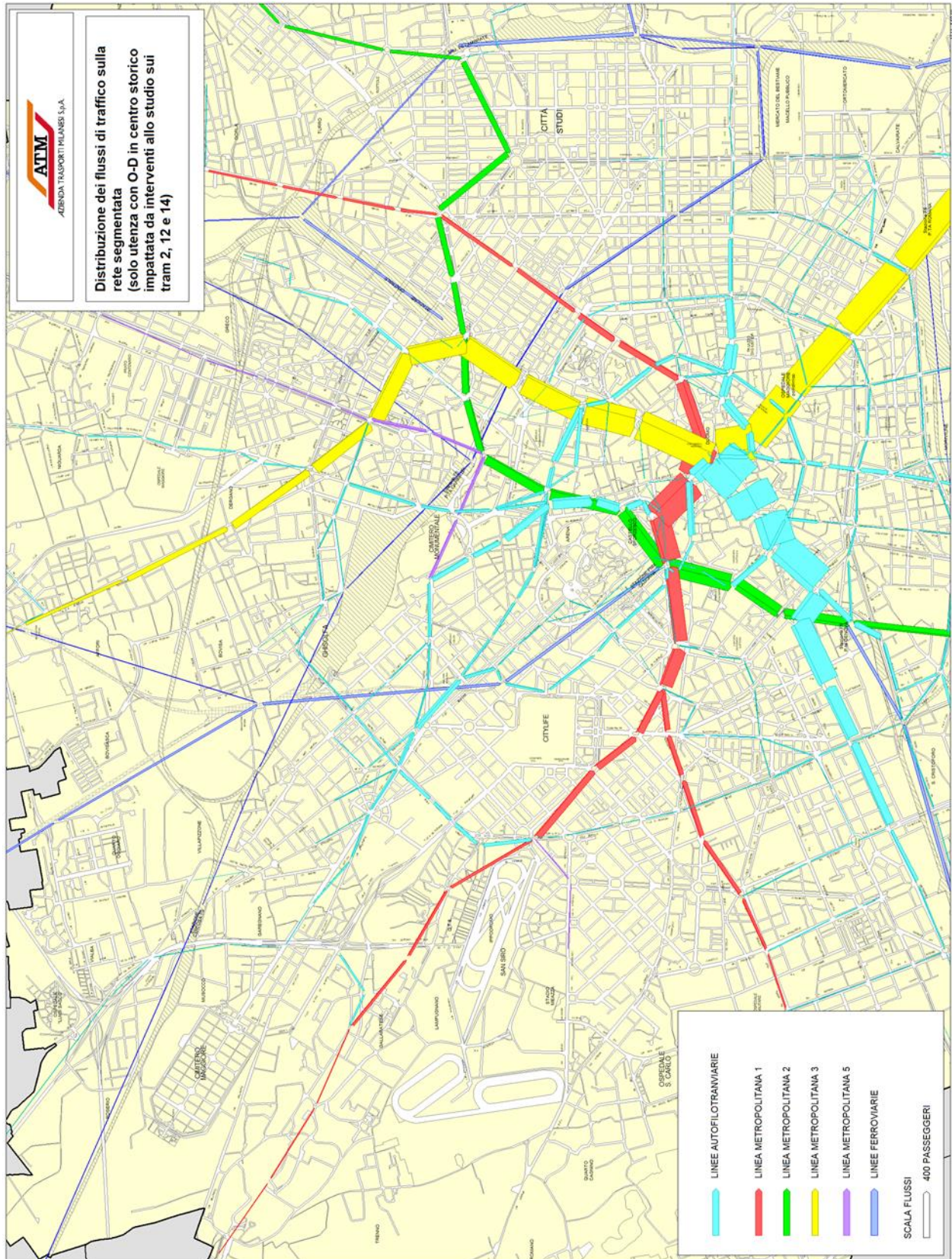


Fig. 6.11 Albero dei flussi dell'utenza interessata dai provvedimenti – rete segmentata e ora di punta

Le restituzioni grafiche dimostrano quanto già anticipato nei commenti formulati durante l'analisi dei dati numerici, ossia:

- il carico che è previsto interessare i rami settentrionali delle linee tranviarie attenzionate subisce una grande diminuzione, causata probabilmente dalla disponibilità di percorsi e modalità di trasporto concorrenziali più performanti;
- i rami meridionali sembrano risentire in modo minore dell'interruzione dei percorsi tranviari in centro: ciò è motivabile dalla disposizione dei poli attrattori e dal minor numero di soluzioni fruibili, in primis la linea M4, che però non è stata introdotta come *input* della rete segmentata;
- con particolare riferimento alla linea M1 osservo un netto ricarico in entrambe le direzioni, segno che gli utenti che prima si servivano del tram optano per il sistema metropolitano;
- una quota-parte dell'utenza che oggi percorre la linea 2, specie nel ramo Nord, è prevista redistribuirsi sulla linea M3;
- alla confluenza delle tre linee nel quadrante settentrionale, nei pressi della fermata di Lanza M2, si assiste ad una ripartizione dei passeggeri verso i sistemi metropolitani e conseguente scarico della rete tranviaria;
- lo split modale è risentito anche esternamente all'area soggetta alle modifiche di rete, con utenti delle linee 12 e 14 che dai rami settentrionali si riversano sulla linea M1, specialmente in direzione centro e, in misura minore, sulla filovia 91 (circolare sinistra).

6.3 – Evoluzione prevista dai Piani di Sviluppo aziendali

Oltre allo scenario evolutivo proposto in questo Studio, ne sono stati elaborati altri da parte degli enti coinvolti nella pianificazione e nella gestione del servizio di trasporto pubblico locale di Milano, in accordo ai Piani di Sviluppo della Rete e della Flotta commentati in precedenza.

In particolare, la proiezione della domanda prospettica deriva dall'applicazione di un modello di generazione basato, a titolo esemplificativo e non esaustivo, su previsioni di sviluppo insediativo, demografico, variazioni del tessuto produttivo e su una nuova ripartizione modale definita nel PUMS di Milano che prevede, a regime, un incremento di circa +6% della quota a favore del TPL per gli spostamenti con Origine e/o Destinazione nella città di Milano.

In merito a ciò, a corollario del presente capitolo incentrato sul confronto fra scenario odierno e scenario evolutivo, riassumerò qui di seguito in forma tabellare i parametri indicatori della domanda di trasporto attuali e futuri, riferiti alla rete tranviaria milanese e formulati secondo le trasformazioni previste.

Si precisa che i dati riferiti allo scenario attuale risalgono al 2018, anno rappresentativo di una condizione ordinaria, pertanto non risentono del calo fisiologico dell'utenza verificatosi negli anni successivi (a causa degli effetti scaturiti dal Covid).

Modo	Indicatori sulla domanda di trasporto	Unità di misura	2018
Rete tranviaria	Domanda giornaliera	Passeggeri/giorno	380.000
	Domanda giornaliera	Passeggeri*chilometro/giorno	830.000
	Domanda annua	Passeggeri/anno	106.000.000
	Domanda annua	Passeggeri*chilometro/anno	232.000.000

Tab. 6.10 Domanda di trasporto sulla rete tranviaria – scenario attuale

Fonte: elaborazione ATM

Modo	Indicatori sulla domanda di trasporto	Unità di misura	Previsioni 2030
Rete tranviaria	Domanda giornaliera	Passeggeri/giorno	515.000
	Domanda giornaliera	Passeggeri*chilometro/giorno	1.200.000
	Domanda annua	Passeggeri/anno	144.000.000
	Domanda annua	Passeggeri*chilometro/anno	330.000.000

Tab. 6.11 Domanda di trasporto sulla rete tranviaria – scenario prospettico

Fonte: elaborazione ATM sui dati del PUMS del Comune di Milano

Esaminando i dati riferiti alla domanda di trasporto (si vedano le tabelle precedenti) osservo un rilevante aumento di utenza, riconoscibile già su base giornaliera, pari a circa il 26%.

Il trend evidenziato per la domanda di trasporto dipende certamente anche dal servizio offerto, anch'esso previsto crescere nei prossimi anni, come è osservabile nelle statistiche sul livello di offerta di trasporto (giornaliera e annuale) contenute nello scenario di piano (avente orizzonte temporale 2035); tali valori prospettati sono di seguito riassunti e riferiti all'ambito di servizio riguardante la sola rete tranviaria urbana di Milano.

Modo	Indicatori sull'offerta di trasporto	Unità di misura	Previsioni 2035	Delta [%]
Rete tranviaria	Estensione della rete	Chilometri	171	8,7
	Offerta giornaliera	Veicoli*chilometro/giorno	48.237	9,7
	Offerta giornaliera	Posti*chilometro/giorno	7.350.671	5,7
	Offerta annua	Veicoli*chilometro/anno	15.401.389	9,7
	Offerta annua	Posti*chilometro/anno	2.368.849.217	5,7

Tab. 6.12 Offerta di trasporto sulla rete tranviaria – scenario prospettico

Fonte: elaborazione ATM sui dati del PUMS del Comune di Milano

Lo scenario prospettico, basato sui Documenti di Piano di sviluppo comunali (per maggiori dettagli si rimanda al Cap. 4), ipotizza infatti un sensibile incremento di estensione della rete tranviaria urbana milanese, pari a quasi il 10%, a cui consegue peraltro una crescita del parco veicolare anche per effetto dell’inserimento di vetture innovative, come ho preventivato in questo Studio.

6.4 – Carichi futuri

Alla luce di quanto ho scritto, l’applicazione dei modelli di simulazione permette quindi di ricostruire i carichi previsti sulla rete ed in particolare nell’orizzonte temporale definito dalle previsioni di sviluppo territoriale e di sviluppo infrastrutturale dei sistemi di mobilità. Il grafo di rete utilizzato nelle simulazioni di carico esprime infatti l’assetto previsto a regime, includendo gli interventi di potenziamento del trasporto pubblico in corso di realizzazione o comunque già programmati.

Parallelamente bisogna contestualizzare la domanda di trasporto da assegnare, facendo riferimento sia ai nuovi traffici indotti dalle trasformazioni urbanistiche previste a Milano e nell’hinterland, tra le quali le più importanti sono da ricondurre al riuso degli ex scali ferroviari inseriti nel tessuto urbano e al cambio modale a favore al mezzo pubblico, prevedibile con la realizzazione degli interventi infrastrutturali sulla rete precedentemente elencati o imputabili ai provvedimenti di limitazione del traffico privato.

In proposito, segnalo che il PUMS di Milano prevede a regime nello scenario di target del piano, in funzione delle variazioni di domanda stimate e dell’insieme degli interventi, un incremento del riparto modale a favore del TPL in ambito urbano, dal 57% al 63% degli spostamenti complessivi (come indicato nella tabella seguente).

Per maggiore chiarezza espositiva, preme rammentare che nei documenti di piano per scenario reference si intende quello già approvato e/o in fase di realizzazione (ad esempio la linea M4 ne fa parte), mentre il target di piano contempla tutto ciò che è in previsione di essere realizzato, ma non ha ancora ricevuto finanziamento/conferma (ad esempio la linea M6, la cui progettazione è ancora in fase embrionale).

Tipo di spostamento	Modalità prevalente	Stato di fatto [%]	Reference [%]	Target di Piano [%]
Spostamenti interni a Milano	Autovettura	30,2	28,8	22,9
	Moto	7,3	7,1	6,9
	Trasporto pubblico	56,7	58,1	63,0
	Bicicletta	5,7	6,0	7,1
Spostamenti di scambio	Autovettura	58,5	57,1	51,3
	Moto	4,0	4,0	4,1
	Trasporto pubblico	36,8	38,2	43,7
	Bicicletta	0,7	0,7	0,9

Tab. 6.13 Ripartizione modale degli spostamenti meccanizzati delle persone - scenario PUMS

Fonte: elaborazione ATM sui dati del PUMS del Comune di Milano

Anche in questo caso uno dei risultati più significativi derivante dal processo di simulazione è senza dubbio rappresentato dai flussogrammi che riportano l'evoluzione della domanda fra i differenti scenari elaborati.

Con particolare riferimento alla rete tranviaria è stato riprodotto l'albero dei flussi nella biora di punta mattinale; questo verrà poi messo in relazione con la nuova offerta di trasporto che occorrerà mettere in campo, espressa anche in termini di miglioramento del livello di servizio legato alla tipologia del materiale rotabile.

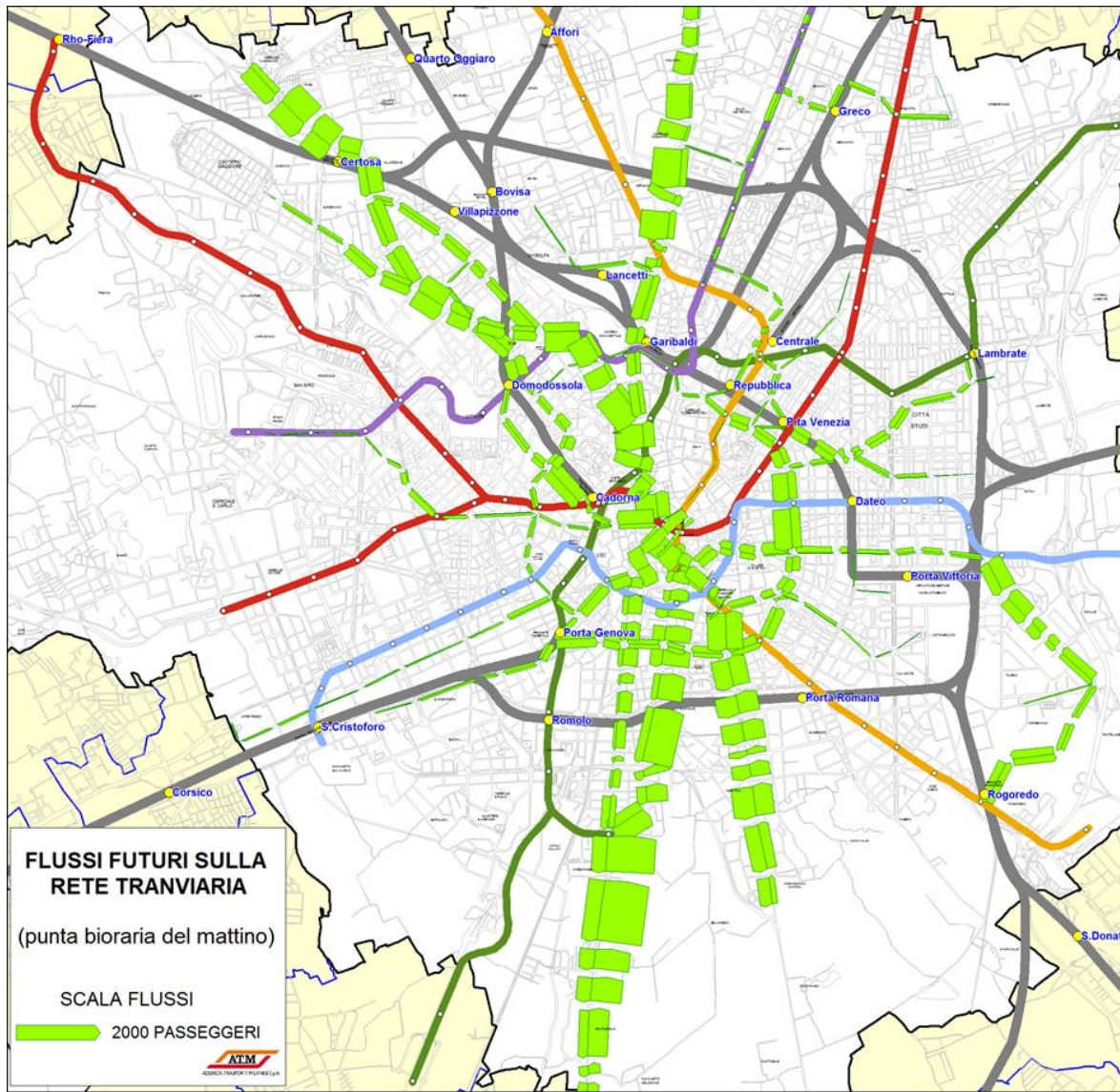


Fig. 6.12 Distribuzione dei carichi futuri sulla rete tranviaria prospettata

Fonte: elaborazione ATM

Dalle risultanze grafiche emerge infatti un notevole incremento di carico, soprattutto sugli assi di forza della rete, non compensato né contraddetto dalla riduzione limitata ad alcune tratte parallele alla linea M4 (ossia la linea 2 e 14); tale incremento non potrà evidentemente essere fronteggiato con un parco rotabile in progressivo degrado strutturale.

In merito a ciò, mentre la continuità della domanda sull'asse Est-Ovest viene risolta dall'attivazione di M4, la tematica degli *hub* di attestamento delle linee tranviarie radiali (a Nord Cairoli, a Sud Missori) lascia invece senza soluzione la questione dell'esigenza di mobilità del corridoio sull'asse Nord-Sud.

Tale bisogno di mobilità lungo l'asse Nord-Sud oggi ammonta, in punta, a circa 9000 pax/h*direz., ma è atteso crescere e superare quota 10.000 pax/h*direz. secondo le previsioni di sviluppo.

Come dato di confronto riporto il totale dei passeggeri sulle linee tranviarie ricavato dalle simulazioni dello stato di fatto e della situazione futura, rispettivamente pari a 75.000 e a 95.000 nella punta bioraria del mattino.

Al netto di queste considerazioni, posso concludere che quindi si potrà avere un incremento complessivo dei passeggeri delle linee tranviarie **superiore al 25%.**

7 – Conclusioni

Dallo sviluppo della tesi sono emersi i risultati seguenti:

- fra i sistemi di forza, quello tranviario si integra efficacemente anche in un contesto cittadino densamente urbanizzato, come dimostrano molti esempi applicativi del panorama nazionale ed europeo;
- l'impiego di mezzi bidirezionali ben si concilia con la scarsa disponibilità di spazio, data la facilità di inserimento degli attestamenti tronchi in area centrale;
- la strategia di segmentare le linee tranviarie in attraversamento permette una gestione più flessibile del servizio di trasporto, modulato sulla base dei bisogni di mobilità delle singole tratte, ovviando così agli squilibri di carico evidenziati sulla rete;
- il numero di utenti interessati dalle proposte di adeguamento della rete è previsto in sensibile aumento (circa il 10%): dagli attuali 4.000 pax/h ai 4.400 pax/h (complessivamente per entrambe le direzioni) stimati nei prossimi anni, in accordo ai Piani di Sviluppo della rete ormai consolidati;
- la quasi totalità dei passeggeri in attraversamento del centro che si servono delle linee tranviarie urbane, ha origine e destinazione entro la Cerchia dei Navigli;
- l'interruzione dei percorsi tranviari passanti in centro, soprattutto per l'utenza proveniente da Nord, provoca inevitabili disagi all'utenza, che si vede costretta a percorrere tratti a piedi oppure interscambiare con altri sistemi di trasporto, portando così ad una contrazione generalizzata della domanda di mobilità sulla rete tranviaria;
- disagi e vincoli di interscambio si ridurrebbero fino quasi ad annullarsi in presenza di infrastrutturazione "forte" del corridoio Nord-Sud che metta a sistema le linee 2, 4, 12 e 14 per le provenienze da Nord e le linee 15 e 24 per quelle da Sud;
- l'asse tranviario più sollecitato è quello che individua la direttrice Nord-Sud, dove oggi transitano circa 9000 pax/h*direz. e, in accordo alle stime aziendali di evoluzione della domanda in virtù dei piani di sviluppo dell'offerta di trasporto, tale quota è prevista crescere e superare la soglia dei 10.000 pax/h*direz., attribuendo grande potenzialità al sistema di trasporto tranviario;
- la frammentazione dei percorsi tranviari favorisce la ripartizione modale verso i sistemi metropolitani, con i quali la rete urbana di superficie, visti i consistenti margini di crescita indicati nei Piani di Sviluppo, può e deve integrarsi al meglio, agevolando una forma di mobilità multi-modale;
- la ripartizione modale derivante dalle proposte di segmentazione ha chiaramente effetto oltre la Cerchia dei Navigli, dato che una quota-parte di utenza, non trascurabile, preferisce combinazioni di trasporto che permettano di accedere ai sistemi metropolitani, che invece attraversano il centro, già dalle origini.

Descrizione dei risultati:

L'approccio utilizzato ha confermato la validità del metodo e degli strumenti di simulazione come anche della procedura di analisi dei dati, visto che è possibile motivare i risultati raggiunti e ripercorrere i ragionamenti effettuati.

In tal senso, i risultati riferiti allo schema di rete segmentata evidenziano uno scenario in complessivo peggioramento, poiché minore è il numero di utenti che si servono dei sistemi urbani di superficie, specialmente quelli tranviari, mettendo ancor più in pressione il sistema metropolitano.

Peraltro, il livello di servizio offerto dal sistema metropolitano nelle fasce di massima punta ha limitati margini di sviluppo, legati prevalentemente all'adozione di nuovo segnalamento a blocco mobile (CBTC) sulla linea M2 e, in prospettiva, anche su M3.

L'attivazione di M4 non risolve comunque la tematica di attraversamento del centro per chi proviene da Nord e, anzi, andrà anche ad aggravare il carico delle linee tranviarie sugli assi Correnti-Torino-Italia come sistema di ultimo miglio per la penetrazione in centro da Sud.

Inoltre, un incremento della capacità di M5, legato ad un nuovo segnalamento a blocco mobile, non è prevista almeno fino all'attivazione del prolungamento a Monza e della realizzazione completa delle infrastrutture di rimessamento dei treni.

Per di più, dai risultati emergono degli elementi che confermano la volontà, già espressa dai PUMS (2011 e successivo), di intraprendere studi tecnico-economici di pre-fattibilità volti all'individuazione della tipologia e conseguente dimensionamento di un servizio di trasporto forte sul corridoio Nord-Sud.

Un risultato di questo tipo è molto significativo e aggiunge valore alla tesi perché, a livello pratico, permette di ottimizzare l'impiego delle risorse, specialmente con riferimento a quelle operative/di esercizio, a fronte invece di ingenti oneri realizzativi.

La metodologia di analisi numerica è costantemente calibrata dai rilievi di carico effettuati sulla rete, pertanto restituisce dati perfettamente confrontabili con le molteplici modalità di rilievo messe in campo da ATM sull'intera rete di trasporto.

Il modello di assegnazione mono-modale, la matrice O-D di base, il programma di verifica della rete di trasporto, i dati dei rilievi di carico eseguiti sulle linee di TPL e le informazioni dettagliate riguardanti il piano di sviluppo della rete e quello della flotta sono stati gentilmente messi a disposizione del gestore del servizio TPL di Milano e Provincia, ossia dall'Azienda Trasporti Milanesi S.p.A., presso la quale ho svolto attività di tirocinio curricolare e facoltativo.

Inoltre, il metodo di analisi è perfettamente esportabile in qualsiasi contesto, dato che è un approccio basato sulla conoscenza del territorio e su una matrice O-D con zonizzazione molto fine, verificata negli anni con strumenti di rilievo puntuale dell'utenza e integrata da indagini sulle relazioni O-D.

Preme ancora una volta sottolineare che i risultati della simulazione e gli effetti della strategia operativa ipotizzata sono infatti funzione del contesto in cui tale metodologia viene applicata, rendendola più o meno efficace a seconda del caso-studio indagato.

Limiti del lavoro svolto:

Nonostante la grande mole di dati e strumenti disponibili, le risultanze numeriche e grafiche presentate non sono da prendere come verità assoluta, poiché risentono dell'inevitabile incertezza associata alla formulazione di ipotesi semplificative introdotte nel processo di simulazione e dalla conseguente analisi dei dati.

Le semplificazioni adottate si sono rese necessarie vista la complessità del caso-studio in esame, ossia l'area centrale di Milano, caratterizzato da una vasta rete di trasporto multi-modale, ove ciascun sistema svolge compiti ed ha funzionalità specifiche.

In tal senso, l'elaborazione della Tesi ha richiesto un grande impegno di risorse, sia temporali che operative, reso possibile solo grazie alla costante disponibilità di supporto, offerta da ATM, nel processo di raccolta, simulazione, analisi dei dati e dei Piani di Sviluppo degli Enti coinvolti.

Non bisogna però trascurare il peso assunto anche dalla ricerca di fonti attendibili, lo sviluppo di un criterio di analisi generalizzabile e la trattazione dei casi-studio più significativi (propri del panorama nazionale ed estero).

In generale, la mancanza di risorse, in particolare la ristrettezza del tempo disponibile per lo sviluppo e il completamento della tesi, ha certamente inciso sulla possibilità di sviluppare un lavoro ad ampio spettro e finalizzato anche agli obiettivi aziendali.

Considerazioni finali:

Le modifiche della rete di trasporto pubblico locale, sebbene limitate ad un'area ristretta e ad una sola modalità di trasporto, vengono risentite sull'intero assetto TPL urbano.

L'utente "razionale" sceglie il percorso che massimizza i benefici e minimizza i disagi: in particolare, cerca di limitare il più possibile il tempo di viaggio effettivo, comprensivo anche dei tempi di effettuazione dell'eventuale interscambio e quelli di attesa in fermata, non mostrando invece una netta preferenza verso uno specifico sistema di trasporto.

Alla luce di ciò, bisogna sempre rapportare la strategia di modifica della rete all'offerta di servizio ed al quadro viabilistico-urbanistico che caratterizza l'area studiata.

In genere, sembra che imporre interruzioni di percorso su un sistema di superficie pregiudichi la qualità del servizio ed abbia ricadute negative sull'utenza, pertanto chiunque si trovi a formulare proposte di tale calibro dovrà tenere debitamente conto di queste possibili conseguenze.

Possibili sviluppi:

La mancanza di risorse, in particolare di tempo, mi ha portato a trascurare alcuni aspetti, fra i quali il dimensionamento, seppur di massima, dell'attestamento tranviario in Piazza Missori, non ritenuto influente sul presente Studio.

D'altronde, come ho chiarito fin da subito, il punto focale di tale lavoro non è quello di progettare e dettagliare gli interventi di adeguamento dal punto di vista infrastrutturale, quanto più formulare delle ipotesi realistiche di modifica della rete e studiare gli effetti che esse sortiscono sulla domanda di trasporto attuale e futura.

Ritengo infatti di aver svolto un lavoro compatibile con la durata della tesi, ma nel caso in cui qualcuno mi assegnasse un incarico retribuito potrei portarlo a termine, corredando così i Piani di Sviluppo della rete ormai consolidati con proposte di intervento concrete e migliorative del servizio di trasporto offerto, dimostrando di avere conseguito le competenze e le capacità necessarie alla pianificazione e gestione delle reti di trasporto.

Molti sono poi i possibili sviluppi di tale Studio, fra i quali il dimensionamento di un'infrastruttura forte che serva il corridoio Nord-Sud, sia essa di tipo superficiale che sotterraneo oppure ancora l'elaborazione di consistenti modifiche viabilistiche nell'area centrale, funzionali a rendere prioritario il servizio di trasporto collettivo, integrandolo sempre più ad altre forme di mobilità leggera.

Indice delle figure

1.1	Sviluppo geometrico delle linee di trasporto	7
1.2	<i>Layout</i> del tracciato percorso da mezzi monodirezionali (a) e soluzione equivalente adatta ai veicoli bidirezionali (b)	10
1.3	Rete unifocale (a sinistra) e multifocale (a destra).....	12
1.4	Relazione fra distanza di accesso alla rete di trasporto e potere attrattivo.....	14
1.5	Sequenza di fasi elementari della pianificazione dei trasporti urbani.....	15
1.6	Schema metodologico per la progettazione preliminare	17
1.7	Scenario tipico di un flussogramma in un'area urbana.....	19
1.8	Generico profilo di carico di utenti pendolari nel dominio spazio-temporale	20
2.1	Galleria tranviaria nel centro storico di Bratislava	21
2.2	Rete tranviaria di Rouen e fermata sotterranea	25
2.3	Rete tranviaria di Grenoble e tram in area pedonale presso Rue Felix Poulat.....	26
2.4	Tracciati delle linee tramviarie nel centro della città di Bordeaux e raggi di influenza di 250 m.....	27
2.5	Tram presso la Cattedrale di Bordeaux.....	27
2.6	Tram presso la Cattedrale di Orléans	27
2.7	Rete tranviaria di Nizza.....	28
2.8	Tram presso Place Messena senza alimentazione aerea e in transito su Avenue Médecin.....	29
2.9	Parte centrale della rete di Stadtbahn di Hannover	30
2.10	Firenze, i diversi tracciati progettati e ipotizzati per servire il centro con le linee tramviarie	34
2.11	Linea T1 (in azzurro) attiva dal 2010 con la deviazione verso Careggi/ospedale (completata nel 2018) e linea T2 (in viola) in esercizio dal 2019.....	37

3.1	Rete tranviaria (in blu) e metropolitana di Milano	42
3.2	Tipologie di vetture tranviarie utilizzate sulla rete	47
3.3	Sistemi di protezione delle linee tranviarie.....	48
3.4	Quadro complessivo della domanda di mobilità giornaliera nell'area di studio al 2018.....	50
3.5	Ripartizione modale degli spostamenti relativa allo stato di fatto	51
3.6	Distribuzione oraria dei passeggeri della metropolitana.....	52
3.7	Flussogramma attuale sulla rete tranviaria – punta oraria mattino	56
3.8	Tracciato linea 2, 12 e 14.....	58
3.9	Diagramma di carico linea 2 Bausan – Negrelli	59
3.10	Diagramma di carico linea 12 Roserio – Molise.....	60
3.11	Diagramma di carico linea 14 Cimitero Maggiore – Molinetto di Lorenteggio	61
3.12	Accessibilità della rete tranviaria milanese.....	63
4.1	Percorso tram 7 – scenario di riferimento.....	66
4.2	Tracciato definitivo del prolungamento Q.re Adriano – C.na Gobba.....	67
4.3	Tracciato della metrotranvia interquartiere Nord.....	71
4.4	Schema progetto linee T	73
4.5	Interventi per la rete metropolitana – PUM del Comune di Milano	74
4.6	Dotazione tram attesa per anno	79
4.7	Carrello motore pivotante (a sinistra) e portante non pivotante (a destra).....	80
4.8	Layout tram bidirezionale	81
4.9	Stadler Tango impiegato per la rete di trasporto danese di Aarhus	82
4.10	Stadler Tango presso la fermata di Marktplatz a San Gallo e lungo il tracciato.....	83
4.11	Stadler Tango presso la fermata di Riethüsli all'imbocco del tunnel Ruckhalde	83
4.12	Tracciato Appenzello-St. Gallen–Trogen e focus del tunnel Ruckhalde.....	84

5.1	Schema pianificazione trasporti (rete pubblica e privata) – <i>input</i> e <i>files</i> di base.....	87
5.2	Schema pianificazione trasporti (rete pubblica e privata) – <i>output</i> e modelli fondamentali.....	88
5.3	Ipotesi di razionalizzazione dei percorsi tranviari in centro	94
5.4	Via Orefici negli anni ‘30	95
5.5	Assetto definitivo di Piazza Cordusio nel secondo dopoguerra e oggi.....	95
5.6	Viabilità limitrofa a Piazza Cordusio.....	97
5.7	Attuali percorsi tranviari in attraversamento di Piazza Cordusio	97
5.8	Rete tranviaria ed interscambi metropolitani nell’area centrale	98
5.9	Frequenza cumulata dei tram nell’area di progetto.....	99
5.10	Conflitto fra i veicoli provenienti da Via Cordusio e pedoni in attraversamento su Via Orefici.....	100
5.11	Veicoli in attraversamento della Piazza che occupano il sedime tranviario	100
5.12	Accodamenti in Via S. Prospero, Porrone e S. Protaso	101
5.13	Intensità dei flussi veicolari allo stato attuale, ora di punta del mattino (AM) e del pomeriggio (PM)	102
5.14	L’asse pedonale che collega il Castello al Duomo e Piazza S. Babila.....	103
5.15	Tram occupano l’attraversamento pedonale in centro alla piazza	103
5.16	Sistema del Cordusio	104
5.17	Attestamento presso l’intersezione Piazza Castello/via Quintino Sella.....	106
5.18	Attestamento presso via Pietro Paleocapa.....	107
5.19	Lavori in corso in via Luca Beltrami – luglio 2022.....	107
5.20	Interscambio a piedi con Cadorna FN.....	108
5.21	Ipotesi di attestamento presso Piazza Castello.....	109
5.22	Modifica di percorso ipotizzata – attestamento in via Luca Beltrami	110
5.23	Sosta presso Piazza Edison	111
5.24	Immagine satellitare di Piazza Edison e vie limitrofe.....	111
5.25	Percorso pedonale dal nuovo attestamento alle fermate metropolitane adiacenti....	112
5.26	Ipotesi di attestamento in Piazza Tommaso Edison.....	113

5.27	Modifica del percorso tranviario – attestamento presso Piazza Tommaso Edison..	114
5.28	Micro-aree di riferimento lato Sud.....	116
5.29	Micro-aree di riferimento lato Nord.....	117
5.30	Tratto centrale linea 2 – direzione Negrelli.....	118
5.31	Tratto centrale linea 2 – direzione Bausan.....	119
5.32	Tratto centrale linea 12 – direzione Molise	120
5.33	Tratto centrale linea 2 – direzione Bausan.....	121
5.34	Tratto centrale linea 14 – direzione Molinetto di Lorenteggio	122
5.35	Tratto centrale linea 14 – direzione Cimitero Maggiore.....	123
6.1	Diagramma di carico linea 2 Nord (Bausan – Cairoli)	133
6.2	Diagramma di carico linea 2 Sud (Edison – Negrelli).....	134
6.3	Diagramma di carico linea 12 Nord (Roserio – Cairoli).....	135
6.4	Diagramma di carico linea 12 Sud (Missori – Molise).....	136
6.5	Diagramma di carico linea 14 Nord (Cimitero Maggiore – Cairoli)	137
6.6	Diagramma di carico linea 14 Sud (Edison – Molinetto di Lorenteggio).....	138
6.7	Zonizzazione impiegata dal modello – Quadrante Centro.....	142
6.8	Zonizzazione impiegata dal modello – Quadrante Nord.....	143
6.9	Zonizzazione impiegata dal modello – Quadrante Sud.....	144
6.10	Albero dei flussi dell’utenza interessata dai provvedimenti – rete attuale e ora di punta.....	152
6.11	Albero dei flussi dell’utenza interessata dai provvedimenti – rete segmentata e ora di punta.....	153
6.12	Distribuzione dei carichi futuri sulla rete tranviaria prospettata.....	157

Indice delle tabelle

1.1	Parametri e ordini di grandezza caratterizzanti il sistema di trasporto tranviario.....	6
2.1	Confronti fra sistemi di trasporto di differenti città europee	31
2.2	Confronto di quattro soluzioni di rete secondo diversi criteri.....	36
3.1	Dati dimensionali della rete ATM	40
3.2	Caratteristiche delle linee tranviarie milanesi	44
3.3	Distribuzione delle uscite per deposito – orario feriale invernale (fascia di punta)...	46
3.4	Quadro complessivo della domanda di mobilità nell’area di studio	50
3.5	Passeggeri trasportati dalla rete TPL urbana di superficie e di area urbana	53
3.6	Massimo carico per linea nella fascia bioraria di punta.....	55
4.1	Frequenza di riferimento per la rete urbana milanese	65
4.2	Nuovi interventi finanziati dal PNRR.....	69
4.3	Destinazione dei nuovi veicoli e contratti stipulati	77
4.4	Finanziamenti inclusi nel PNRR.....	77
5.1	Utenti in attraversamento sulla linea 2 – biora di punta situazione attuale.....	119
5.2	Utenti in attraversamento sulla linea 12 – biora di punta situazione attuale.....	121
5.3	Utenti in attraversamento sulla linea 14 – biora di punta situazione attuale.....	123
5.4	Totale di utenti in attraversamento sulle tre linee – situazione attuale	124
5.5	Frazione di utenti in attraversamento da Nord nelle zone di riferimento – situazione attuale.....	124
5.6	Frazione di utenti in attraversamento da Sud nelle zone di riferimento – situazione attuale.....	125
5.7	Frazione di utenti destinati da Nord alle zone di riferimento– situazione attuale....	126
5.8	Frazione di utenti destinati da Sud alle zone di riferimento– situazione attuale.....	126
5.9	Utenti in attraversamento sulla linea 2 – biora di picco scenario futuro.....	128

5.10	Utenti in attraversamento sulla linea 12 – biora di picco scenario futuro.....	128
5.11	Utenti in attraversamento sulla linea 14 – biora di picco situazione futura.....	129
5.12	Totale di utenti in attraversamento sulle tre linee – situazione futura	129
5.13	Frazione di utenti in attraversamento da Nord delle zone di riferimento – situazione futura.....	129
5.14	Frazione di utenti in attraversamento da Sud delle zone di riferimento – situazione futura.....	130
5.15	Frazione di utenti destinati da Nord alle zone di riferimento – situazione attuale...	130
5.16	Frazione di utenti destinati da Sud alle zone di riferimento – situazione attuale.....	131
6.1	Confronto del numero di utenti nei diversi scenari – intera rete.....	139
6.2	Confronto della distanza percorsa nei diversi scenari – intera rete.....	140
6.3	Confronto del tempo di viaggio nei diversi scenari – intera rete	140
6.4	Confronto in origine dell’utenza nei diversi scenari – quadrante centrale.....	145
6.5	Confronto in destinazione dell’utenza nei diversi scenari – quadrante centrale.....	146
6.6	Spostamenti per linee utilizzate nell’ora di punta – rete attuale	148
6.7	Spostamenti per linee utilizzate nell’ora di punta – rete segmentata.....	148
6.8	Spostamenti per combinazione di linee utilizzate nell’ora di punta – rete attuale...	149
6.9	Spostamenti per combinazione di linee utilizzate nell’ora di punta – rete segmentata.....	150
6.10	Domanda di trasporto sulla rete tranviaria – scenario attuale	155
6.11	Domanda di trasporto sulla rete tranviaria – scenario prospettico.....	155
6.12	Offerta di trasporto sulla rete tranviaria – scenario prospettico.....	155
6.13	Ripartizione modale degli spostamenti meccanizzati delle persone – scenario PUMS.....	156

Allegati

Allegato 1: Nuovo assetto di rete filo-tranviaria nell'area metropolitana ed interurbana (Fonte: Agenzia di Bacino – PdB) e Schema futuro della rete tranviaria (Fonte: ATM).

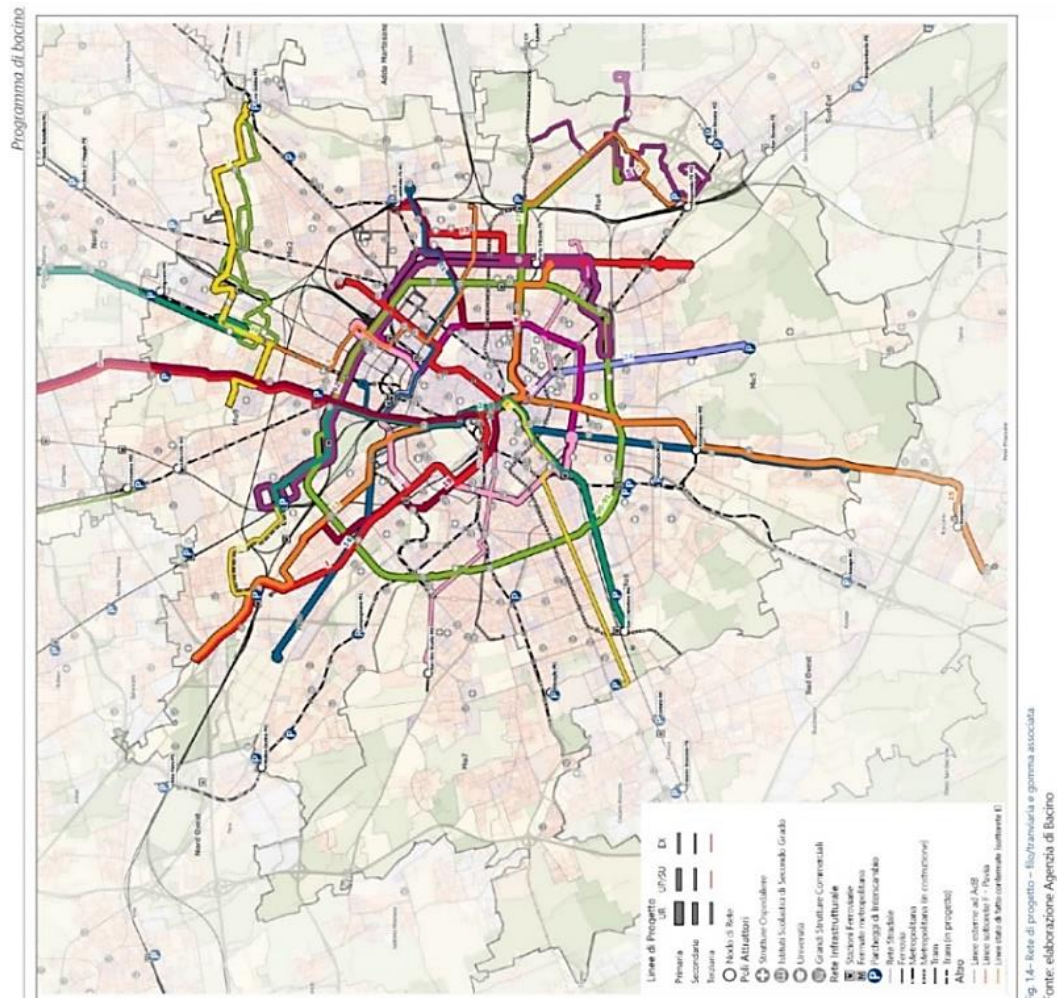


Fig. 14- Rete di progetto - filo-tranviaria e gomma associata
Fonte: elaborazione Agenzia di Bacino

Agenzia del TPL di Milano, Monza-Brianza, Lodi e Pavia

NUOVO ASSETTO DI RETE FILO-TRANVIARIA

LINEE D'AMBITO

Nello specifico, per quanto attiene alle linee di cui si prevede una modifica dell'assetto attuale, sono state identificate le seguenti linee primarie:

- 4 PADERNO DUGNANO Calderara – MI CAIROLI M2 (UR 1+)
- 14 CIM. MAGGIORE – GRATOSOGLIO (UR 1+)
- 15 ROZZANO Guido Rossa – MI VIA DOGANÀ (UR 1+)
- 2 SAN CRISTOFORO M4 – BOVISA FN (UR 1)
- 7 CASCINA GOBBA M2-OSP. NIGUARDA Pronto Soccorso (URT)

- 90/91 ISONZO-LOTTO (circolare destra/sinistra) (UR 1++)
- 92 BOVISA FN – VIALE ISONZO (UR 1)

Nello specifico, sono state identificate le seguenti linee secondarie:

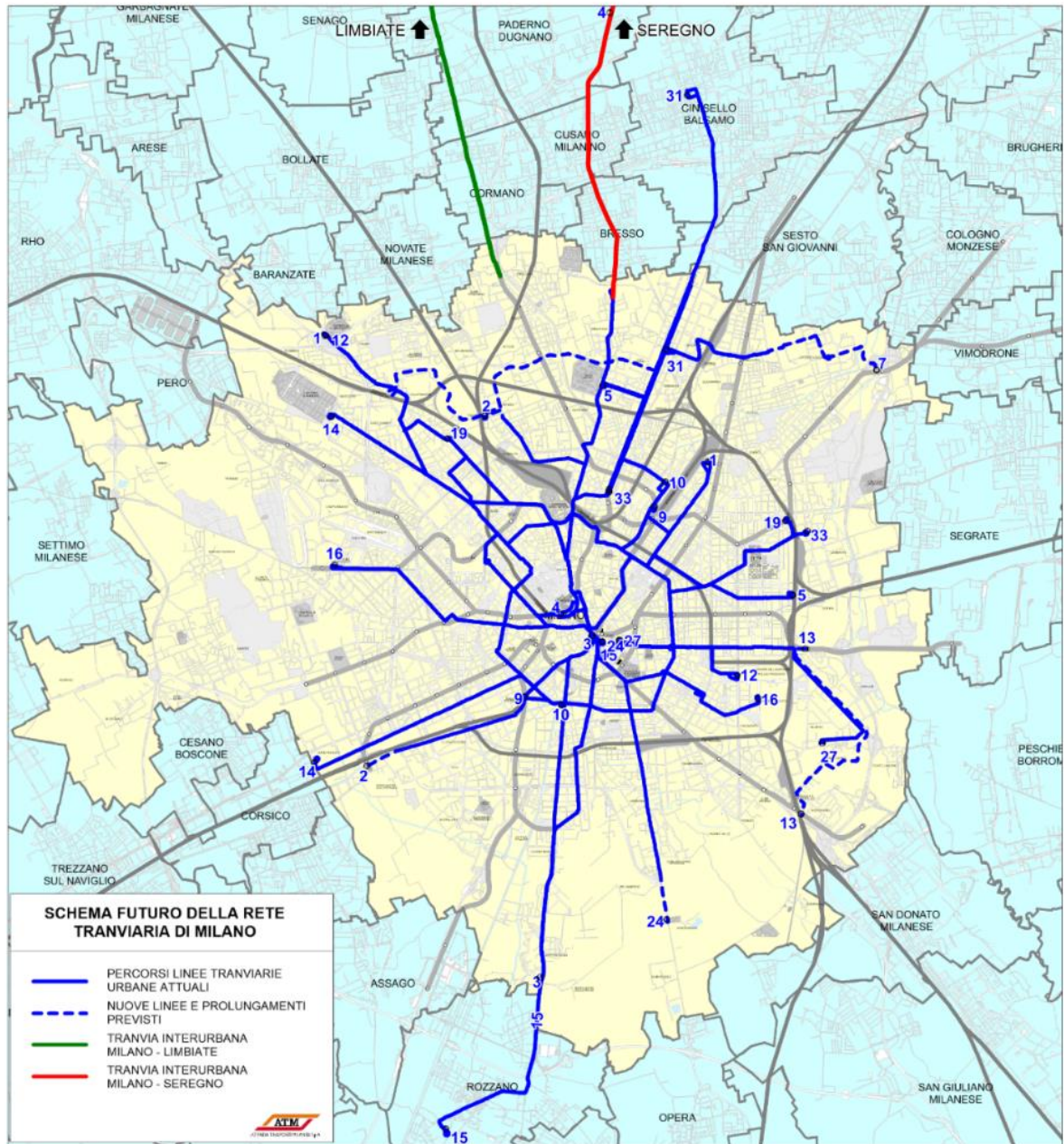
- 8 SAN CRISTOFORO – MI VIA OREFICI (UR 2+)
- 13 ROGOREDO M3/FS - MI REPETTI/Que Forlanini M4 (UR 2+)
- 21 CERTOSA FS – BOVISA FN (UR 2+)
- 32 SEREGNO FS – MI MACIACHINI M3 (EX1-Sottorete B)
- 29 LIMBIATE – MI COMASINA M3 (UP 2-Sottorete A)

LINEE GOMMA¹⁰

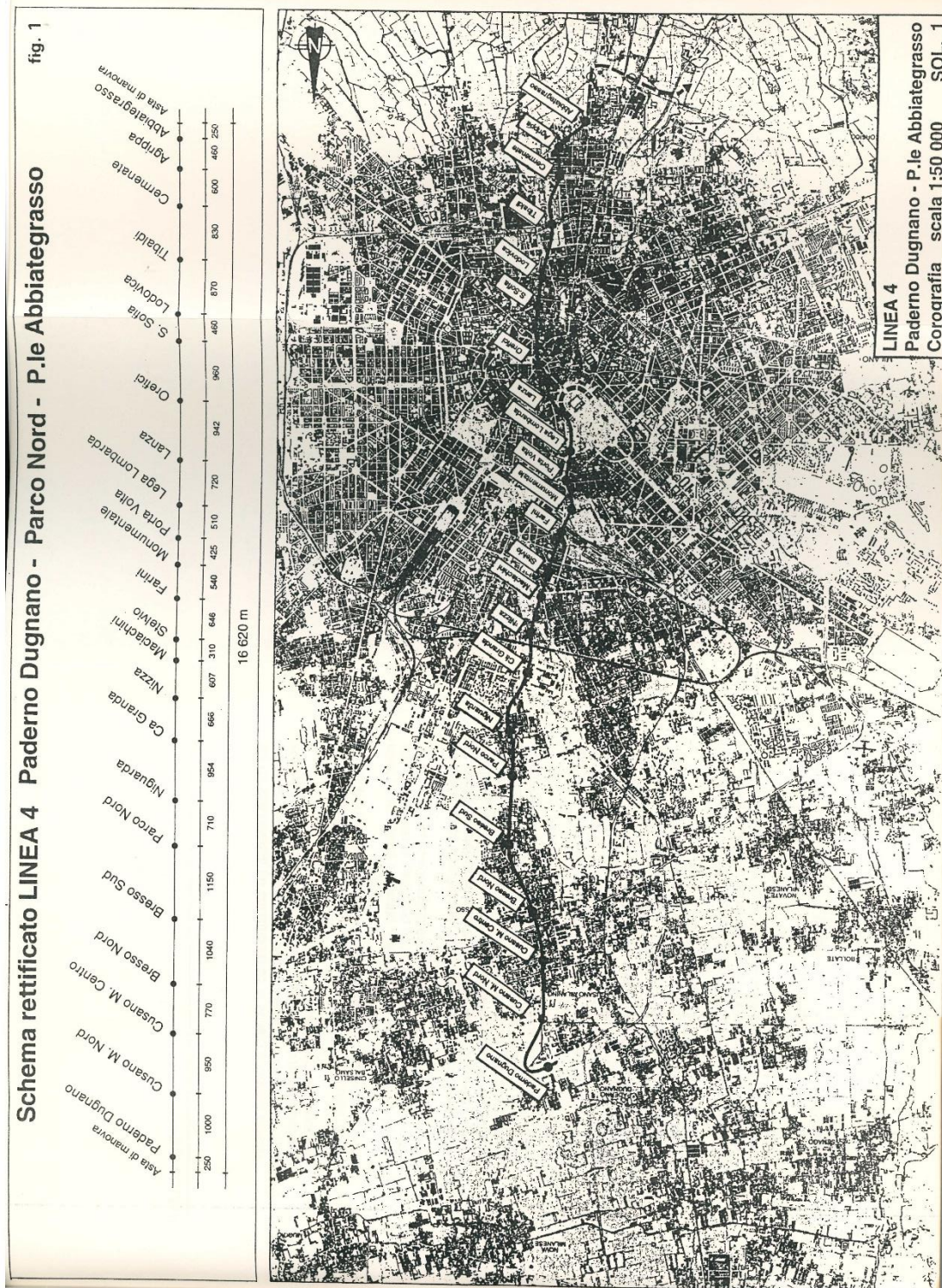
- 86 CA' GRANDA M5 – C.NA. GOBBA M2 (UR 2)
- 88 LINATE MI ROGOREDO FS/M3 (UR 2)

⁹ Intervento già in esercizio dall'8/09/2018

¹⁰ Sono indicate le modifiche della rete su gomma contestuali al nuovo assetto della rete tranviaria.



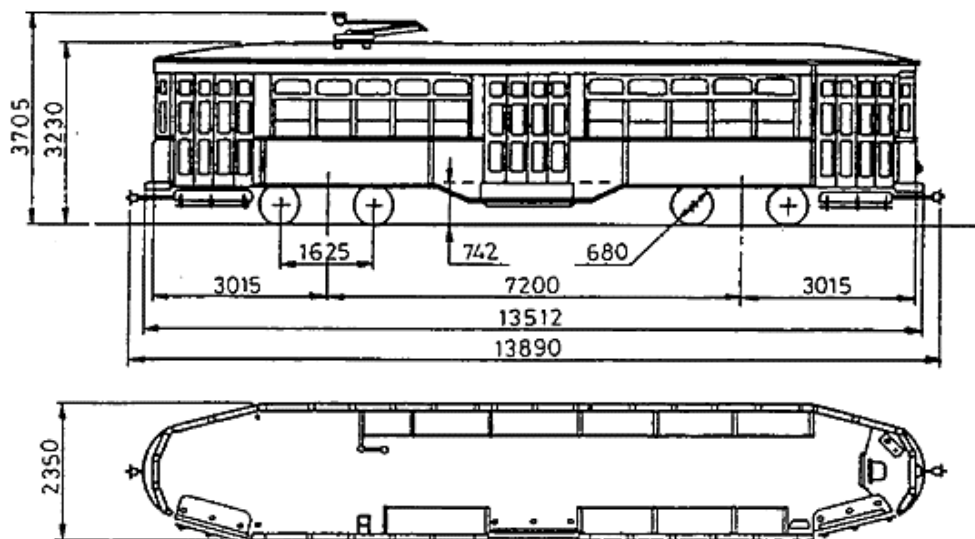
Allegato 2: Tracciato linea M4 del '92 da cui ha tratto ispirazione il progetto di sottoattraversamento tranviario (elaborazione MM).



Allegato 3: Immagini (fonte: urbanrail.net) e dettagli tecnici (fonte: ATM S.p.A.) della flotta tranviaria in servizio.



MOTRICI TIPO 1928

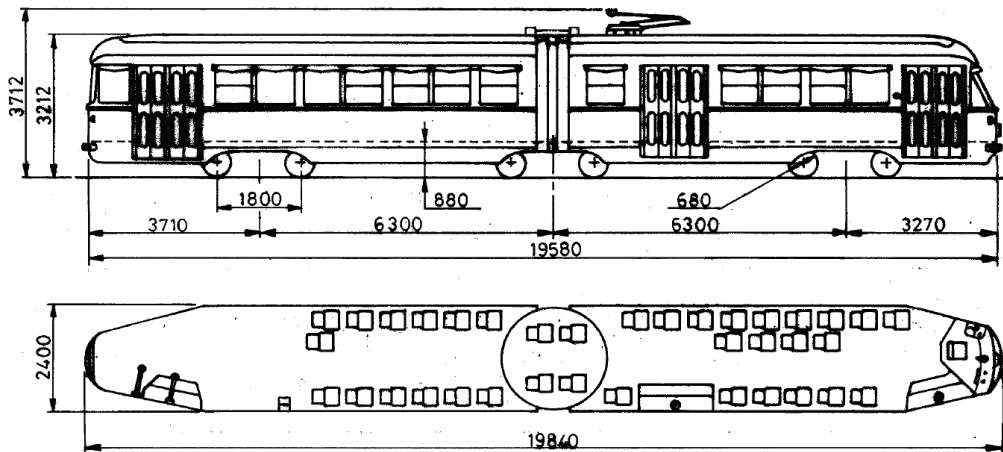


Tram serie Carrelli – noto come tram del '28



MOTRICI ARTICOLATE A 2 CASSE TIPO 4600

4/17

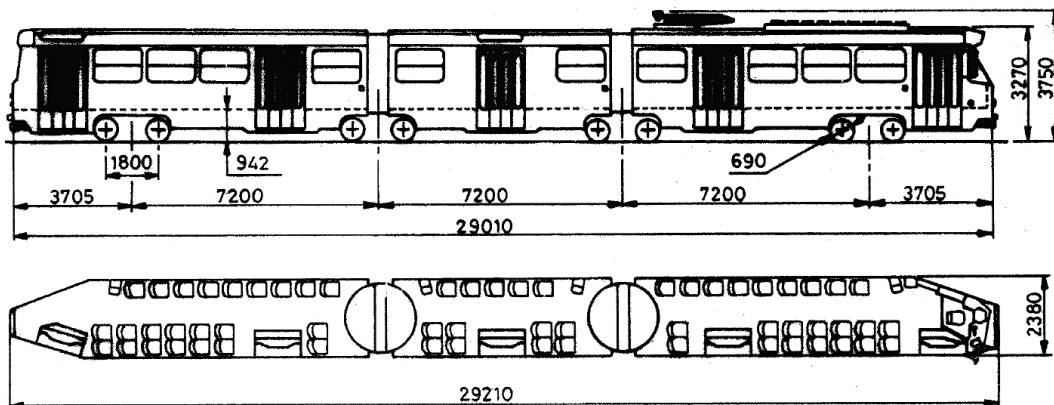


Tram serie 4600



MOTRICI ARTICOLATE A 3 CASSE TIPO 4900 (Serie 4900-4949)

7/17



Tram serie 4900 – noto come *jumbo train*



MOTRICI ARTICOLATE A PAVIMENTO BASSO TIPO 7000 (Serie 7001 - 7026)

9/17

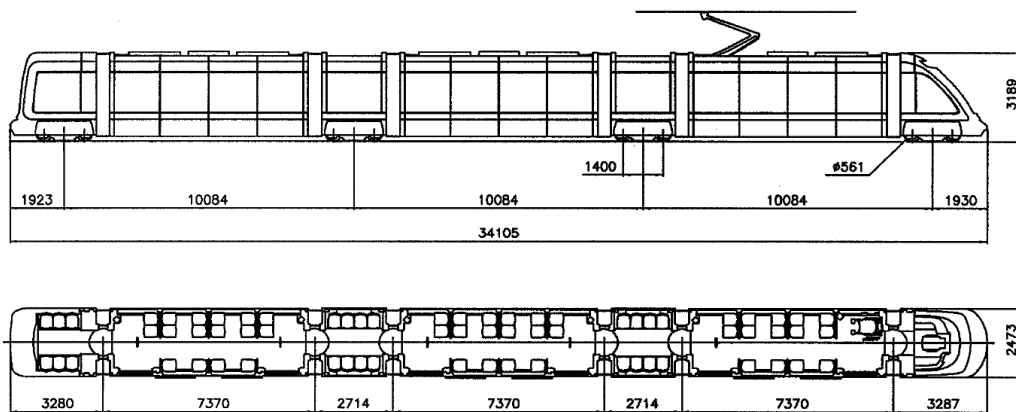
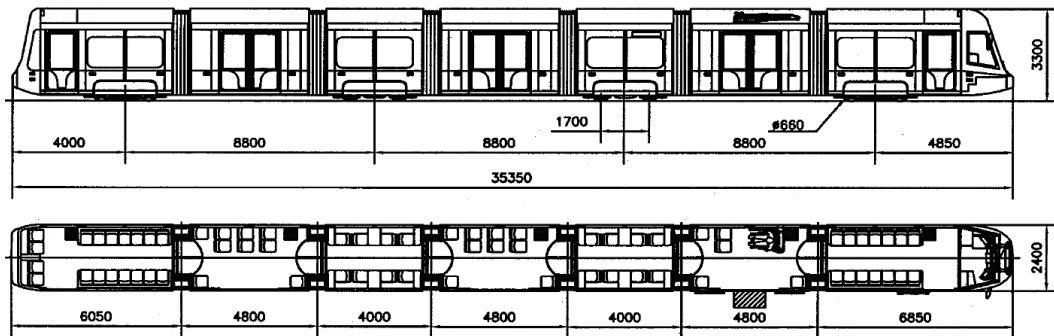


Fig. 1.6 Tram 7000 – noto come Eurotram



MOTRICI ARTICOLATE A PAVIMENTO BASSO TIPO 7100 (Serie 7101 - 7148)

10/17

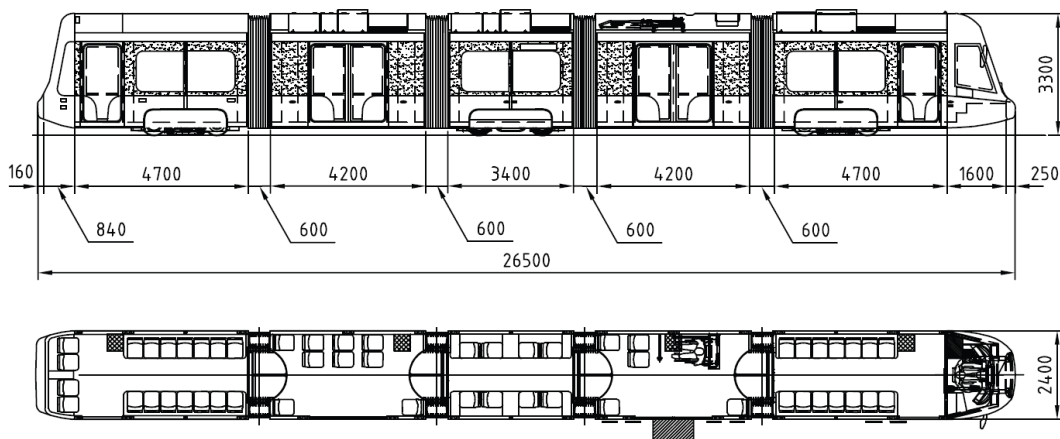


Tram serie 7100 – noto come Sirio



MOTRICI ARTICOLATE A PAVIMENTO BASSO TIPO 7600 (serie 7601÷7633)

12/13



Tram serie 7600 – noto come Siriello

Allegato 6: Fabbisogno vetture tranviarie – scenario futuro a regime.

Linea	Denominazione	Fabbisogno vetture tranviarie - Scenario futuro a regime										Tot con 7 a Certosa		Tot con 7 a Villapizzone		
		Blocc.	k35 1928	4600 4700	4900 AEG	4900 Rev.	EURO	Sirio 26	Sirio 35	BID. corti	BID. lunghi	Tot.	delta vs SdF	Tot.	delta vs SdF	
1	Greco - Roserio		24										24		24	
2	Villapizzone - Bovisa FN - S. Cristoforo M4			12	6								22	22	22	4
3	Gratosoglio - Cantù (M1/M3)				9		14						14	14	14	
4	Paderno Calderara - Cairoli						20						20	20	20	5
5	Ortica - Osp. Maggiore (Niguarda)		15										15	15	15	
7	C.na Gobba (M2) - P. Soccorso Niguarda						4	5					12	12	16	7
9	P.ta Genova (FS/M2) - Centrale (FS/M2/M3)						13						19	19	19	10
10	Lunigiana - XXIV Maggio		16										16	16	16	
12	Roserio - Molise				11	5							20	20	20	
13	Rogoredo FS M3 - Forlanini M4												7	7	7	7
14	Cimitero Maggiore - Lorenteggio				4		20						26	26	26	-4
15	Rozzano - Dogana (M1/M3)					13							23	23	23	
16	Monte Velino - Axum (M5)				15								15	15	15	
19	Lambrate (FS/M2) - Castelli		15	9									24	24	24	
24	IEO-Vigentino - Fontana				11	10	9						19	19	19	4
27	Fontana - Ungheria					13							13	13	13	
29	Comasina M3 - Limbiate		4										10	10	10	6
31	Cinisello B. - Bicocca M5 (Lagosta)						11						11	11	11	
32	Maciachini - Seregno FS												14	14	14	14
33	Lambrate (Rimenbranze) - Lagosta		11										11	11	11	
TOTALE IN LINEA PROGETTO		0	81	0	0	43	13	56	41	89	12	335	339	342		
TOTALE IN LINEA STATO DI FATTO		4	81	21	41	37	13	57	41	0	0	295	295	295		
DELTA		-4	0	-21	-41	6	0	-1	0	89	12	40	44	47		
DOTAZIONE COMPLESSIVA PROGETTO		0	123	0	0	51	20	68	48	100	14	424				
DOTAZIONE COMPLESSIVA STATO DI FATTO		4	123	33	49	51	25	68	48	0	0	401				
DELTA		-4	0	-33	-49	0	-5	0	0	100	14	23				

N.B.: in grassetto le linee nuove o modificate

Fonte: elaborazione ATM

In grassetto le nuove linee e quelle modificate, mentre in rosso sono opportunamente evidenziate le attribuzioni di tram bidirezionali, che includono anche le forniture connesse ai progetti di riqualificazione delle due tranvie interurbane e del prolungamento della linea 7, quest'ultimo oltretutto finanziato di recente dal PNRR anche in termini di materiale rotabile.

Allegato 8: Layout Stadler TANGO (per maggiori chiarimenti si veda il Par. 4.2.1)



Fonte: stadlerrail.com

Riferimenti bibliografici

1. Urban Public Transportation – Systems and Technology [1981], Vukan R. Vuchic
2. Urban Transit – Operations, Planning, and Economics [2006], Vukan R. Vuchic
3. Urban Transit – Systems and Technology [2007], Vukan R. Vuchic
4. PUMS DEL COMUNE DI MILANO [2018] – documento di piano
5. PIANO URBANO DELLA MOBILITÀ (PUM) DEL COMUNE DI MILANO [2001] – documento di piano
6. PROGRAMMA DI BACINO RELAZIONE GENERALE [VERSIONE 3.0 MILANO DICEMBRE 2018] – Agenzia del Trasporto Pubblico Locale del Bacino di Milano, Monza-Brianza, Lodi e Pavia
7. PUMS DELLA CITTA' METROPOLITANA DI MILANO – documento di piano, approvazione consiglio CMMI [REP.-N.-15-2021]
8. RAPPORTO MOBILITA [2021] – 18° rapporto sulla mobilità degli italiani governare le transizioni per una ripresa sostenibile - ISFORT
9. IL TRASPORTO URBANO SU ROTAIA IN ITALIA [2011] – situazione e linee di sviluppo all'avvio del nuovo decennio – ISFORT
10. PROGETTO PRELIMINARE DI RIQUALIFICAZIONE DELLE AREE PUBBLICHE DI PIAZZA CORDUSIO, VIA OREFICI, VIA TOMMASO GROSSI E LARGO SANTA MARGHERITA A MILANO [2018] – Freyrie Flores Architettura, Mobility in Chain
11. CARTA DELLA MOBILITÀ [2021] – ATM
12. BILANCIO CONSOLIDATO -E BILANCIO DI ESERCIZIO ATM S.pa [2021]
13. IL SOFTWARE DI PIANIFICAZIONE DELLE RETI DI TRASPORTO SVILUPPATO ALL'A.T.M DI MILANO [1993], Pierluigi Silvestri, Antonio Bardeschi
14. IL SISTEMA TRAMVIARIO FIORENTINO: STORIA DI UN SUCCESSO NON ANNUNCIATO – 5° convegno nazionale sistema tram [2013]
15. L'INSERIMENTO DELLE TRAMVIE NEI CENTRI STORICI: UNA RASSEGNA E IL CASO DI FIRENZE – 6° convegno nazionale sistema tram [2015]

16. DEVELOPMENT OF THE TRAM NETWORK IN THE BIG CITY (ON THE EXAMPLE OF LVIV) [2020], B S Posatskyi, T M Mazur, E I Korol – Department of Urban Planning, Institute of Architecture and Design, national university of Lviv polytechnic, Ukraine
17. URBAN TRANSFORMATION VS SOFT MOBILITY: THE ISTANBUL CASE-STUDY [2008], Emilia Giovanna Trifiletti – laboratorio TeMa (Territorio Mobilità e Ambiente) Dipartimento di Pianificazione e Scienza del Territorio, Università degli Studi di Napoli Federico II
18. PEDESTRIAN ZONES AS AN INTEGRAL PART OF TERRITORIAL DEVELOPMENT [2018] – Telecký Martin; Čejka Jiří; Bartuška L. MATEC Web of Conferences
19. SAFE AND SECURE CITIES FOR PEDESTRIANS AND SENIOR CITIZENS [2020], Karel Schmeidler – Institute of Technology and Business in České Budějovice, Department, České Budějovice, Southern Bohemia, Czech Republic
20. MODELLING OF CAPACITY AND PUBLIC TRANSPORT MODAL SPLIT FOR NEW CITY CENTRE IN BRATISLAVA [2019], Tibor Schlosser, Peter Schlosser, Dominika Hodakova, Andrea Zuzulova, Silvia Capayova – Faculty of Civil Engineering, STU Bratislava
21. CONDITIONS FOR USING OF TRAMS ON RAILWAY TRACKS SECTIONS IN AGGLOMERATION COMMUNICATION IN POLAND [2018], Zbigniew Durzyński, Marta Pacholek, and Rafał Cichy – Rail Vehicle Institute “TABOR”, Poznań, Poland
22. SUSTAINABLE TRANSPORT SYSTEMS: TRENDS ON NEEDS, CONSTRAINTS, SOLUTIONS [2014], B. Dalla Chiara, I. Pinna, POLITECNICO DI TORINO, Dept. DIATI, Transport Engineering, Torino, Italy
23. DIE DURCHMESSERLINIE APPENZEL–ST. GALLEN–TROGEN [2018], Thomas Baumgartner, Alexander Liniger

Riferimenti sitografici

1. <https://www.aiit.it/>
2. <http://www.cifi.it/>
3. <https://asstra.it/>
4. <https://www.stadlerrail.com/it/prodotti/detail-all/>
5. <https://blog.urbanfile.org/category/milano/>
6. <https://www.urbanrail.net/>
7. <https://www.amicitram.eu/>
8. <http://www.stagniweb.it/>
9. <https://www.milanocittastato.it/>
10. <https://www.cityrailways.com/>
11. https://mobilita.comune.fi.it/tramvia/sistema_tramviario/

Indice dei contenuti

Abstract.....	iii
Ringraziamenti	v
Introduzione.....	vii
1 – Inquadramento del problema.....	1
1.1 Impulsi e questioni sollevate.....	2
1.1.1 Limitazione di traffico e pedonalizzazione.....	3
1.2 Sistemi di trasporto e parametri di riferimento	5
1.2.1 Caratteristiche del sistema tranviario.....	5
1.3 Configurazioni delle reti di trasporto	7
1.3.1 Focus sul sistema tranviario.....	9
1.4 Attraversamento del centro cittadino	10
1.5 Pianificazione delle reti di trasporto	12
1.6 Stima della domanda, split modale e assegnazione	16
1.7 Criterio di progettazione preliminare.....	17
1.7.1 Focus sul sistema tranviario.....	18
1.8 Diagramma di carico e flussogramma di una rete TPL	19
2 – Confronto con altre realtà nazionali ed estere.....	21
2.1 Sistemi tranviari e servizio offerto.....	23
2.2 Attraversamenti tranviari urbani nel contesto europeo	24
2.2.1 Bruxelles (Belgio).....	24

2.2.2 Rouen (Francia).....	25
2.2.3 Grenoble (Francia)	26
2.2.4 Bordeaux (Francia).....	26
2.2.5 Nizza (Francia).....	28
2.2.6 Hannover (Germania).....	29
2.2.7 Confronti fra i casi-studio analizzati.....	31
2.2.8 Il caso di Firenze	32
2.2.9 Considerazioni sullo scenario italiano	38
3 – Stato di fatto – Area di Milano.....	39
3.1 Stato di fatto – rete TPL milanese.....	39
3.2 Stato di fatto – rete tranviaria urbana di Milano	41
3.2.1 Dati di esercizio.....	43
3.2.2 Classificazione delle linee per materiale rotabile impiegato	45
3.2.3 Sistemi di protezione e dotazioni di bordo	48
3.3 Correlazione con la domanda di trasporto	49
3.3.1 Focus sulla rete tranviaria	54
3.3.2 Esempi di linee tranviarie	57
3.4 Fermate accessibili e non, analisi e rappresentazione.....	62
4 – Piani di sviluppo della rete e della flotta.....	64
4.1 Interventi in corso.....	66
4.1.1 Prolungamento tranviario linea 7 Anassagora – Q.re Adriano.....	66
4.1.2 Prolungamento M1 Sesto FS – Monza Bettola.....	67
4.1.3 Realizzazione M4 San Cristoforo – Linate aeroporto	68
4.2 Interventi finanziati	68

4.3	Interventi programmati/pianificati	69
4.3.1	Interventi programmati.....	69
4.3.2	Completamento progetto linee T.....	72
4.3.3	Interventi pianificati	73
4.4	Piano di sviluppo della flotta.....	75
4.4.1	Programmi di acquisizione in atto	76
4.4.2	Programmi di potenziamento previsti	77
4.4.3	Piani aziendali di revisione e sostituzione dei mezzi obsoleti	78
4.5	Tram bidirezionali e dotazioni di bordo.....	79
4.5.1	Contesti di impiego dei tram Stadler con caratteristiche analoghe a quelle previste per la rete milanese	82
5	– Adeguamento della rete di trasporto	85
5.1	Modello di assegnazione impiegato	86
5.1.1	Modello di analisi della domanda	89
5.1.2	Modello di verifica della rete pubblica	89
5.1.3	Modello di verifica della rete stradale	91
5.2	Presentazione del caso-studio di Milano.....	92
5.2.1	Piazza Cordusio.....	95
5.2.2	Rete tranviaria in attraversamento di Piazza Cordusio	98
5.2.3	Assetto viario e criticità rilevate	99
5.2.4	Flussi di traffico che interessano l’area di Piazza Cordusio	101
5.2.5	Un punto critico per la pedonalità in centro.....	102
5.3	Segmentazione delle linee.....	105
5.3.1	Attestamento in Piazza Castello.....	106
5.3.2	Attestamento in Piazza Tommaso Edison.....	111

5.4 Simulazione e analisi numerica.....	113
5.4.1 Utenza coinvolta – scenario attuale	113
5.4.2 Utenza coinvolta – scenario futuro	127
6 – Evoluzione della domanda di trasporto attesa.....	132
6.1 Segmentazione delle linee	132
6.1.1 Linea 2 segmentata.....	133
6.1.2 Linea 12 segmentata.....	135
6.1.3 Linea 14 segmentata.....	137
6.2 Confronti delle simulazioni della rete odierna e segmentata	139
6.2.1 Dati riferiti all’intera rete	139
6.2.2 Dati riferiti alle zone O-D interessate dai percorsi tranviari.....	141
6.3 Evoluzione prevista dai Piani di Sviluppo aziendali.....	154
6.4 Carichi futuri	156
7 – Conclusioni.....	159
Indice delle figure.....	163
Indice delle tabelle.....	167
Allegati	169
Riferimenti bibliografici.....	183
Riferimenti sitografici	185