

Mobilità e ambiente nella città metropolitana di Bologna

Situazione, Piani e Progetti

17 Ottobre 2019
Bologna, Biblioteca San Domenico

SISTEMI TRANVIARI: LO STATO DELL'ARTE

Giovanni Mantovani
Ingegnere, libero professionista

SISTEMI TRANVIARI, LO STATO DELL'ARTE

SOMMARIO

1. Dominio, declino, ritorno
2. A confronto con metro e bus
3. Caratteristiche dei moderni sistemi
4. Inserimento nella città
5. Esempi di reti moderne

Jean Bruneau (1920-2001), per «Nantes du Bon Vieux Temps», Association Bruneau Artiste Peintre

SISTEMI TRANVIARI, LO STATO DELL'ARTE

SOMMARIO

1. Dominio, declino, ritorno
2. A confronto con metro e bus
3. Caratteristiche dei moderni sistemi
4. Inserimento nella città
5. Qualche esempio di reti

ORIGINI, EPOCA D'ORO, DECLINO

La prima tranvia

New York, 1832 (John Stephenson, nulla a che fare con George Stephenson), trazione a cavalli.

Diffusione delle tranvie a cavalli

Maggiore capacità di carico rispetto agli omnibus, a parità di forza di trazione, migliore comfort. Ma anche problemi.

Prima tranvia a cavalli in Italia: Torino, 1872.

Prima tranvia a cavalli a Bologna: 1880.

Grandissimo sviluppo con l'elettricità

Prima tranvia elettrica in esercizio nel mondo: Berlino Lichterfelde, 1881 (Siemens & Halske)

Prima tranvia elettrica in esercizio in Italia: Firenze-Fiesole, 1890 (sistema Sprague, alimentazione da filo aereo, mediante trolley).

Prima tranvia elettrica in esercizio a Bologna: 1903.

Notevolissimi vantaggi, il tram diviene dappertutto il mezzo di trasporto pubblico urbano e suburbano dominante.

Anni '10 del secolo scorso, oltre 2500 reti tranviarie urbane nel mondo. Il dominio dura fino agli anni '30.



Lichterfelde (Berlino), il primo tram elettrico (Siemens & Halske, 1881)

Tramonto (non dappertutto)

Dagli anni '30 e fino agli anni '70, con modalità diverse e non in tutti i Paesi, progressive chiusure. Le tranvie scompaiono in tantissime città.

I motivi del declino:

- Sviluppo delle metropolitane
- Evoluzione tecnica di autobus e filobus
- Richiesta di spazio per la motorizzazione privata
- Obsolescenza di veicoli e impianti
- Danni della seconda guerra mondiale
- *Lobbying* delle industrie della gomma e del petrolio

IL PASSATO REMOTO A BOLOGNA



GM 330302

Cacozza-Bondi-Amori: Quando a Bologna c'erano i tram ... – CEST 1996 GM 344139

RINASCIMENTO DEL TRAM

Perché il ritorno del tram

Dagli anni '80 vari motivi concorrono a promuovere la realizzazione di nuovi sistemi tranviari:

- Consapevolezza degli effetti negativi del forte aumento del traffico privato e della conseguente necessità di un rilancio del trasporto pubblico.
- Riconosciuta vantaggiosità, per ampie fasce di domanda di trasporto, di sistemi intermedi (sia per prestazioni, sia per oneri di realizzazione ed esercizio) rispetto alle metropolitane e ad autobus/filobus.
- Sviluppo di nuove tecniche per i veicoli e per gli impianti tranviari.
- Nuovi criteri di inserimento urbano delle linee.

Dove il ritorno del tram

- Principalmente in grandi Paesi dell'Europa occidentale dove le dismissioni furono vaste. Paese pilota: la Francia.
- Ma anche in altri continenti. Sistemi realizzati dopo il 1975:
 - Africa, 11
 - Asia, 22
 - America, 37 (di cui 22 in USA)
 - Australia: 4

RETI TRANVIARIE IN EUROPA

	1984	2019
RUSSIA	68	61
GERMANIA	59	59
FRANCIA	3	30
UCRAINA	22	19
POLONIA	14	15
ITALIA	5	13
SPAGNA	1	13
ROMANIA	13	11
TURCHIA	0	9
GRAN BRETAGNA	1	8
CECHIA	7	7
SVIZZERA	7	6
AUSTRIA	5	5
BELGIO	5	5
Altri paesi europei	32	36
TOTALE	242	297

Francia 1967-1984

Tre città con tranvie

● sistemi in esercizio

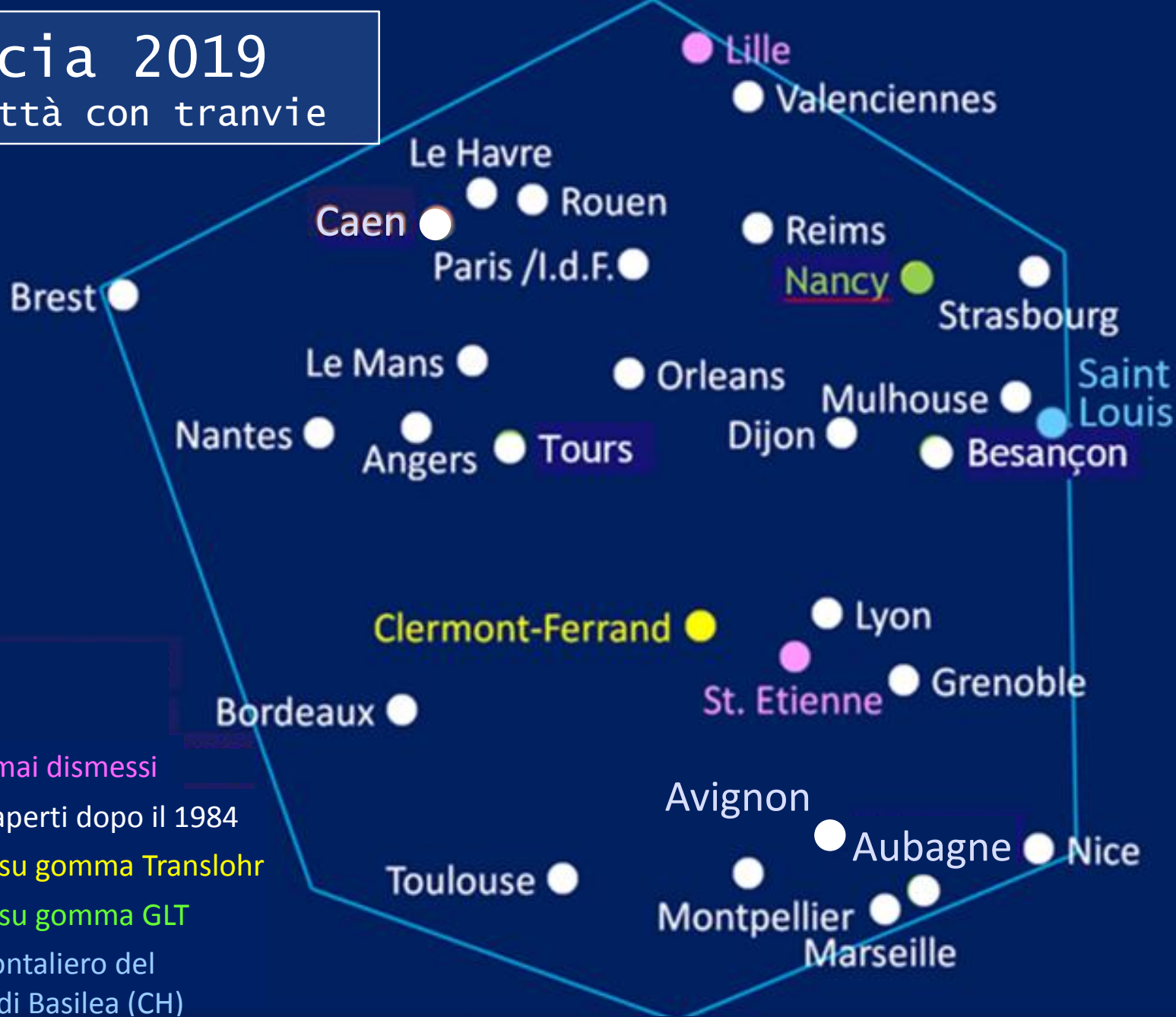
● Lille

●
St. Etienne

●
Marseille

Francia 2019

Trenta città con tranvie



Italia 1974-2002

Cinque città con tranvie

● sistemi mai dismessi

● linea di tipo particolare,
mai dismessa



Italia 2019




Tredici città con tranvie

- sistemi mai dismessi
- nuovi sistemi in esercizio
- nuovi sistemi "tram su gomma", in esercizio
- linea di tipo particolare, mai dismessa



TRASPORTO SU FERRO IN ALCUNI PAESI EUROPEI

L'Italia è nettamente sotto alla media europea

Paese	Sviluppo linee (km)		
	Tranvie	Metropolitane	Ferrovie suburbane
			
Germania	2.023	650	2.038
Francia	756	361	698
Gran Bretagna	244	673	1.695
Spagna	261	610	1.432
Italia	506	247	738
Italia rispetto a media EU	66,7 %	43,6 %	55,9 %

Fonte: Legambiente 2019

NUOVE TRANVIE ANCHE NEGLI ALTRI CONTINENTI



Casablanca



Wuhan



Rio de Janeiro



Sydney

SISTEMI TRANVIARI, LO STATO DELL'ARTE

SOMMARIO

1. Dominio, declino, ritorno
2. A confronto con metro e bus
3. Caratteristiche dei moderni sistemi
4. Inserimento nella città
5. Qualche esempio di reti



GM 341911

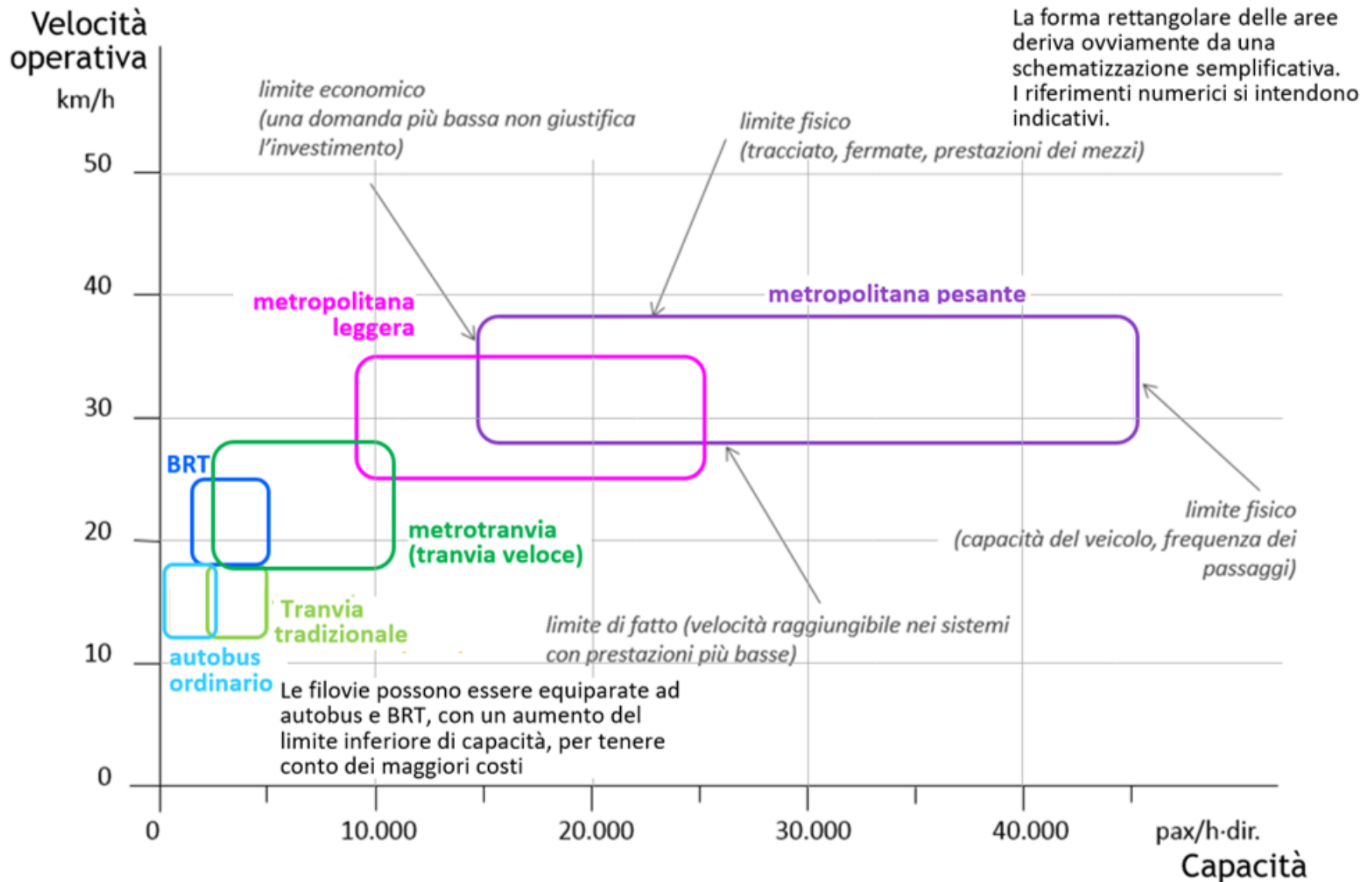


GM 250804

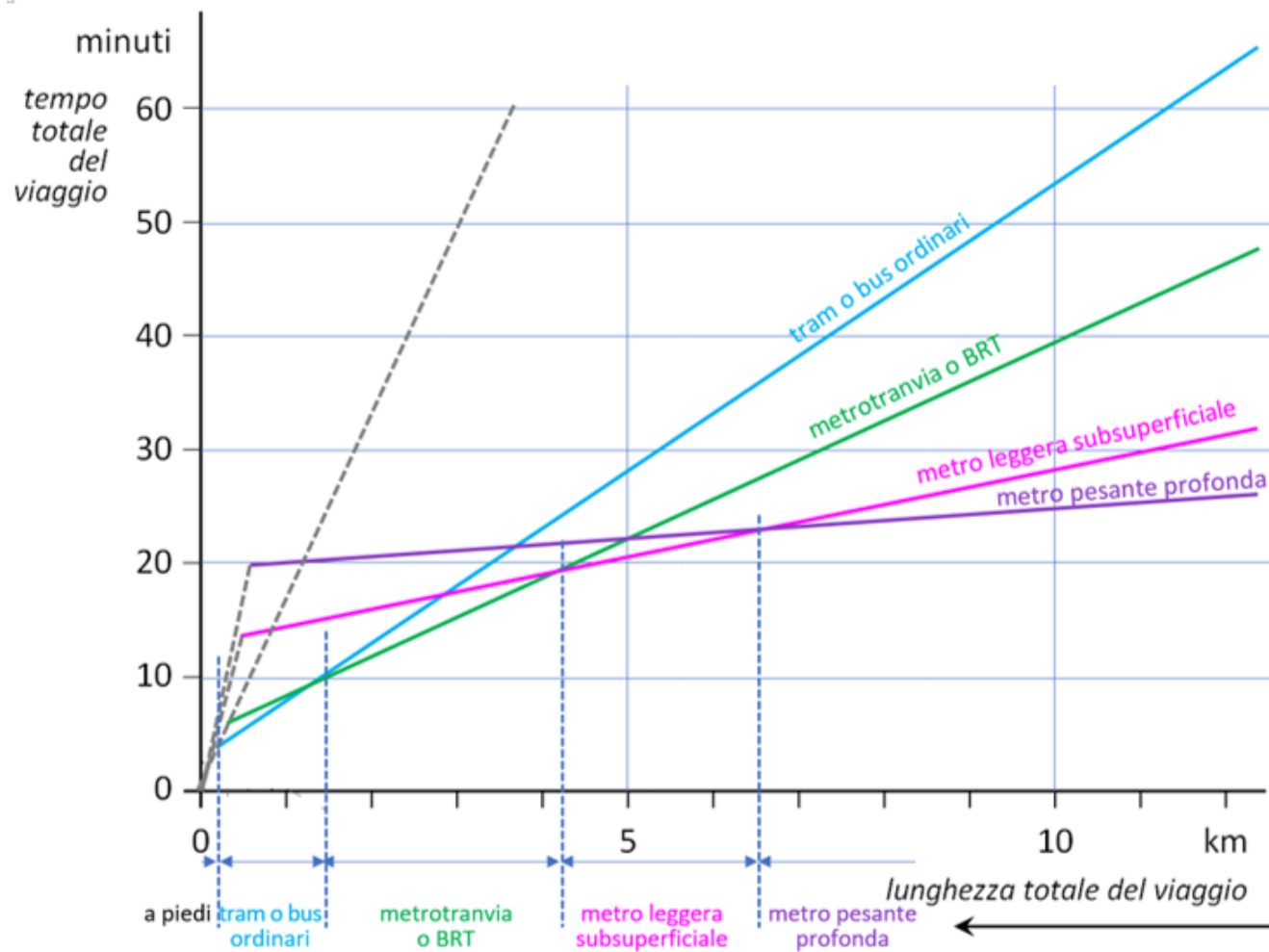


GM 350333

CAMPI SPECIFICI DI CAPACITÀ E VELOCITÀ OPERATIVA



TEMPI DI SPOSTAMENTO DA PORTA A PORTA



Si deve considerare non solo il tempo di viaggio sul mezzo di trasporto ma anche quelli necessari per i tragitti dall'origine al punto di imbarco e dal punto di sbarco alla destinazione e il tempo di attesa.

I riferimenti numerici si intendono indicativi.

vettore che offre lo spostamento più rapido da porta a porta

COSTI DELLE TRANVIE



Per valutare il costo di realizzazione di tranvie e metrotranvie bisogna considerare le varie fasi di progettazione, gli espropri, le forniture, i lavori di costruzione, le opere d'arte, i lavori accessori (ad es. spostamento di sottoservizi, opere di riqualificazione urbana), il collaudo.

Il costo parametrico complessivo si distribuisce in una fascia molto ampia, indicativamente

da 10 a 40 M€/km

Per fare correttamente i confronti bisogna conoscere bene le caratteristiche delle linee confrontate e sapere che cosa è realmente compreso nell'importo dato come complessivo.

Si discute se le opere di riqualificazione urbana, comunque auspicabili, debbano essere imputate alla realizzazione della linea di trasporto.

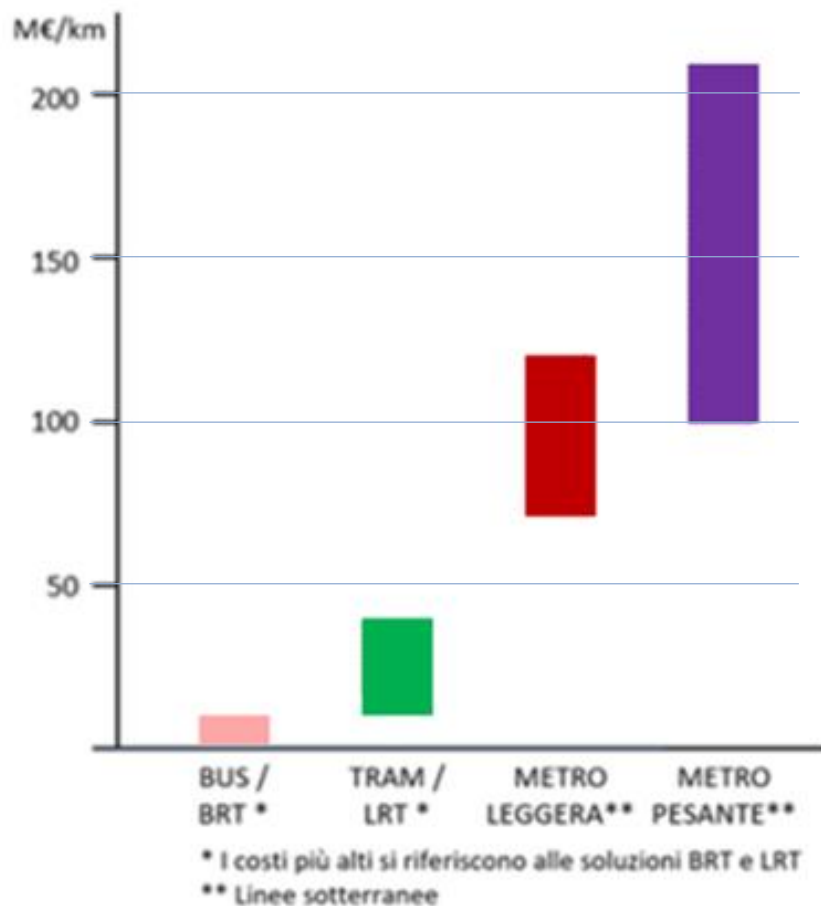


Il costo di esercizio comprende quelli di guida, delle altre attività del personale di movimento, di manutenzione di impianti e rotabili, dell'energia, i costi generali aziendali, ecc. ecc.

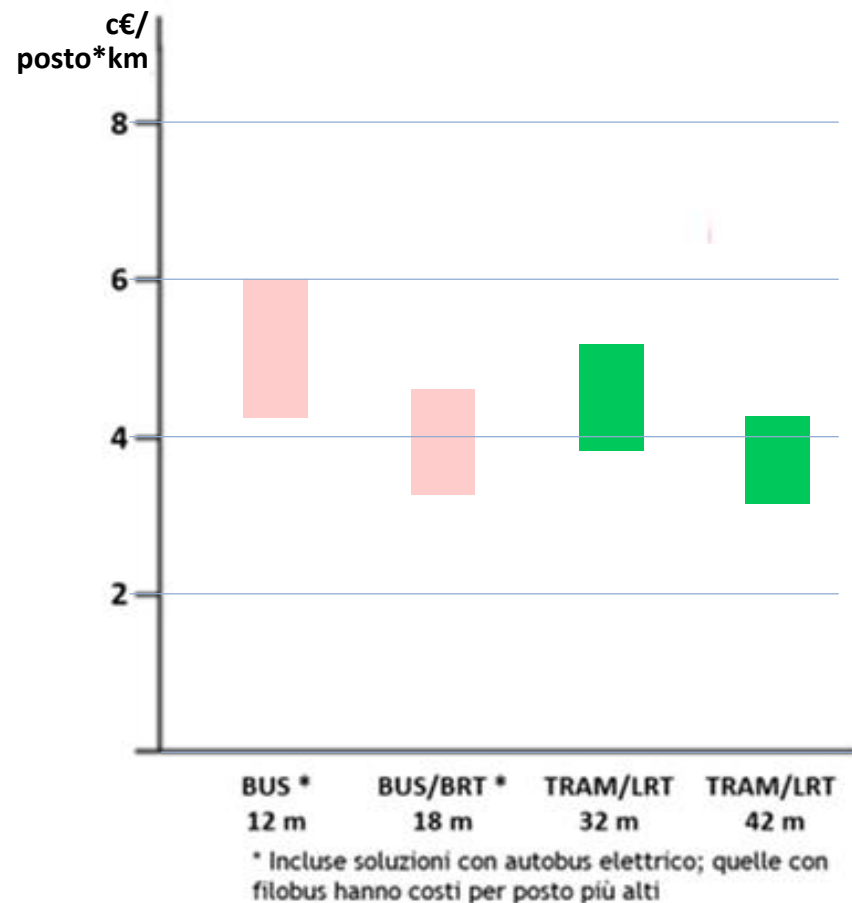
Per tranvie e metrotranvie una fascia indicativa del costo di esercizio (espresso in euro per un kilometro percorso dal veicolo) va

da 8 a 12 €/km*v

COSTI A CONFRONTO



COSTI DI REALIZZAZIONE («CapEx»)



COSTI DI ESERCIZIO («OpEx»)

*Per un confronto significativo si deve tenere conto dei posti offerti dal veicolo. Quindi il confronto non va fatto tra i costi per veicolo*km, bensì tra quelli per posto*km*

LA SCELTA TRA METRO, TRAM E AUTOBUS/FILOBUS

DIPENDE DUNQUE DA UN INSIEME DI CRITERI. NON PUÒ BASARSI SU UN SINGOLO CRITERIO, O ADDIRITTURA ESSERE FATTA SECONDO SIMPATIE

In una città di medie dimensioni, tra 300 e 500 mila abitanti:

▪ LA METROPOLITANA

- ✓ ha costi di realizzazione molto superiori a quelli del tram e elevati costi di gestione delle stazioni
- ✓ non è quindi economicamente sostenibile per la reale domanda di trasporto
- ✓ per spostamenti fino a circa 5 km dà tempi da porta a porta maggiori di quelli del tram (ed è meno confortevole, anche perché il viaggio avviene senza contatto almeno visuale con la città)
- ✓ I cantieri di costruzione (a parte i rischi geotecnici, archeologici ecc.) causano disagi maggiori del tram, e per tempi più lunghi

▪ L'AUTOBUS O IL FILOBUS

- ✓ non offrono una capacità di trasporto sufficiente per la reale domanda di trasporto (la trazione elettrica risolve solo il problema dell'inquinamento atmosferico, non aumenta la capacità; va anche ricordato che l'autobus elettrico potrebbe porre problemi di smaltimento delle batterie, ancora da chiarire del tutto)
- ✓ se utilizzati in condizioni limite di capacità, sono poco confortevoli, hanno un maggiore impatto sulla circolazione e sono soggetti a irregolarità dei passaggi

▪ IL SERVIZIO FERROVIARIO METROPOLITANO

- ✓ è la risposta valida per le maggiori distanze dell'area metropolitana

SISTEMI TRANVIARI, LO STATO DELL'ARTE

SOMMARIO

1. Dominio, declino, ritorno
2. A confronto con metro e bus
3. **Caratteristiche dei moderni sistemi**
4. Inserimento nella città
5. Qualche esempio di reti

GM 372620

CARATTERISTICHE DEI MODERNI VEICOLI TRANVIARI

- ✓ Veicoli lunghi, con elevata capienza (tipici: da 30 a 42 m)
Capienze indicative (a densità di passeggeri in piedi: $4/m^2$): 200 per tram bidirezionali da 32 m, 270 per tram da 42 m
- ✓ Costruzione modulare
- ✓ Pavimento ribassato
Permette l'incarozzamento a raso e, grazie anche al minimo «gap» orizzontale, l'agevole accesso di PRM
- ✓ Azionamenti di trazione elettronici, motori trifase
Regolazione ottima della marcia, risparmio energetico, ottimizzazione di ingombri e manutenzione.
- ✓ Possibilità di marcia senza linea aerea di contatto
Varie tecniche di alimentazione: captazione al suolo; accumulo a bordo con ricarica durante la corsa sotto linea di alimentazione aerea; accumulo a bordo con ricarica rapida alle fermate
- ✓ Interno ben arredato, accogliente, luminoso
- ✓ Marcia confortevole e silenziosa
- ✓ Sistema centrale di controllo e diagnostica
- ✓ Varie funzioni complementari
Trasmissione fonia e dati; funzioni di bordo per localizzazione, monitoraggio, priorità semaforica, formazione itinerari; dispositivo vigilante; controlli di sicurezza; climatizzazione cabina e comparto passeggeri; diffusione di informazioni dinamiche visuali e sonore ai passeggeri; tvcc.



EVOLUZIONE DELL'ARCHITETTURA: ALTA CAPACITÀ (1)

Crescita progressiva della capacità

Dai primi tram ad oggi, vari fattori (principalmente incremento della domanda di trasporto, economia di esercizio) hanno promosso un progressivo incremento della capacità dei tram.

È stato ottenuto con l'aumento della lunghezza dei convogli, dai 5 metri del primo tram elettrico in servizio commerciale (1881) ai 30-40 m oggi tipici, ed oltre. Anche la larghezza è aumentata, da poco più di 2 m a 2,40 (oggi tipici) e a 2,65 m.

Col crescere della lunghezza, è evoluto anche il rodiggio: da veicoli a 2 assi, spesso con rimorchi anch'essi a 2 assi, si è passati a veicoli a 2 carrelli e poi a veicoli a 2 casse intercomunicanti, tipicamente a 3 carrelli di cui il centrale condiviso (carrello Jakobs).

Ulteriori sviluppi hanno portato a veicoli a più casse, realizzati iterando la configurazione di quelli a due casse o adottando architetture multiarticolate, con casse più corte, sospese su carrozzini con carrelli non ruotanti.

Quest'ultima soluzione, oggi molto diffusa, si è mostrata non appropriata per reti con curve di piccolo raggio.



Lungo 14 metri: Milano, tram a carrelli tipo Peter Witt (1928)



20 metri: Roma, tram articolato «Stanga», 2 casse su 3 carrelli (1947)

EVOLUZIONE DELL'ARCHITETTURA: ALTA CAPACITÀ (2)

Vantaggi dei tram ad alta capacità

- Riduzione del costo di esercizio
Componente importante del costo è quella del personale di guida. Più passeggeri porta il veicolo, meno incide tale componente.
- Minore disturbo alle altre circolazioni veicolari
A parità di offerta di trasporto, un tram ad alta capacità richiede una frequenza dei passaggi minore degli autobus o filobus, quindi interferisce meno con le altre circolazioni.
- Maggiore permeabilità trasversale delle strade
Passaggi meno frequenti, a parità di offerta di trasporto, riducono gli impedimenti all'attraversamento pedonale (nonché l'ostruzione visuale).

Unidirezionale o bidirezionale?

Ciascuna soluzione ha vantaggi e svantaggi. Oggi prevale la scelta del bidirezionale.



28 metri: Milano, «Jumbo-tram» a 3 casse (1971)



34 metri: Milano, Eurotram, multiarticolato (1999)

EVOLUZIONE DELL'ARCHITETTURA: PIANALE RIBASSATO (1)

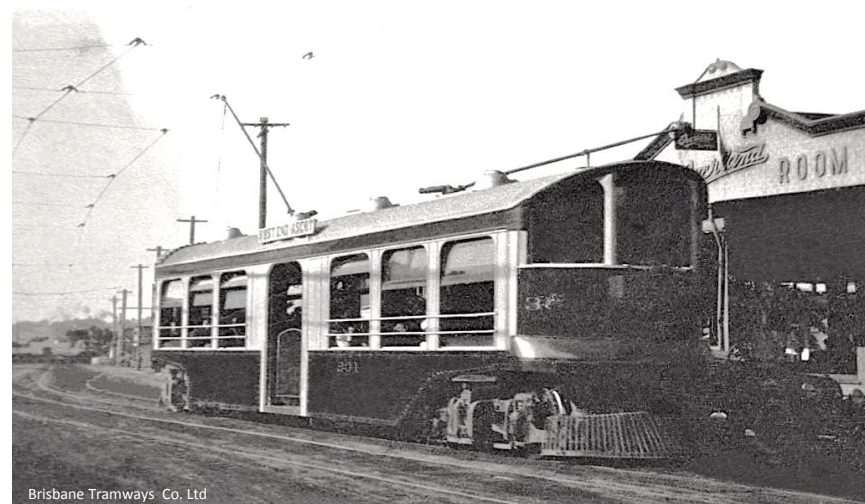
Parzialmente ribassato

Alla necessità di aumentare la capacità dei veicoli, si è aggiunta quella di agevolare imbarco e sbarco (non solo alle persone con ridotta mobilità, ma a tutti, migliorando così anche la velocità commerciale): accessi del veicolo al livello, o poco più, della quota della banchina di fermata o del marciapiede.

Realizzazioni di tram con accesso agevolato risalgono all'inizio del '900, ma il lancio del pianale parzialmente ribassato in tempi moderni è del 1984, con la seconda serie del *Tram Français Standard*, con soglie a 35 cm sul p.d.f., adottata per la prima volta a Grenoble.

Si tratta di tram a due casse più un piccolo carrozzino centrale. Il pavimento è alto alle estremità del veicolo, in corrispondenza dei carrelli motori, di tipo tradizionale; è basso altrove, grazie all'equipaggiamento del carrozzino con ruote portanti indipendenti.

Tram italiani di concezione analoga al *T.S.F. 2* sono la serie 5000 di Torino (Fiat Ferroviaria, 1989) e la serie 9000 di Roma (Socimi, 1990).



Brisbane, tram a pianale parzialmente ribassato, Brill (ca. 1920)



Grenoble, Tram Français Standard 2, Alstom (1986)

EVOLUZIONE DELL'ARCHITETTURA: PIANALE RIBASSATO (2)

Interamente ribassato

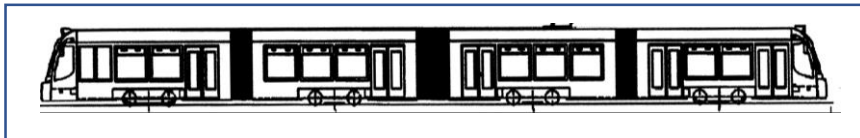
Per eliminare i gradini all'interno, necessari per l'accesso alle estremità a pavimento alto, si sono sviluppate architetture innovative. Prototipi:

- Socimi, Italia (1989), senza seguito commerciale
- MAN, Germania (1990), con sviluppi commerciali (Brema, Berlino, e altre città).

I tipi di architetture a pianale ribassato si possono riportare in sostanza a tre categorie.

[1] La soluzione che fu adottata da MAN si basa su più casse dotate ciascuna di un carrello centrale con ruote prive di assile. L'assenza degli assili consente di mantenere basso con continuità il pavimento (si rialza solo in corrispondenza delle ruote e lì vengono installati sedili).

Un esempio attuale è l'«Avenio» (non l'«Avenio M») di Siemens, basato su casse modulari da 9 m (veicoli lunghi da 18 a 72 m).



In Viganò, 4° Convegno Sistema Tram

Milano, prototipo di tram a pavimento inter. ribassato, Socimi (1989)



Voogd075 / wikipedia.org

L'Aia, tram a pavimento interamente ribassato, Siemens Avenio (2014)

EVOLUZIONE DELL'ARCHITETTURA: PIANALE RIBASSATO (3)

Interamente ribassato (*segue*)

[2] Una soluzione oggi molto diffusa è quella dei tram multiarticolati, basati su carrozzini più o meno corti, sostanzialmente solidali col loro rodiggio a ruote indipendenti, e su casse sospese, che appoggiano ai due lati sui carrozzini.

Tale soluzione offre vantaggi costruttivi (e quindi riduzioni di costi) nonché un'area spazzata in curva minore delle soluzioni tradizionali. Si ha però una maggiore trasmissione delle forze di guida in curva, che, su curve di piccolo raggio, provoca una riduzione del comfort di viaggio e un aumento dell'usura di rotaie e bordini. Sono quindi adatti per linee che presentano curve di ampio raggio, con transizione.

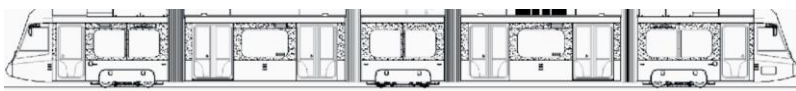
Un esempio sono i «Sirio» di AnsaldoBreda (ora Hitachi Rail Italy) in circolazione a Milano, Firenze, Napoli e in altre città. La versione da 32 m si compone di due moduli di estremità lunghi 6,6 m, un carrozzino centrale lungo 3,4 m e due casse sospese lunghe 6,5 m.



Milano, tram a pianale inter. ribassato, AnsaldoBreda Sirio (1989)



Palermo, tram a pavim. interam. ribass., Bombardier Flexity 2 (2014)



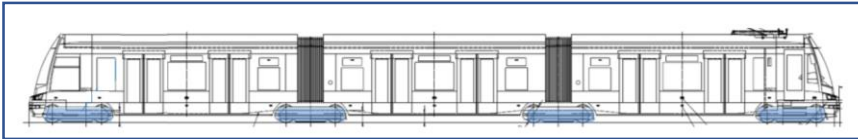
EVOLUZIONE DELL'ARCHITETTURA: PIANALE RIBASSATO (4)

Interamente ribassato (*segue*)

[3] Un altro tipo di tram a pianale interamente ribassato si realizza mantenendo i tradizionali carrelli rotanti, grazie a particolari soluzioni della struttura dei carrelli, basate su ruote indipendenti. A parità di lunghezza totale, hanno meno casse e più carrelli dei multiarticolati. In corrispondenza dei carrelli si hanno minimi aumenti della quota del pavimento, agevolmente raccordato mediante brevi rampe con piccola pendenza.

Sono veicoli adatti per le reti con tracciati più tormentati.

Un esempio è il «ForCity 15T» di Škoda; nella versione di Praga è lungo 31 m, con 3 casse su 4 carrelli, di cui i due intermedi sono Jakobs, ma è stato realizzato anche a 4 casse su 5 carrelli ed è possibile una lunghezza maggiore.



Praga, tram a pianale inter. rib. e carrelli ruotanti, Škoda 15T (2009)

Un cenno all'«ULF», il tram ultraribassato

A Vienna circolano tram a pianale ultraribassato (SGP - Elin, 1995), col pavimento a 19 cm sul p.d.f., tale da consentire l'incarico quasi a raso da un normale marciapiede. Questo ambizioso obiettivo ha però richiesto una specialissima architettura del veicolo, che comporta anche una complessa manutenzione. Dopo la fornitura di 332 veicoli ULF, Vienna è tornata a soluzioni più comuni.



CARATTERISTICHE DELLE MODERNE RETI TRANVIARIE

- ✓ **Ruolo primario nel trasporto pubblico urbano, ben integrato con altri modi**
Rete fondamentale nelle città medie o piccole, rete complementare delle metropolitane nelle grandi città. Capillarità del servizio ottenuta mediante adduzione/distribuzione con mezzi su gomma o alternativi.
- ✓ **Flessibilità operativa: tratte veloci, tratte lente, quasi-metro, quasi-treno**
In una stessa linea possono coesistere tratte con caratteristiche diverse, adeguate al tipo di tessuto urbano attraversato. E, in modo "tram-treno", una linea può comprendere tratte ferroviarie, anche in promiscuità.
- ✓ **Sede per lo più esclusiva**
Necessaria ai fini della regolarità. Ottenuta anche mediante opere infrastrutturali di limitata entità.
- ✓ **Tecniche di armamento innovative**
Qualità della geometria. Riduzione dei tempi di costruzione. Soppressione delle vibrazioni. Manutenzione agevole.
- ✓ **Efficace priorità semaforica**
Sistemi centralizzati a previsione di arrivo, che assicurano al tram elevata probabilità di via libera e riducono la penalizzazione dei flussi di traffico ordinario in conflitto.
- ✓ **Controllo centralizzato**
Monitoraggio in tempo reale della regolarità della circolazione, delle condizioni dei veicoli, dello stato degli impianti. Telecomando degli impianti. Elaborazione e attuazione di interventi correttivi della circolazione.
- ✓ **Cura nell'inserimento nell'ambiente, riqualificazione urbana**
Tutela paesaggistica e monumentale. Interventi sull'intera sezione stradale. Rinnovo dell'arredo urbano.



VERSATILITÀ DELLE MODERNE RETI TRANVIARIE

L'ESEMPIO DI STRASBURGO

- Sei linee; la prima attivata nel 1994; nel 2018 la più recente estensione
- Rete magliata, con sovrapposizioni di linee
- Lunghezza degli impianti (b.d.): 46 km
- Lunghezza cumulata delle linee: 68 km
- Numero di veicoli: 107
(Eurotram lunghi 33 e 43 m, Citadis 45 m)
- Passeggeri nel giorno feriale: >320.000



Nel centro storico, tra i pedoni



Ai margini del centro, in sede riservata laterale



La fermata «Gare» nel breve tratto sotterraneo



In periferia, in sede segregata

Versatilità della tranvia
(linea A, la prima; foto del giorno dell'inaugurazione, 1994)



Place de l'Homme de Fer (centro città, oggi nodo di 5 linee tranviarie)

TRANVIA E METROTRANVIA

A proposito di versatilità. Dalla norma UNI 8379:2000:

tranvia

Sistema di trasporto per persone negli agglomerati urbani costituito da veicoli automotori o rimorchiati dai medesimi, a guida vincolata, in genere su strade ordinarie e quindi soggetto al Codice della Strada, con circolazione a vista.

tranvia veloce (metrotranvia)

*Sistema di trasporto che mantiene le caratteristiche della tranvia ..., con possibili realizzazioni anche in tratte suburbane, ma che consente velocità commerciali e portate superiori grazie ad adeguati provvedimenti (per esempio delimitazioni laterali della sede, riduzione del numero di attraversamenti, semaforizzazione degli attraversamenti con priorità per il sistema, ecc.), atti a ridurre le interferenze del sistema con il restante traffico veicolare e pedonale. Essendo questo sistema la soluzione tecnologicamente evoluta del precedente, **possono esistere sistemi misti (tranvia - tranvia veloce)** composti di tratte di linea funzionalmente concepite con riferimento ai due sistemi. Le tratte di linea afferenti alle diverse tipologie di sistema mantengono le caratteristiche rispettivamente previste e di conseguenza il sistema di trasporto sarà costituito in parte da tranvia e in parte da tranvia veloce.*

Tipiche velocità commerciali

- Tranvia tradizionale: 12 - 16 km/h
- Metrotranvia: 20 - 25 km/h
- Linee miste: 16 - 20 km/h



Tram. Milano, piazza della Scala



Metrotram. Torino, fermata Stura

- Il termine **metrotranvia** corrisponde di massima al termine inglese **Light Rail Transit (LRT)**.
- La **metrotranvia** non va confusa con la **metropolitana leggera**, che la norma UNI 8379:2000 definisce come ... *sistema con circolazione regolata da segnali e **completamente autonoma** da qualsiasi altro tipo di traffico.*

INNOVAZIONE: NUOVE TECNICHE DI ARMAMENTO

Riduzione dei tempi di cantiere, maggiore precisione di costruzione, minore impegno di manutenzione: sono i vantaggi offerti dalle tecniche sviluppatesi negli ultimi decenni, che hanno in pratica soppiantato il binario su ballast. In alcuni casi si realizza utilmente l'appoggio continuo delle rotaie.

Traverse bi-bloc incorporate in getto di cls. Il binario, realizzato con traverse bi-bloc, è appeso a cavalieri regolabili, appoggiati su una prima platea gettata in opera, che ne permettono di allinearli; dopo l'allineamento, le traverse vengono incorporate in un secondo getto.

Platee prefabbricate. Si utilizzano platee in cls realizzate fuori opera, già dotate di attacchi per le rotaie oppure delle rotaie inserite in apposite cave con interposizione di profili elastomerici. Le platee vengono collocate con precisione sulla piattaforma di posa, idoneamente preparata.

«Embedded Rail System» («rotaia incastrata»), con diverse varianti. Una soluzione si basa sull'allineamento delle rotaie, fasciate con idonei profili elastomerici, mediante cavalieri regolabili e il successivo getto di cls, che incastra le rotaie fasciate.

«Appitrack» (di Alstom). È un procedimento automatizzato. Un veicolo cingolato, alimentato discontinuamente da una betoniera, procede lasciandosi dietro una platea e un veicolo successivo inserisce con precisione nel cemento ancora fresco gli attacchi per le rotaie.



Binario tradizionale su ballast (Roma, via Aldrovandi: cantiere di rinnovo dell'armamento, 2015)



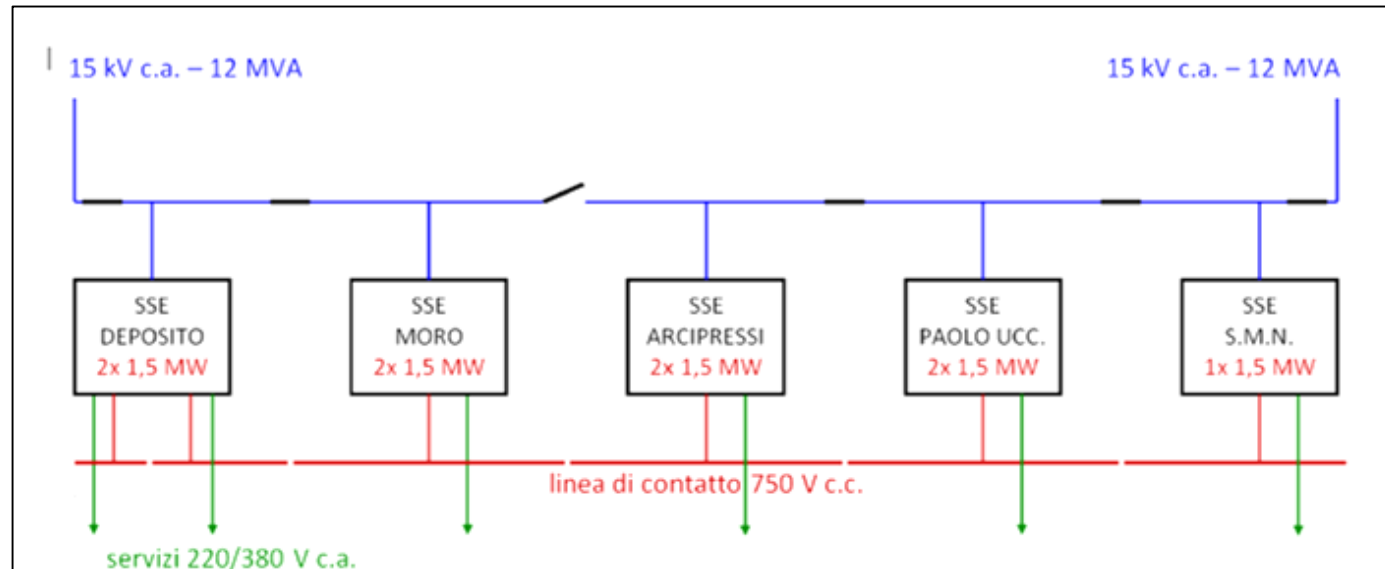
«Embedded Rail System» (Firenze, via di Novoli: realizzazione della linea T2, fase di allineamento delle rotaie (2015)

ALIMENTAZIONE (1)

Tensione di linea. Le tranvie urbane sono alimentate, fin dalle origini e salvo rari casi particolari, in bassa tensione continua. I valori tradizionali erano 550-600 V; i nuovi sistemi usano un valore poco più alto previsto dalla norma EN 50163, 750 V.

Potenza in gioco. La potenza assorbita da un convoglio è molto variabile, secondo il tipo di veicolo e la condizione momentanea di marcia. Valori nominali massimi si collocano oggi in una gamma da circa 200 kW a oltre i 700 kW, ma la potenza assorbita media è molto inferiore.

Conversione da media a bassa tensione. L'energia viene prelevata in media tensione (p. es. 20 kV c.a.) e convertita nella tensione di linea per mezzo di apposite sottostazioni elettriche (SSE), distribuite lungo la linea tranviaria (in genere a distanze indicativamente di 2 km) per ridurre le perdite di trasmissione. La tipica potenza nominale di una SSE è 1,5 - 2 MW. Per garantire la continuità di esercizio in caso di guasti, gli apparati della sottostazione sono ridondati e inoltre si assicura la possibilità di alimentare una tratta con SSE in avaria dalla SSE adiacente.



Schema semplificato del sistema di alimentazione di una linea tranviaria.
(Linea T1 di Firenze, prima tratta: 7,6 km + 0,6 km di diramazione per il deposito)

ALIMENTAZIONE (2)

ASPETTI IMPIANTISTICI

Cavi di alimentazione (*feeder*)

Il filo di contatto della linea aerea ha una sezione modesta (tipica 120 mm²).

Per ridurre le perdite per dissipazione sul filo, la linea aerea non viene alimentata solo presso la SSE, ma anche in punti più distanti, collegati alla SSE con cavi, detti *feeder*, di maggiore sezione (p. es. 500 mm²), generalmente interrati.

Corrente di ritorno

Anche le rotaie vengono collegate alla SSE, da punti distanti, mediante *feeder*. Ciò non basta a proteggersi dalle dannose «correnti vaganti»: le rotaie stesse vanno isolate con appositi profili di gomma.

Sottostazioni innovative

Sottostazioni dotate di appositi apparati elettronici e di moduli di accumulo permettono, ai fini del recupero dell'energia, di rendere ricettiva la linea di alimentazione anche quando non vi è assorbimento da parte di altri veicoli.

TECNOLOGIE DEI VEICOLI

Controllo dei motori

La regolazione della coppia (e, in definitiva, della velocità) era ottenuta in un passato ormai lontano mediante collegamenti in serie o parallelo dei motori (in c.c.) e l'inserimento in serie di resistenze. Lo sviluppo dell'elettronica di potenza ha portato ad adottare motori trifase asincroni (meno ingombranti e di più semplice manutenzione) alimentati da azionamenti a semiconduttore (inverter, oggi basati su dispositivi IGBT) che erogano corrente trifase a tensione e frequenza variabile.

Risparmio energetico

Gli azionamenti elettronici consentono di recuperare efficientemente l'energia di frenatura, che viene immessa in linea, se questa è al momento ricettiva, oppure essere accumulata a bordo e riutilizzata successivamente, per i servizi o per la trazione.

Va ricordato anche che i veicoli su rotaia presentano, a parità di carico, un consumo specifico di energia inferiore a quello dei veicoli su gomma.

INNOVAZIONE: MARCIA SENZA LINEA AEREA DI CONTATTO

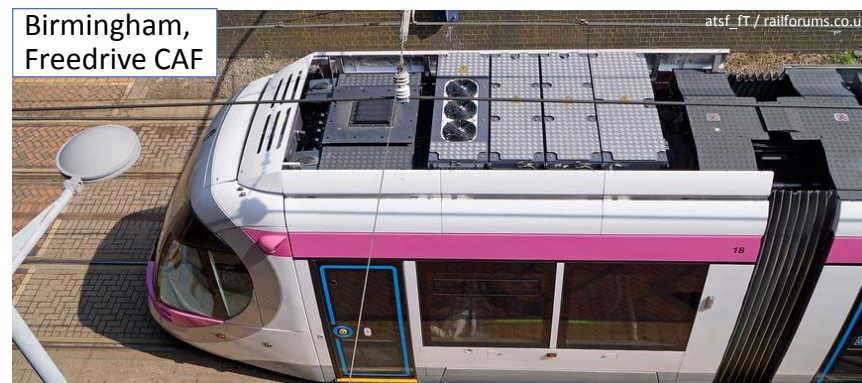
Sono disponibili diverse tecniche, ciascuna con pro e contro, per consentire la marcia in tratte prive di linea di contatto. La scelta va fatta in accordo con le specifiche condizioni (lunghezza delle tratte con e senza l.a.c., profilo altimetrico, numerosità della flotta, ecc.).

Le principali soluzioni:

- **Captazione a terra da una pista metallica centrale** (una sorta di terza rotaia) segmentata, collegata a una canaletta sotterranea; i segmenti della pista, isolati uno dall'altro, vanno in tensione solo quando il tram vi passa sopra. P. es.: APS di Alstom (attivazione del segmento con radiocomando), Tramwave di Ansaldo Sistemi (attivazione del segmento mediante attrazione di un nastro ferromagnetico conduttore).



- **Accumulo di energia a bordo, con ricarica durante la marcia sotto linea aerea**; richiede batterie di adeguata capacità.



- **Accumulo di energia a bordo, con ricarica rapida durante il normale tempo di sosta alle fermate**; mediante banchi di supercondensatori/batterie. P. es.: sistema Freedrive di CAF, SRS di Alstom



SISTEMI AUSILIARI

Priorità semaforica

Ai fini di una buona velocità commerciale e della regolarità sono fondamentali la sede riservata e la priorità semaforica a tutte le intersezioni con il traffico ordinario.

I moderni sistemi di priorità semaforica operano mediante la previsione centralizzata dell'arrivo del tram all'intersezione, che consente di coniugare un'elevata probabilità di via libera al tram con una modesta penalizzazione dei flussi in conflitto.

Controllo centralizzato

La regolarità dell'esercizio viene assicurata mediante sistemi di controllo centralizzato (S.A.E., Sistemi di ausilio all'esercizio) che integrano funzioni dinamiche di localizzazione e di monitoraggio delle condizioni operative dei tram, di monitoraggio e telecomando degli impianti, di assistenza decisionale all'operatore centrale.

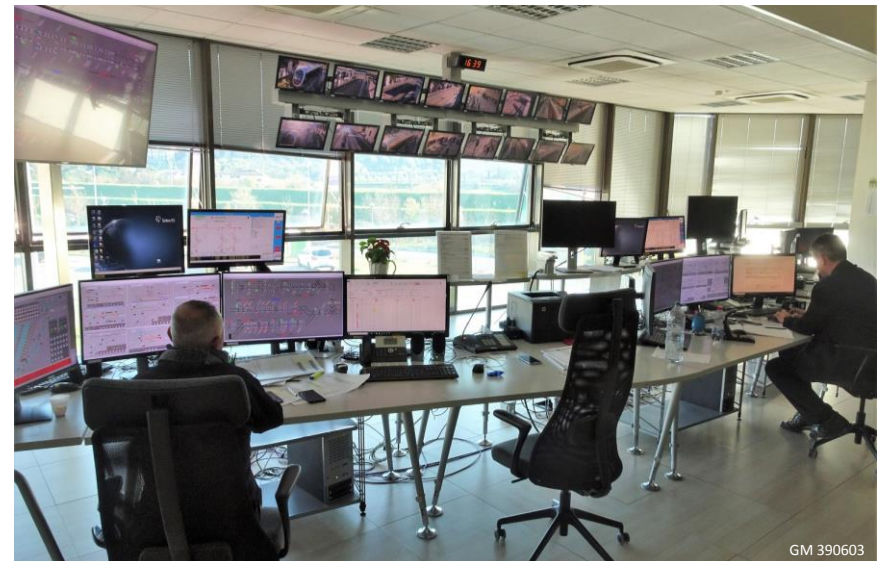
Telecomunicazioni

A supporto del controllo centralizzato, della priorità semaforica, dello scambio di messaggi codificati e vocali con i conducenti, della diffusione di informazioni dinamiche ai passeggeri, sono necessari sistemi di telecomunicazioni, in genere articolati in una rete fissa privata in fibra ottica e una rete radio.



Semaforo stradale francese con luci di aspetto specifico per il trasporto pubblico (previste anche dal Codice della Strada italiano), integrate con segnali relativi alla priorità: il punto esclamativo segnala la presa in carico della richiesta di via libera da parte del sistema, la losanga accesa è un preavviso della comparsa della via libera.

La tabella in basso indica il limite di velocità (espresso in km/h).



Tramvia di Firenze, centro di controllo nella sede operativa di Scandicci

SICUREZZA

Il tram è un mezzo di trasporto molto sicuro. Approfondite statistiche hanno mostrato che viaggiando in città in tram la probabilità di incorrere in un incidente è molto più bassa che viaggiando con altri mezzi, individuali o collettivi.

Anche per gli altri utenti della strada il tram non è un pericolo che incombe gravemente. Gli incidenti che coinvolgono tram hanno risonanza sui media proprio per la loro particolarità e scarsa frequenza. La prima linea di Firenze in quasi 10 anni di esercizio (circa 12 milioni di vettura*km) ha registrato un solo incidente mortale, dovuto a una vera fatalità.

La probabilità di incidenti è minimizzata dalla sede riservata esclusiva e dalle appropriate discipline del traffico nelle intersezioni.

Quando il tram è una novità, è efficace l'organizzazione di campagne informative, mirate a indurre comportamenti adeguati.

In alcune città europee sono state avviate sperimentazioni di sistemi automatici di assistenza alla guida dei tram, analoghi a quelli utilizzati nei veicoli su gomma. Pur senza arrivare alla marcia autonoma, potranno ridurre ulteriormente il rischio di incidenti.



Il tram convive con i pedoni in sicurezza, meglio di altri veicoli, perché le rotaie indicano con certezza dove passerà. Nelle zone pedonalizzate, un'adeguata limitazione della velocità permette di evitare incidenti in caso di distrazione di un pedone.

PREGIUDIZI INFONDATI

Si imputano ai tram vari aspetti negativi. Sono però tutte preoccupazioni infondate: inconsistenti, o legate a tecnologie superate o evitabili con attente progettazioni e gestioni.

- Vincoli geometrici per il tracciato
- Sottrazione di spazio alla circolazione di autoveicoli
- Difficoltà di circolazione causata da veicoli lunghi
- Impatto visuale della linea aerea di contatto
- Impatto visuale dei veicoli lunghi
- Impatto visuale delle rotaie
- Rischi per veicoli a due ruote
- Rischi per i pedoni
- Ridotte prestazioni di frenatura
- Generazione di vibrazioni e rumori
- Ammaloramenti della pavimentazione stradale
- Intralcio al carico/scarico delle merci
- Intralcio a lavori sulle facciate degli edifici
- Ostacolo ai mezzi di emergenza
- Impossibilità di deviare in caso di ostacoli
- Mancanza di flessibilità del percorso, nel tempo



Erogatore di fluido correttore di attrito. Sopprime lo stridio in curva. Si utilizzano anche soluzioni con erogatore del fluido a bordo del veicolo, anziché a terra



Pattino elettromagnetico. Il pattino, attratto dalla rotaia, aderisce alla sua superficie di rotolamento e consente efficaci frenature di urgenza

SISTEMI TRANVIARI, LO STATO DELL'ARTE

SOMMARIO

1. Dominio, declino, ritorno
2. A confronto con metro e bus
3. Caratteristiche dei moderni sistemi
4. Inserimento nella città
5. Qualche esempio di reti

DOVE COLLOCARE I BINARI

L'inserimento dei binari tranviari nel tessuto urbano pone problemi di compatibilità con altre funzioni e di sicurezza.

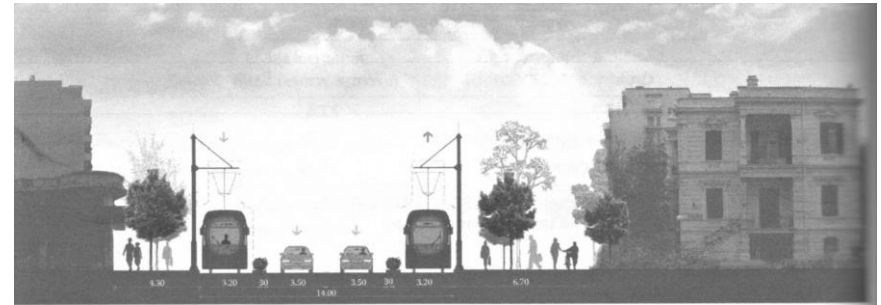
Nelle tre figure qui riprodotte* sono riportate tre possibili giaciture dei binari in una strada di una certa larghezza.

La soluzione A) offre il vantaggio di poter usare il marciapiede come banchina di fermata (se abbastanza largo) ma impedisce l'arresto di altri veicoli lungo il marciapiede, va in conflitto con i passi carrabili e genera un rischio per i pedoni. La soluzione B) mantiene libere le corsie lungo i marciapiedi, ma richiede banchine di fermata (ai lati o centrali) che riducono la sezione carrabile disponibile per il traffico ordinario.

La soluzione C) è un compromesso tra le prime due; vincola i marciapiedi su un solo lato (va scelto il più adatto: più largo, con meno attività, con meno passi carrabili ...) e riduce l'occupazione della sezione carrabile per le fermate.

La progettazione si complica, ovviamente, quando le strade e/o i marciapiedi sono stretti.

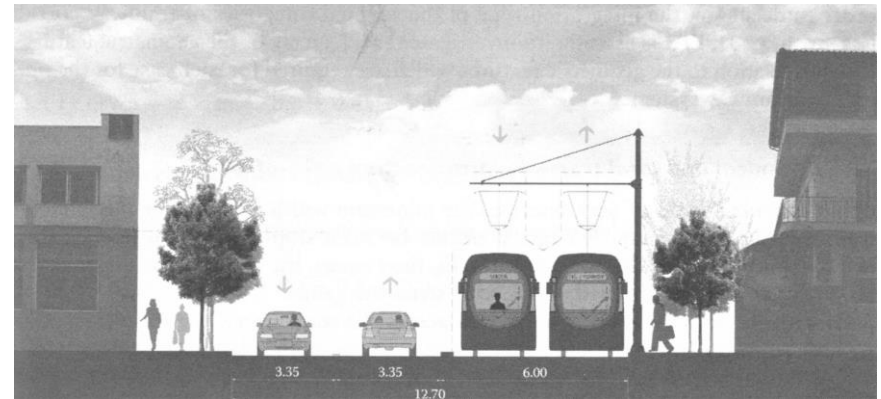
Va anche ricordato che l'incarrozzamento a raso nei tram a pavimento ribassato richiede banchine alte ca. 30 cm sul p.d.f., quota non sempre compatibile col marciapiede.



A) Binari separati, affiancati ai marciapiedi



B) Binari adiacenti, in centro strada



C) Binari adiacenti, affiancati a un marciapiede

* da C.N. Pyrgidis, *Railway Transportation Systems*; fonte originale: Autorità Trasporti pubblici di Salonicco

INSERIMENTO URBANO, CURA PAESAGGISTICA, RIQUALIFICAZIONE (1)

Oggi si pone grande attenzione all'ambiente in cui si inserisce la linea tranviaria.

- Si rispettano le zone di prestigio monumentale, evitando di installare la linea aerea e impianti o arredi incongrui.
- Si prevedono interventi di riqualificazione nell'intorno della linea (non solo restauro, ma anche nuovo uso degli spazi, in particolare a favore dei pedoni; nuovi arredi; ecc.)
- Nei viali periferici, dove è possibile, si inerbisce la sede tranviaria, ottenendo vantaggi estetici e di attenuazione del rumore.



Orleans, davanti alla Cattedrale (Richez associés)



Strasburgo, Place de l'Homme de Fer, Rotonda (G. Clapot)



Mulhouse, Place de la Republique (AABD Architectes)

INSERIMENTO URBANO, CURA PAESAGGISTICA, RIQUALIFICAZIONE (2)



Nizza, l'importante Avenue J. Médecin, sgomberata dalle auto



Nizza, Place Massena, riqualificata; tratta senza linea aerea



Nizza, Place Garibaldi, riqualificata; tratta senza linea aerea



Nizza, Mall des Universités, sede tranviaria a prato

INSERIMENTO URBANO, CURA PAESAGGISTICA, RIQUALIFICAZIONE (3)



Grenoble, Avenue Alsace Lorraine



Lione, Avenue F. Roosevelt (Bruno Demetier)



Milano, Piazzale delle Scienze (Gregotti Associati)



Scandicci (Firenze), viale Aldo Moro, sede tranviaria a prato

NEI CENTRI STORICI (1)

Zurigo, Bahnhofstrasse



936414

NEI CENTRI STORICI (2)



250966railforthevalley.com

NEI CENTRI STORICI (3)



Milano, via Broletto

NEI CENTRI STORICI (4)



Torino, via XX Settembre

SISTEMI TRANVIARI, LO STATO DELL'ARTE

SOMMARIO

1. Dominio, declino, ritorno
2. A confronto con metro e bus
3. Caratteristiche dei moderni sistemi
4. Inserimento nella città
5. Qualche esempio di reti

GM 382505

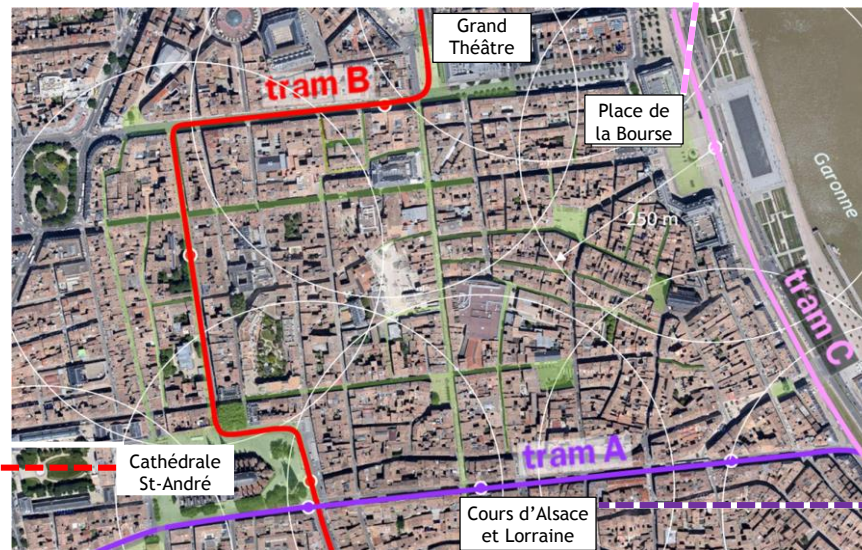


BORDEAUX

- Tre linee, la prima attivata nel 2003; nel 2016 la più recente estensione; una quarta linea in costruzione
- Rete basata su linee indipendenti, senza sovrapposizioni
- Lunghezza cumulata delle linee: 58 km
- Notevole estensione delle tratte senza linea aerea di alimentazione (circa 14 km, alimentazione a terra con sistema APS Alstom)
- Numero di veicoli: 100 (Citadis 302, lunghi 33 m e 402, lunghi 44 m)
- Passeggeri giorno feriale: ca. 400.000



Tutto il centro entro 4 minuti a piedi da una fermata dei tram



DUBLINO

- Numero di linee in esercizio: 2
 - Red Line:** 21 km (con 2 rami a ciascuna estremità)
 - Green Line:** 24 km (in buona parte su tracciato ex-ferroviario).
Ne fa parte la **Cross City Line**, aperta all'esercizio nel dicembre 2017: è un prolungamento di 6 km che attraversa il centro storico e il fiume Liffey, per poi avere corrispondenza con la **Red Line** e proseguire verso Nord-Est.
- Numero di veicoli: 73 (Citadis di vari tipi, lunghi da 40 a 55 m)
- Passeggeri nel giorno ferialle: circa 100.000




St. Stephen's Green, inaugurazione Cross City Line (2017)



Abbey Street Lower, Red Line

SARAGOZZA

- Una linea con andamento diametricale Nord-Sud, aperta nel 2013; altre due in programma
 - Alimentazione senza linea aerea: una tratta lunga circa 1,5 km, nel centro città, è percorsa utilizzando l'energia accumulata in banchi di supercondensatori che vengono ricaricati alle fermate
 - Lunghezza: 13 km
 - Numero dei veicoli: 21 (Urbos di CAF, lunghi 33 m)
 - Passeggeri nel giorno feriale: circa 90.000
- 



Paseo de la Gran Vía



Centro storico, Calle del Coso; tratta senza linea di contatto

LE HAVRE

- Due linee, con una tratta comune nel centro città, che include una nuova galleria, di 500 m, riservata ai tram, affiancata ad una preesistente galleria stradale
- Lunghezza degli impianti: 13 km
- Lunghezza di esercizio: 17 km
- Quasi completamente in sede riservata esclusiva
- Alimentazione interamente con linea aerea di contatto
- Numero di veicoli: 22 (Citadis 302 di Alstom, lunghi 32 m)
- Passeggeri nel giorno feriale: oltre 50.000



Le Havre, Cours de la République



Le Havre, Boulevard de Strasbourg

ZURIGO



15 linee di tram, in un sistema multimodale che comprende S-Bahn (servizio ferroviario metropolitano), tram, filobus e autobus



Bellevueplatz



Tunnel tranviario (costruito per una metropolitana che non è stata realizzata per effetto di un referendum)

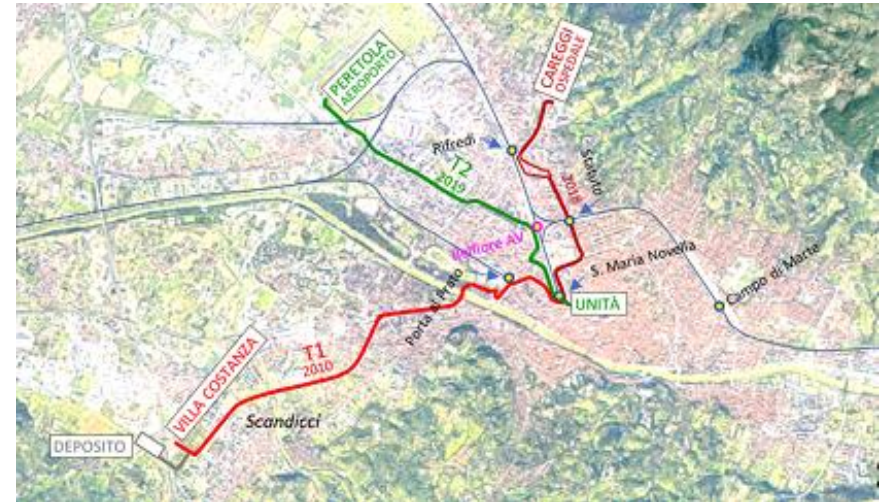
FIRENZE

IN ESERCIZIO

- **Linea T1** Scandicci Villa Costanza - Careggi Ospedale
11,5 km, 22 fermate (oltre ai capolinea)
- **Linea T2** Peretola Aeroporto - Piazza Unità
5,3 km, 11 fermate (oltre ai capolinea)
- Raccordo per il deposito (a Scandicci)
0,6 km
- Parcheggi scambiatori (per autovetture e autobus) al capolinea Villa Costanza (T1) e alla fermata Guidoni (T2)
- 46 veicoli
 - Sirio Firenze di Hitachi Rail Italy, già AnsaldoBreda
 - lunghezza: 32 m - capienza: 200 passeggeri (a 4 p/m²)
- Oltre 100.000 passeggeri/giorno sulla sola T1
- Elevati livelli di soddisfazione degli utenti

IN PROGETTAZIONE E PROSSIMA REALIZZAZIONE

- Linea 4: Porta al Prato - Le Piagge - Campi di Bisenzio
- Prolungamento linea 2 in centro: Stazione S.M.N. - Piazza Libertà - Piazza San Marco
- Estensioni Est: Piazza Libertà - Bagno a Ripoli e Piazza Libertà - Rovezzano
- Prolungamento linea 2 a Sesto Fiorentino: Peretola Aeroporto - Castello - Polo tecnologico - Sesto Fiorentino)



La rete oggi in funzione: linee T1 e T2



Linea T2, capolinea provvisorio di piazza Unità italiana

PER CONCLUDERE: QUANDO CONVIENE IL TRAM?

- Il tram conviene in un campo di domanda di trasporto abbastanza alto da raggiungere una ragionevole sostenibilità economica, ma non tanto alto da superare la sua capacità di trasporto.
- Tra i fattori positivi di vario genere che non portano vantaggi economici diretti e la cui non facile monetizzazione dipende da valutazioni soggettive si possono ricordare l'assenza di emissioni inquinanti (che è però comune a filobus e autobus elettrici), il migliore comfort di viaggio, la maggiore capacità di attrarre nuovi utenti al trasporto pubblico, ecc.. Questo può concorrere a spiegare la diversità di soglie di convenienza riportate in alcuni studi.
- Il tram muove corde emotive più di altri mezzi di trasporto. C'è chi lo ama al punto di volerlo dappertutto, chi lo odia al punto di rifiutarlo in qualunque caso, chi confonde un pur condivisibile obiettivo di museo dinamico con il modo oggi appropriato di soddisfare la domanda di mobilità. Le scelte devono comunque essere sempre basate su valutazioni rigorose, non avere origine da posizioni aprioristiche di favore o contrarietà.
- Di massima vi è dunque fondamento per il ricorso al tram nelle città medie, dove la domanda ed altri fattori non giustificano una metropolitana e dove si può realizzare una rete gerarchica, nella quale la rete tranviaria ha - assieme all'eventuale servizio ferroviario metropolitano - il ruolo primario, di trasporto rapido di massa, e linee di filobus o autobus, possibilmente elettrico, quello complementare di servizio più capillare. Anche nelle città più grandi, servite da metropolitane, vi sono direttrici secondarie con domanda di livello tranviario.



