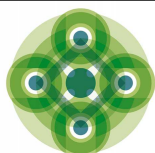




Comune di Bologna



Sostenibilità
è Bologna



PUMS
BOLOGNA
METROPOLITANA

RTI Progettisti:



ELABORATI DI GARA

FSC

Fondo per lo Sviluppo
e la Coesione

Intervento finanziato con risorse
FSC 2014-2020 – Piano operativo della Città
metropolitana di Bologna
Delibera CIPE n.75/2017



Analisi delle alternative progettuali

COMUNE DI BOLOGNA
SETTORE MOBILITA' SOSTENIBILE E INFRASTRUTTURE

IL DIRETTORE DEL SETTORE

ING. CLETO CARLINI

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

ING. GIANCARLO SGUBBI

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO

ING. MIRKA RIVOLA

SEGRETARIA TECNICA

ING. BARBARA BARALDI

GEOM. AGNESE FERÒ

RESPONSABILE DI COMMESSA

ING. PAOLO MARCHETTI

RESPONSABILE INTEGRAZIONE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

ING. SANTI CAMINITI

Gruppo di Progettazione:

Ing. Alessandro Piazza (Coordinatore Tecnico)
Ing. Santi Caminiti (Progetto sistemi tranviari)
Ing. Andrea Spinosa (Studi Trasportistici)
Arch. Sebastiano Fulci De Sarno (Prog. Architettonico e Inser. Urbanistico)
Ing. Sergio Di Nicola (Sovrastruttura Tranviaria)
Ing. Jeremie Weiss (Impianti Tecnologici)
Ing. Maurizio Falzea (Progettazione Funzionale Depositi)
Ing. Pietro Caminiti (Viabilità Interferente)
Ing. Stefano Tortella (Opere Strutturali)
Ing. Andrea Carlucci (Esperto Impianti Eletto-ferroviari)
Ing. Domenico D'Apollonio (Impianti di Trazione Elettrica)
Ing. Francesco Azzarone (Impianti Meccanici)
Arch. Sergio Moscheo (Prime Disposizioni per la Sicurezza)
Ing. Boris Rowenczyn (Piani Economici e Finanziari)
Prof. Matteo Mattioli (Valutazione impatto ambientale e impatto acustico)



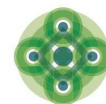
COMMESSA	FASE	DISCIPLINA	TIPO/NUMERO	REV.	SCALA	NOME FILE
B381	SF	GAR	RD002	A	—	B381-SF-GAR-RD002A.doc

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	31-12-2018	EMISSIONE	S. CAMINITI	S. CAMINITI	S. CAMINITI
1					
2					



Indice della relazione

1.	ANALISI DELLE ALTERNATIVE DI TRACCIATO	3
1.1	ALTERNATIVE DI TRACCIATO NEL CENTRO STORICO.....	3
1.1.1	Alternativa "A1"	3
1.1.2	Alternativa "A2".....	4
1.2	ALTERNATIVE DI TRACCIATO NELLA ZONA FIERA – SAN DONATO.....	4
1.2.1	Alternativa "B1"	4
1.2.2	Alternativa B2	5
1.2.3	Alternativa "B3".....	5
1.2.4	Alternativa "B4".....	5
1.2.5	Alternativa "B5"	6
1.3	ALTERNATIVE DI TRACCIATO NELLA ZONA PILASTRO	6
1.3.1	Alternativa "C1".....	6
1.3.2	Alternativa "C2".....	6



1.4	VALUTAZIONE DELLA DOMANDA	6
2.	ANALISI DELLE ALTERNATIVE TECNOLOGICHE	12
2.1	BUSVIA.....	12
2.1.1	<i>Fattori competitivi</i>	14
2.1.2	<i>Svantaggi</i>	14
2.1.3	<i>Direzione evolutiva</i>	15
2.2	FILOBUS E ALTRI SISTEMI ELETTRICI	15
2.2.1	<i>Fattori competitivi</i>	19
2.2.2	<i>Svantaggi</i>	19
2.2.3	<i>Direzione evolutiva</i>	19
2.3	TRAM.....	19
2.3.1	<i>Fattori competitivi</i>	22
2.3.2	<i>Svantaggi</i>	23
2.3.3	<i>Direzione evolutiva</i>	23
2.4	CONFRONTO TECNOLOGICO	27
3.	TABELLE DI DETTAGLIO DEL CONFRONTO TRA LE DIVERSE TECNOLOGIE.....	36

1. ANALISI DELLE ALTERNATIVE DI TRACCIATO

La linea di progetto è definita entro il corridoio Borgo Panigale – Centro – Stazione – San Donato – CAAB/Falcoltà di Agraria. Lo sviluppo totale è di circa 15 km, l'interscambio con il Servizio Ferroviario Metropolitano è svolto alla Stazione Bologna Centrale e alla Fermata Borgo Panigale. Il tracciato, a doppio binario, inizia a Borgo Panigale, nei pressi della connessione di Via Marco Emilio Lepido con la S.P. 568 e si sviluppa quindi lungo un percorso sostanzialmente in rettilineo su Via M.E. Lepido, Via Emilia Ponente, Via Aurelio Saffi ed un primo tratto di via San Felice.

Da via San Felice a Piazza XX Settembre si pongono due alternative di tracciato che investono il passaggio nella zona più centrale della città: transito su via Indipendenza (A1) oppure su via Marconi (A2). Superata viale Pietramellara il tracciato prosegue su via Matteotti, superando il fascio ferroviario nei pressi della stazione centrale, fino a raggiungere Piazza dell'Unità e svoltare lì a destra su Via della Liberazione. Procede poi su Viale Aldo Moro. Qui si pongono altre alternative di tracciato per raggiungere via San Donato (B1-B2-B3-B4-B5).

Tutte le alternative si ricongiungono oltre il sottopasso ferroviario della linea di cintura su via San Donato e il tracciato della linea lungo tale asse stradale, oltrepassando lo svincolo con la Tangenziale, in direzione nord. Le ultime alternative si pongono all'altezza di via Pirandello ove occorrerà optare tra un percorso che entra all'interno della zona del Pilastro e l'altro che lo rasenta a nord. Le alternative si congiungono in via Giuseppe Fanin fino al capolinea previsto nella zona della Rotonda Giuseppe A. Torri. Percorre quindi Via San Donato, fino alla Rotonda Luchino Visconti, per poi inserirsi nei Viali Tito Carnacini e Giuseppe Fanin.

1.1 ALTERNATIVE DI TRACCIATO NEL CENTRO STORICO

1.1.1 ALTERNATIVA "A1"

La ridotta sezione stradale di Via San Felice obbliga a proseguire disponendo i due binari su tracciati diversi, in andata ancora su Via San Felice e in ritorno su un tratto di Via delle Lame e su un tratto di Via Riva di Reno. Quindi i due binari si ricongiungono e proseguono su via Ugo Bassi, fino a portarsi, con una svolta a sinistra di 90° nei pressi di Piazza del Nettuno, su via Indipendenza, che viene percorsa interamente fino oltre Piazza XX Settembre.

Tale itinerario è preferibile, per ragioni funzionali e urbanistiche, poiché consente di servire il cuore della Città, assicurandone accessibilità universale, e quindi di dare anche luogo ad interventi di razionalizzazione della mobilità e di riqualificazione urbana, con un ampio ricorso alla pedonalizzazione (ritenuta certamente compatibile con il transito dei tram, ove si usino appropriate cautele). Le difficoltà prevedibili in Via Ugo Bassi e Via Indipendenza riguardano principalmente i sottoservizi e il ripristino della pavimentazione storica, che, per quanto riguarda via Ugo Bassi, è stata oggetto di recenti interventi nell'ambito del progetto PIMBO.

1.1.2 ALTERNATIVA "A2"

L'alternativa si sviluppa su Via Guglielmo Marconi, Via Giovanni Amendola e Viale Pietro Pietramellara. Il binario di andata svolta a sinistra su Via G. Marconi alla fine di Via San Felice, mentre quello di ritorno lascia Via G. Marconi svoltando a destra su Via Riva di Reno per percorrerla fino allo sbocco su Via San Felice. Tale variante riduce il servizio del Centro storico e non si presta ai summenzionati interventi di riqualificazione urbana. Il transito davanti al Fabbricato Viaggiatori della Stazione centrale non deve apparire elemento di particolare favore, sia perché sussistono incertezze sull'assetto futuro di quel tratto di Viale P. Pietramellara, sia perché si fanno altre ipotesi per l'accesso ottimo alla Stazione centrale, come viene accennato più avanti, trattando delle fermate. Anche il tracciato della alternativa "A2", pur su strade più ampie di quelle dell'alternativa "A1", non è privo di problematiche, quali quelle della compatibilità col rilevante traffico ordinario e con le strutture della linea filoviaria.

È opportuno notare che, nel quadro della futura rete tranviaria, con più linee che attraverseranno il centro, il tracciato sulle strade della alternativa "A2" è comunque previsto aggiungersi a quello sulle Vie Ugo Bassi e Indipendenza al fine sia di evitare tratte con frequenze di transiti eccessivamente alte, sia di disporre di una ridondanza di tracciato nella zona critica. Le ragioni sopra ricordate danno però priorità all'itinerario Ugo Bassi – Indipendenza.

1.2 ALTERNATIVE DI TRACCIATO NELLA ZONA FIERA – SAN DONATO

1.2.1 ALTERNATIVA "B1"

Il tracciato prosegue su viale Aldo Moro, al termine del quale svolta su Viale della Fiera / Viale Europa. Appena sottopassata la ferrovia, svolta a destra costeggiando la ferrovia fino a

raggiungere Via San Donato, sulla quale si immette con una svolta a sinistra. Questa alternativa di tracciato serve adeguatamente i complessi della Regione e della Fiera, ma molto marginalmente gli abitati che si estendono oltre Viale Aldo Moro e Viale della Fiera.

Il tracciato base ha inoltre un impatto ambientale negativo, perché erode una fascia del Parco San Donnino.

1.2.2 ALTERNATIVA B2

L'alternativa consiste nell'abbandono di Viale Europa prima del sottovia ferroviario, per andare a inserirsi in Via Edoardo Ferravilla e, al termine di questa strada, svoltare a sinistra su Via San Donato, riprendendo poco oltre il tracciato dell'alternativa "B1". L'alternativa "B2", con una trascurabile modifica di lunghezza, elimina quindi l'impatto sul Parco San Donnino e migliora il servizio di una parte dell'abitato.

1.2.3 ALTERNATIVA "B3"

L'alternativa "B3", finalizzata a un apprezzabile incremento dell'area di abitato servita, senza significativi riflessi negativi per l'accessibilità della Fiera, consiste nel proseguimento in retta da via A. Moro su via Ferruccio Garavaglia e Piazza Giovanni Spadolini, per svoltare a sinistra su Via San Donato circa 700 m prima del punto di inserimento previsto dal tracciato dell'alternativa "B1". Tale alternativa comporta la criticità dell'attraversamento tranviario dell'area di Piazza G. Spadolini, che è frequentato luogo pedonale di ritrovo e di attività di interesse sociale.

1.2.4 ALTERNATIVA "B4"

Il proposito di incrementare l'area di abitato servita, senza invadere Piazza G. Spadolini, potrebbe essere perseguito lasciando Viale A. Moro all'altezza di Via Serena per raggiungere l'ampio Viale della Repubblica e procedere su tale arteria fino a svoltare a sinistra su Via San Donato circa 1 km prima del punto di inserimento previsto dal tracciato dell'alternativa "B1". In contropartita tale alternativa presenta un modesto allungamento del tracciato, una certa riduzione del servizio della Fiera e delle sedi della Regione, l'inserimento sulla relativamente modesta sezione di Via Serena nonché il maggior percorso sulla Via San Donato, soggetta ad elevati flussi di traffico.

1.2.5 ALTERNATIVA "B5"

In questa soluzione viale Aldo Moro viene lasciato più avanti, poco prima della rotatoria con viale della Fiera e via Garavaglia, per raggiungere viale della Repubblica, attraversando sul margine l'area sportiva del Liceo Copernico, e da lì proseguire come l'alternativa "B4". Tale alternativa, come la precedente, promette un interessante incremento della popolazione servita dalla tranvia, con un modesto allungamento del tracciato; ma anch'essa ha per contropartita una certa riduzione del servizio della Fiera e delle sedi della Regione (minore del caso dell'alternativa "B4"), la dubbia possibilità di inserimento di un tracciato tranviario tra l'area del Liceo Copernico e il Parco Don Bosco, nonché il maggior percorso sulla Via San Donato, soggetta ad elevati flussi di traffico.

1.3 ALTERNATIVE DI TRACCIATO NELLA ZONA PILASTRO

1.3.1 ALTERNATIVA "C1"

Nella zona del Pilastro il tracciato percorre Via San Donato fino alla Rotonda Luchino Visconti, per poi inserirsi nei Viali Tito Carnacini e Giuseppe Fanin, sviluppandosi su strade con possibilità di inserimento abbastanza facili, ma marginali all'abitato.

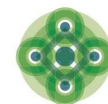
1.3.2 ALTERNATIVA "C2"

L'alternativa "C2" lascia Via San Donato all'altezza di Via Luigi Pirandello, per percorrere un tratto di tale strada e quindi seguire il percorso più appropriato nelle strade del quartiere (Via Casini, via Frati, via Sighinolfi), raggiungere Via Larga e, percorrendo quest'ultima e via Arriguzzi, riconnettersi a Viale G. Fanin e raggiungere il capolinea nord.

1.4 VALUTAZIONE DELLA DOMANDA

Complessivamente dal punto di vista del numero di passeggeri trasportati lo Scenario 1 e lo Scenario 2 in sede riservata sostanzialmente si equivalgono (circa 79 mila passeggeri medi nel giorno feriale per lo Scenario 1 e 76 mila per lo Scenario 2), mentre l'alternativa in sede promiscua risulta meno attrattiva su tutto il tracciato (-24% in termini di passeggeri trasportati).

Per entrambi gli Scenari 1 e 2 nella tratta a Ponente lungo la via Emilia, il Tram carica circa 150 passeggeri nell'ora di punta feriale tra il capolinea e la prima fermata di Via Emilia. Sul Tram



continuano progressivamente a salire passeggeri in direzione centro, superando 1.500 passeggeri a bordo dopo il Ponte sul fiume Reno.

Per quanto riguarda la sezione Centrale, l'attraversamento su Via indipendenza (Opzione A1) cattura circa 3.300 passeggeri/giorno in più rispetto all'attraversamento su via Marconi (Opzione A2).

Per quel che riguarda le Opzioni di attraversamento San Donato-Fiera, le diverse alternative di tracciato non mostrano sostanziali differenze dal punto di vista della domanda e complessivamente la differenza si attesta in 1.900 passeggeri giornalieri in meno per l'opzione B2 (Ferravilla) e 140 passeggeri/giorno in più per l'opzione B3 (Piazza Spadolini).

La tabella seguente riassume gli impatti di ciascuna alternativa indicando la differenza nella domanda complessivamente catturata rispetto allo Scenario 1 (Opzione A1 + B1 + C1).

	A	B	C
1	64.871		
2	61.545	63.002	64.261
3	-	65.014	-
4	-	66.973	-
5	-	67.548	-

	A	B	C
1	-		
2	-5,1%	-2,9%	-0,9%
3	-	0,2%	-
4	-	3,2%	-
5	-	4,1%	-

Tabella 1. Passeggeri giorno medio annuo - differenza delle diverse opzioni rispetto allo Scenario 1: la colonna indica le alternative, la riga gli scenari possibili per ciascuna alternativa

La tabella seguente esprime il miglioramento/peggioramento relativo rispetto alla facilità di inserimento urbano della nuova sede tranviaria in confronto allo Scenario 1 (A/B/C – 1).

	A	B	C
1	-		
2	■ ■	■ ■	■ ■
3	-	■	-
4	-	■ ■	-
5	-	■ ■	-

- modesto miglioramento
- ■ discreto miglioramento
- modesto peggioramento
- ■ discreto peggioramento

Tabella 2. Miglioramento/peggioramento dell'inserimento urbano rispetto allo Scenario 1 (A/B/C – 1)

La tabella seguente esprime il miglioramento/peggioramento relativo rispetto alle possibili interferenze della nuova sede tranviaria con la circolazione viaria e ciclopedonale in confronto allo Scenario 1 (A/B/C – 1).

	A	B	C
1	-		
2	■	■■	■
3	-	■	-
4	-	■■	-
5	-	■	-

- modesto miglioramento
- discreto miglioramento
- modesto peggioramento
- discreto peggioramento

Tabella 3. Miglioramento/peggioramento delle criticità con la circolazione viaria e pedonale rispetto allo Scenario 1 (A/B/C – 1)

La tabella seguente esprime con un punteggio ponderato la sintesi delle valutazioni precedenti rispetto allo Scenario 1 (A/B/C – 1).

	A	B	C
1	100		
2	80	89	97
3	-	91	-
4	-	83	-
5	-	87	-

Tabella 4. Sintesi prestazione delle alternative allo Scenario 1 (A/B/C – 1)

Lo Scenario 1 (sequenza A/B/C – 1) appare come quello che riesce maggiormente a coniugare una efficacia trasportistica – in relazione alla domanda servita – con, relativamente ai punti dove sono possibili delle varianti di tracciato, un migliore inserimento urbanistico ovvero minori interferenze con il traffico viario e gli spazi della mobilità dolce.

2. ANALISI DELLE ALTERNATIVE TECNOLOGICHE

Le alternative tecnologiche possibili per il corridoio di studio sono il servizio con mezzi su gomma (a trazione ordinaria oppure elettrica) oppure su ferro.

2.1 BUSVIA

Il **trasporto su gomma** è, nel panorama dei trasporti collettivi, quello con minore capacità ma maggiore economia di implementazione, non necessitando di infrastrutture proprie. È caratterizzato da estrema flessibilità ma anche dall'incapacità di garantire un servizio regolare, proprio perché vincolato dal traffico privato, con cui condivide la sede. Se il bus (o il filobus) si muovono su corsie proprie, separate (e protette) si realizza una busvia: in questo caso i maggiori oneri di costruzione sono ripagati dall'aver un servizio più regolare ed efficiente. Quando si adoperano mezzi articolati e le intersezioni sono ridotte al minimo e attrezzate con asservimento semaforico si parla di busvie ad alta capacità (BAC o FAC, nel caso di filovia). BAC/FAC con capacità da 3.000 pphd sono presenti in diverse metropoli nordamericane e sudamericane così come in diverse città europee, principalmente francesi (*bus à haut niveau de service*, BHNS) e inglesi (BRT, *busway rapid transit*).

La normativa francese fornisce un quadro chiaro ed esaustivo di cosa sia una *Busvia ad Alto Livello di Servizio*, fornendo soluzioni molto più vicine al caso italiano di quanto non possano esserlo gli omologhi sviluppi progettuali anglosassoni del *busway rapid transitway*. Il concept del BRT si è infatti evoluto principalmente in Nordamerica prima, e Sudamerica dopo, luoghi in cui l'impianto urbano, seguendo delle logiche completamente differenti dalla città "sedimentata" nel tempo presenta vincoli ed esigenze diverse. In questa accezione il "Bus" è inteso come una modalità di trasporto stradale da intendersi nella sua accezione più larga:

- un **veicolo a guida manuale** non costretto a seguire, in maniera permanente, un tracciato prestabilito da rotaie o dispositivi di vincolo della marcia;
- un **bus standard** (12 m) o **articolato** (18 m);
- una trazione termica, elettrica (filobus) oppure ibrida.



La via di corsa per una busvia ad alto livello di servizio deve garantire 3 requisiti fondamentali: **qualità della marcia**; **contenimento dei costi di gestione** (esercizio e manutenzione); **controllo delle emissioni acustiche e vibrazionali**. Per frequenze di passaggio inferiori ai 10' per senso di marcia è opportuna una attenta valutazione comparativa tra pavimentazione elastica in conglomerato bituminoso e pavimentazione rigida in conglomerato cementizio. Numerose esperienze europee, ma anche nazionali, hanno mostrato che con frequenze inferiori ai 5' per senso di marcia, la scelta di una pavimentazione rigida si mostra quella più idonea a ottimizzare qualità e comfort di marcia con un contenimento dei costi di gestione e al contempo delle emissioni fono-vibrazionali.

Le pavimentazioni rigide sono costituite da lastre di calcestruzzo di cemento (dalle), dotate di una forte resistenza al taglio e di discreta resistenza flessionale. Questo tipo di pavimentazione svolge contemporaneamente i compiti della fondazione e degli strati superficiali. Al disotto della *dalla* si dispone disporre una fondazione in materiale lapideo non legato o di misto cementato, mediante la fondazione si può garantire alla lastra un buon funzionamento nei confronti dell'acqua che può raggiungere agevolmente la fondazione attraverso i giunti. La disposizione dei giunti comporta però l'inconveniente di permettere la filtrazione dell'acqua al di sotto della lastra; nel caso in cui la ruota del veicolo percorra la zona di giunzione, induce una deformazione della lastra che comporta la risalita dell'acqua, fenomeno del *pumping*. Il *pumping* con il tempo induce alla formazione di zone vuote al disotto della lastra che possono essere molto dannose. La possibilità di ripristinare il collegamento a taglio della lastra, praticamente elimina il problema del *pumping*.

Tutte le giunzioni vanno **suturate con del mastice di bitume** o con materiali applicabili a freddo quali neoprene o polimeri liquidi, quest'operazione è indispensabile per evitare il prematuro consumo dei pneumatici. Poiché la realizzazione di giunti è piuttosto onerosa e complicata, si può in alcuni casi procedere alla stesura di reti di acciaio (0,25% della sezione lorda totale) la cui funzione è quella di contrastare l'apertura delle lesioni dovute al ritiro e alle variazioni termiche; questa soluzione permette il diradamento dei giunti da 10 m a 25 m. Altrimenti per poter eliminare completamente l'armatura è necessario ricorrere alla precompressione, di cui però esistono sono delle tratte di pavimentazione aeroportuale del tutto sperimentali.

2.1.1 FATTORI COMPETITIVI

Gli autobus possono circolare liberamente su tutta la sede stradale, nei limiti degli ingombri del veicolo, risultando molto flessibili rispetto a deviazioni di percorso ed eventuali ostruzioni; il raggio di curvatura minimo è inoltre molto ridotto.

Dal punto di vista del disegno della linea, l'adozione di questa tipologia di sistemi garantisce totale libertà nella scelta del tracciato, bassi costi di un eventuale cambiamento di percorso, non necessita di strutture centrali di controllo e non crea problemi nel rapporto col tessuto abitativo e con i servizi tecnologici dislocati al di sotto della sede viaria. Il sistema si adatta sia a servizi di carattere urbano che interurbano: nel primo caso il suo vantaggio risiede nella buona flessibilità rispetto alle turbative del traffico, nel secondo nella possibilità di utilizzare sia le strade a scorrimento veloce, per collegare velocemente due centri distanti, sia le vie del centro abitato, andando a raccogliere una maggiore quota di domanda. Il basso costo di impianto del servizio e la sua flessibilità ne fanno una soluzione molto valida per scenari a domanda debole.

2.1.2 SVANTAGGI

La stessa condivisione della sede stradale con il traffico veicolare privato impedisce di ottenere, nella gran parte dei casi, elevati valori di velocità commerciale e puntualità: questo, unito al comfort non molto elevato della tipologia di veicolo, rende il servizio di autolinea generalmente poco attrattivo.

Il rapporto tra peso del veicolo e capacità di trasporto non è molto favorevole a causa delle dimensioni limitate consentite dal codice della strada, dei limiti di carico per asse della sede stradale e della reale difficoltà di natura tecnica nel realizzare veicoli molto lunghi: mantenere una buona manovrabilità senza ricorrere alla guida vincolata è molto difficile, come dimostra l'esperienza dei megabus francesi. La bassa capacità di trasporto del singolo veicolo, ancora minore nel caso di veicoli a pianale ribassato, aumenta il rapporto tra personale di guida, ovvero la maggiore voce di costo, e passeggeri. Si configura in questo modo una capacità limite, individuabile tra i 1.000 ed i 1.500 passeggeri/ora, oltre la quale i costi del servizio non sono più competitivi.

2.1.3 DIREZIONE EVOLUTIVA

La ricerca di innovazione tecnologica e tipologica nel campo delle autolinee vede la crescente adozione di sedi riservate per l'incremento della velocità commerciale, il miglioramento del comfort di marcia offerto dai veicoli, l'aumento dell'accessibilità grazie al pianale ribassato ed un telesegnalamento efficace che possa fornire informazioni ai passeggeri sul veicolo ed in attesa rispetto alle variabili del servizio.

2.2 FILOBUS E ALTRI SISTEMI ELETTRICI

Il filobus nasce negli anni Trenta del ventesimo secolo, la sua adozione è legata al progressivo smantellamento di vecchie linee tranviarie. Al tempo il filobus univa infatti le caratteristiche di comfort, flessibilità e semplicità delle autolinee con l'alimentazione elettrica a captazione aerea, che garantiva silenziosità e minori consumi. I veicoli sono mossi da motori elettrici alimentati in corrente continua da una linea aerea dotata sia di cavo di potenza che di ritorno, il cui contatto col veicolo è assicurato da due aste (trolley) dotate di una certa libertà di movimento.

Le filovie corrono sulla normale sede stradale e mantengono una certa libertà di movimento in quanto non vincolate a terra; esse dispongono solitamente di una certa autonomia grazie a batterie o generatori diesel ausiliari che permettono di superare ostacoli anche al di fuori dell'area coperta dal bifilare. L'alimentazione elettrica e la grande silenziosità caratterizzano le filovie come un servizio a basso impatto ambientale, generando una maggiore qualità percepita presso il pubblico rispetto alle autolinee.

Le filovie vivono oggi un periodo di discreto sviluppo, limitato però da vantaggi relativi al consumo sempre meno sensibili rispetto ai normali autobus e da una manutenzione particolarmente onerosa; l'armatura aerea, dovendo infatti ospitare due catenarie, è più complessa rispetto a quella di una linea tranviaria e la configurazione dell'impianto presenta un rischio maggiore rispetto al tram. La presenza delle aste trolley come sistema di captazione rende lo sgancio dalle catenarie un problema frequente, limitato però dalla recente introduzione di sistemi di aggancio automatici; una certa complessità tecnologica e soprattutto il basso regime di produzione rendono i filobus dei mezzi molto più costosi degli autobus.

La capacità di una linea filoviaria è equivalente a quella delle autolinee, così come sono simili le innovazioni relative al confort di recente diffusione; grazie alla presenza di motori elettrici è stato inoltre possibile introdurre ruote motore, non collegate quindi ad un asse, che permettono di raggiungere percentuali di superficie interna utile molto elevate.

Come per le busvie anche per le filovie si parla di via guidata e guida assistita: la differenza è nell'adozione di una trazione elettrica in luogo della trazione termica (diesel, a gas naturale oppure ibrida).

I problemi connessi con il rispetto dell'ambiente e della qualità della vita, ed in particolare la lotta alle emissioni atmosferiche ed acustiche, hanno dato vita negli ultimi anni ad una serie di provvedimenti a sostegno dei veicoli ad impatto ambientale basso (LEV - Low Emission Vehicles) o nullo (ZEV - Zero Emission Vehicles). Una rigorosa suddivisione delle differenti tipologie di trazione, come quella presentata nella tabella seguente, mette in luce un dato particolarmente significativo: considerato come la ricerca nel campo della trazione ad idrogeno ed a celle a combustibile ("fuel cells") sia tutt'ora ben lontana da risultati apprezzabili sul piano industriale, le sole tipologie di veicoli attualmente pienamente "eco-compatibili" sono proprio quelle della trazione elettrica.

Tabella 5, alla pagina seguente. Una rigorosa suddivisione delle differenti tipologie di trazione mette in luce un dato particolarmente significativo: considerato come la ricerca nel campo della trazione ad idrogeno ed a celle a combustibile ("fuel cells") sia tutt'ora ben lontana da risultati apprezzabili sul piano industriale, le sole tipologie di veicoli attualmente pienamente "eco-compatibili" sono proprio quelle della trazione elettrica. In altre parole, i sistemi a combustibile alternativo (GNC, GPL) e quelli "ibridi" nelle diverse accezioni, pur presentando interessanti miglioramenti, non si discostano in maniera significativa dalle motorizzazioni tradizionali qualora queste siano basate sullo standard "EuroX", risultando dunque meno adatti rispetto ai sistemi ad alimentazione elettrica



TIPO DI PROPULSIONE	LIVELLO
A COMBUSTIBILE TRADIZIONALE alimentata con gasolio o benzina con filtri e/o catalizzatori (eventuali trasmissioni idro-meccaniche avanzate con dispositivi di recupero energia)	1
A COMBUSTIONI ALTERNATIVE con alimentazione "bifuel", dotate di doppio sistema di alimentazione a benzina, a benzina e gnc, oppure a benzina e gpl	2
A COMBUSTIONI ALTERNATIVE alimentate con gas naturale compresso (GNC=metano) oppure gas da petrolio liquefatto (GPL), per motorizzazioni derivate e ottimizzate al combustibile usato, eventuali trasmissioni idro-meccaniche avanzate con dispositivi di recupero energia)	3
A IDROGENO in bombole	3,5
IBRIDA dotata di almeno una motorizzazione elettrica per la trazione e di un motogeneratore termico finalizzato alla sola generazione di energia elettrica	4
IBRIDA BIMODALE dotata di almeno una motorizzazione elettrica per la trazione e di una motorizzazione termica finalizzato direttamente alla trazione, con possibilità di funzionamento autonomo di una sola delle motorizzazioni esistenti	4
IBRIDA MULTIMODALE dotata di almeno una motorizzazione elettrica per la trazione e di una motorizzazione di tipo termico finalizzata sia alla trazione che alla produzione di energia elettrica con possibilità sia di funzionamento contemporaneo delle due motorizzazioni esistenti che il funzionamento autonomo di una sola di queste	4
CELLE A COMBUSTIBILE (FUEL CELL)	4,5
ELETTRICA DA BATTERIA con energia esclusivamente elettrica e completamente immagazzinata a bordo	5
ELETTRICA DA RETE DI ALIMENTAZIONE con energia esclusivamente elettrica prelevata da linea di alimentazione fissa	6

Il filobus è una vettura basata, come il tram, sulla trazione elettrica. Il motore elettrico per la trazione elettrica deve possedere alcuni requisiti che lo differenziano da altre applicazioni:

- una costruzione robusta e semplice che richieda una manutenzione ridotta da effettuarsi a intervalli regolari e piuttosto ampi;
- rendimenti elevati per tutte le condizioni di lavoro; caratteristica meccanica quanto più vicina a quella di potenza costante, con alte coppie di avviamento;
- facilità di regolazione della velocità in un vasto campo, dalla velocità di manovra fino a quella massima di corsa;
- possibilità di effettuare con facilità il recupero dell'energia o quantomeno la frenatura elettrica.

La marcia del veicolo è comandata dal posto di guida, dove, il conducente – o il sistema elettronico di guida – manovra il volante che agisce sulle ruote dell'assale anteriore: lo sterzo classico è di tipo automobilistico, con raggio minimo di sterzata di tipo 10-15 m. Anche gli assali classici sono di tipo automobilistico, con ruote e pneumatici normali per autobus. Nei veicoli di ultima generazione le ruote sono tutte sterzanti al veicolo, permettendo, grazie all'utilizzo di sistemi elettronici di guida, di accostarsi alle fermate traslando, e percorrere curve di raggio inferiore ai 10 m.

Il motore di trazione è quasi sempre unico, della potenza di 150-200 kW, alimentato dalla piena tensione di linea ed eccitato in serie. Viene montato, longitudinalmente sul telaio con appoggio elastico, e la trasmissione del moto avviene con albero a cardano.

Nel caso di vetture con più assi motori, l'albero del moto viene collegato, sempre con albero a cardano, a un distributore a ingranaggi che a sua volta trasferisce la coppia meccanica agli assali a mezzo di alberi di trasmissione e a mezzo di ingranaggi conici.

La regolazione della velocità di marcia è ottenuta con un controller, azionato dal manovratore con un apposito pedale, che provvede all'accelerazione automatica della vettura e, in caso di rilascio, alla sua decelerazione: si può però escludere l'avviamento ed effettuarlo manualmente con l'inserzione di appositi reostati. Sempre più spesso viene montato anche un gruppo motore-dinamo per la carica di una batteria di accumulatori a bordo.

2.2.1 FATTORI COMPETITIVI

Le filovie corrono sulla normale sede stradale e mantengono una certa libertà di movimento in quanto non vincolate a terra; esse dispongono solitamente di una certa autonomia grazie a batterie o generatori diesel ausiliari che permettono di superare ostacoli anche al di fuori dell'area coperta dal bifilare. L'alimentazione elettrica e la grande silenziosità caratterizzano le filovie come un servizio a basso impatto ambientale, generando una maggiore qualità percepita presso il pubblico rispetto alle autolinee.

2.2.2 SVANTAGGI

Le filovie vivono oggi un periodo di discreto sviluppo, limitato però da vantaggi relativi al consumo sempre meno sensibili rispetto ai normali autobus e da una manutenzione particolarmente onerosa; l'armatura aerea, dovendo infatti ospitare due catenarie, è più complessa rispetto a quella di una linea tranviaria e la configurazione dell'impianto presenta un rischio maggiore rispetto al tram. La presenza delle aste trolley come sistema di captazione rende lo sgancio dalle catenarie un problema frequente, limitato però dalla recente introduzione di sistemi di aggancio automatici; una certa complessità tecnologica e soprattutto il basso regime di produzione rendono i filobus dei mezzi molto più costosi degli autobus.

2.2.3 DIREZIONE EVOLUTIVA

La capacità di una linea filoviaria è equivalente a quella delle autolinee, così come sono simili le innovazioni relative al confort di recente diffusione; grazie alla presenza di motori elettrici è stato inoltre possibile introdurre ruote motore, non collegate quindi ad un asse, che permettono di raggiungere percentuali di superficie interna utile molto elevate.

2.3 TRAM

Le prime linee tranviarie nascono quasi contemporaneamente negli Stati Uniti e nell'Europa centrale come servizi di trasporto collettivo su carrozze di tipo ferroviario aperte trainate da cavalli; derivato dai sistemi di movimentazione delle miniere, il sistema era conveniente grazie alla presenza della rotaia, in quanto il basso attrito volvente rendeva il moto meno gravoso e la stabilità della sede assicurava confort e stabilità. Una volta sostituita la trazione animale con quella a vapore ed infine con quella elettrica, le tranvie assumono la forma tradizionalmente



Comune di Bologna

SERVIZIO DI PROGETTAZIONE DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DELLA
PRIMA LINEA TRANVIARIA DI BOLOGNA (LINEA ROSSA)

CIG 7499621308 - CUP F32E18000020001



Sostenibilità
è Bologna

conosciuta: rotaie a gola a livello del piano stradale, sede viaria promiscua, marcia a vista soggetta al codice della strada ed armamento aereo per l'alimentazione.

Giunte ad una notevole estensione attorno agli anni Trenta, sia come linee urbane che extraurbane, le tranvie sono state vittima di scelte politiche a favore della gomma e di un mancato aggiornamento tecnico che ne hanno segnato la rimozione in rilevante quantità, in Europa come in America.

In Europa gran parte delle reti vengono smantellate. Poche le eccezioni, Milano, Torino, Roma e Napoli in Italia; Lille, Marsiglia e St. Etienne in Francia; Blackpool in Inghilterra, la sola Lisbona nella penisola iberica. Fanno eccezione i Paesi dell'area germanica dove le reti vengono preservate e incentivate a partire da metà degli anni Ottanta.

La **rinascita tranviaria** affonda le radici nella crisi petrolifera del 1973, che innesca una serie di riflessioni sul modello di mobilità completamente affidato ai combustibili fossili. Inizialmente tutte le grandi città puntano sulla metropolitana "pesante".

In Francia è il ministro dei Trasporti Marcel Cavaillé a rilanciare il tram, con un concorso pubblicato bandito nel 1975: il *Concours Cavaillé* ha lo scopo di definire un modello nazionale per la reintroduzione del tram. L'industria non si mobilita subito, ma il concorso prepara il campo progettuale a quella rinascita che, a partire dal 1985 porterà alla realizzazione di 22 nuove reti tranviarie dalle 3 superstiti agli smantellamenti degli anni Sessanta. Strasburgo, Nantes, Grenoble e Parigi mostreranno l'efficacia del tram come elemento di ristrutturazione e rilancio delle aree urbane: sono gli anni Novanta e i progetti per nuove reti tranviarie si susseguono sia in Europa che in Nordamerica.

La realizzazione delle linee di tram moderno, avvenute nelle città europee, dimostra come si possano ottenere con il mezzo tranviario numerosi e significativi risultati.

Il grande vantaggio di una linea tranviaria risiede nel possedere i **vantaggi tecnici di una ferrovia** uniti alla capacità di percorrere le strade cittadine. La marcia su rotaia garantisce **stabilità, confort e ridotti consumi energetici** rispetto a veicoli su gomma equivalenti. La guida vincolata permette inoltre di far circolare in sicurezza vetture articolate e accoppiate, ottenendo maggiore capacità per singolo vettore e riducendo il costo umano del servizio. **Le linee tranviarie risultano inoltre**

molto affidabili rispetto alle diverse condizioni climatiche e garantiscono una migliore qualità di servizio percepita presso il pubblico.

L'alimentazione avviene attraverso un pantografo, quindi con una sola linea aerea e senza possibilità di sgancio, mentre il ritorno avviene direttamente sui binari, che fungono anche la messa a terra. Le rotaie hanno inoltre il compito di scaricare uniformemente il peso su tutta la sede viaria, permettendo un carico per asse fino a 11 t. Sempre grazie alle rotaie è tecnicamente possibile il **segnalamento in radiofrequenza** per servizi ausiliari alla circolazione e per posizionamento. **Il disegno geometrico dei binari nel centro cittadino ha in aggiunta un fortissimo contenuto semantico.** La circolazione di veicoli tranviari di nuova generazione su linee con armamento di buona qualità garantisce infine una estrema silenziosità, fino a raggiungere valori di 10-12 decibel inferiori rispetto al rumore generato da mezzi su gomma; i moderni veicoli tranviari sono inoltre capaci di accelerazioni elevate, fino a $1,3 \text{ m/s}^2$, e frenatura molto efficace grazie alla presenza di freni idraulici e pattini elettromagnetici.

I veicoli tranviari godono, infine, di un **ciclo di vita estremamente lungo**: affidabilità meccanica, manutenibilità e soprattutto bassa obsolescenza presso il pubblico permettono di ipotizzare una vita utile di almeno 40 anni, contro un valore di 10 - 12 anni per gli autobus, rendendo i maggiori costi facilmente ammortizzabili. In Europa è frequente trovare ancora in servizio vetture tranviarie di 60 o 70 anni, non solo per servizi turistici, anche se una simile longevità di servizio non è plausibilmente ipotizzabile per le vetture di nuova fabbricazione.

Tra gli svantaggi si segnala che le linee tranviarie, in quanto linee ferroviarie, sono più onerose nella gestione causa la presenza di rilevanti infrastrutture, la necessità di depositi dedicati, di manutenzione e di forza lavoro specializzata; l'impianto di nuove tranvie comporta opere di posatura rilevanti, costose sia in termini di materiali e lavoro che per quanto riguarda i disagi legati ai tempi abbastanza lunghi dei lavori.

Una linea tranviaria, se dotata di materiale rotabile e armamento in cattivo stato, genera inoltre forti vibrazioni nelle costruzioni circostanti e dà luogo al tipico stridio generato dal bordino in curva. Particolarmente costosi risultano essere gli scambi, che rappresentano anche la prima tra le cause di inquinamento acustico, mentre la presenza della linea aerea incontra resistenze a

causa di aprioristici giudizi negativi sul suo impatto visivo: **da questo punto di vista sono eloquenti le ultime installazioni francesi o spagnole in cui le strutture di sostegno dei cavi sono ridotte all'essenziale.**

Storicamente le innovazioni più importanti hanno riguardato la realizzazione di vetture articolate di maggiore lunghezza, la sostituzione dell'asta trolley col pantografo, l'attivazione di sistemi di segnalamento radio per gli scambi, il pianale ribassato, l'applicazione di sistemi di condizionamento ed il controllo elettronico del veicolo.

2.3.1 FATTORI COMPETITIVI

Il grande vantaggio di una linea tranviaria risiede nel possedere i **vantaggi tecnici di una ferrovia** uniti alla capacità di percorrere le strade cittadine. La marcia su rotaia garantisce **stabilità, confort e ridotti consumi energetici** rispetto a veicoli su gomma equivalenti. La guida vincolata permette inoltre di far circolare in sicurezza vetture articolate e accoppiate, ottenendo maggiore capacità per singolo vettore e riducendo il costo umano del servizio. **Le linee tranviarie risultano inoltre molto affidabili rispetto alle diverse condizioni climatiche e garantiscono una migliore qualità di servizio percepita presso il pubblico.**

L'alimentazione avviene attraverso un pantografo, quindi con una sola linea aerea e senza possibilità di sgancio, mentre il ritorno avviene direttamente sui binari, che fungono anche la messa a terra. Le rotaie hanno inoltre il compito di scaricare uniformemente il peso su tutta la sede viaria, permettendo un carico per asse fino a 11 t. Sempre grazie alle rotaie è tecnicamente possibile il **segnalamento in radiofrequenza** per servizi ausiliari alla circolazione e per posizionamento. **Il disegno geometrico dei binari nel centro cittadino ha in aggiunta un fortissimo contenuto semantico.** La circolazione di veicoli tranviari di nuova generazione su linee con armamento di buona qualità garantisce infine una estrema silenziosità, fino a raggiungere valori di 10-12 decibel inferiori rispetto al rumore generato da mezzi su gomma; i moderni veicoli tranviari sono inoltre capaci di accelerazioni elevate, fino a $1,3 \text{ m/s}^2$, e frenatura molto efficace grazie alla presenza di freni idraulici e pattini elettromagnetici.

I veicoli tranviari godono, infine, di un **ciclo di vita estremamente lungo**: affidabilità meccanica, manutenibilità e soprattutto bassa obsolescenza presso il pubblico permettono di ipotizzare una

vita utile di almeno 40 anni, contro un valore di 10 - 12 anni per gli autobus, rendendo i maggiori costi facilmente ammortizzabili. In Europa è frequente trovare ancora in servizio vetture tranviarie di 60 o 70 anni, non solo per servizi turistici, anche se una simile longevità di servizio non è plausibilmente ipotizzabile per le vetture di nuova fabbricazione.

2.3.2 SVANTAGGI

Le linee tranviarie, in quanto linee ferroviarie, sono più onerose nella gestione causa la presenza di rilevanti infrastrutture, la necessità di depositi dedicati, di manutenzione e di forza lavoro specializzata; l'impianto di nuove tranvie comporta opere di posatura rilevanti, costose sia in termini di materiali e lavoro che per quanto riguarda i disagi legati ai tempi abbastanza lunghi dei lavori.

Una linea tranviaria, se dotata di materiale rotabile e armamento in cattivo stato, genera inoltre forti vibrazioni nelle costruzioni circostanti e dà luogo al tipico stridio generato dal bordino in curva. Particolarmente costosi risultano essere gli scambi, che rappresentano anche la prima tra le cause di inquinamento acustico, mentre la presenza della linea aerea incontra resistenze a causa di aprioristici giudizi negativi sul suo impatto visivo: **da questo punto di vista sono eloquenti le ultime installazioni francesi o spagnole in cui le strutture di sostegno dei cavi sono ridotte all'essenziale.**

2.3.3 DIREZIONE EVOLUTIVA

Storicamente le innovazioni più importanti hanno riguardato la realizzazione di vetture articolate di maggiore lunghezza, la sostituzione dell'asta trolley col pantografo, l'attivazione di sistemi di segnalamento radio per gli scambi, il pianale ribassato, l'applicazione di sistemi di condizionamento ed il controllo elettronico del veicolo. Come segnalato nella norma **UniFer 8379**, l'evoluzione di una linea tranviaria tradizionale, tramite aumento della velocità commerciale, è rappresentata dalla tranvia veloce, o *Light Rail Transport*: tale passaggio evolutivo non è discontinuo, ma progressivo e legato soprattutto alla separazione della sede.



Comune di Bologna

SERVIZIO DI PROGETTAZIONE DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DELLA
PRIMA LINEA TRANVIARIA DI BOLOGNA (LINEA ROSSA)

CIG 7499621308 - CUP F32E18000020001

Sostenibilità
è Bologna

Città	Linea/e	Lunghezza	Fermate intermedie	Costo (EUR 2016)	Costo per metro al netto delle opere d'arte e deim ezzi
Bergamo	T1	12,448	16	200,250,000	12,724
Firenze	T1	7,407	14	306,278,500	30,794
Firenze	T2-T3.1	8,448	18	424,845,429	36,250
Messina	23	7,720	18	105,557,593	9,793
Milano	15	1,890	5	18,248,400	9,655
Milano	31	8,540	27	142,800,000	11,789
Milano	172	14,204	27	239,057,244	13,122
Palermo	1,2,3,4	17,783	44	267,950,000	11,782
Roma	2	2,872	8	42,059,217	14,645
Roma	8	2,107	7	25,676,171	12,186
Roma	5,14	348	1	6,486,192	18,638
Roma	2	290	1	3,685,600	12,709
Roma	8	450	1	6,646,200	14,769
Sassari	1	4,331	8	45,573,000	7,398
Torino	4	1,980	5	253,283,205	9,800
Barcelona	Tram baix	32,089	64	569,936,245	12,343
Barcelona	Tram besòs	14,172	27	512,693,549	26,721
Bilbao	A	5,750	14	69,655,116	7,718
Madrid	M L1	5,420	9	250,706,816	11,849
Madrid	M L2	8,710	13	215,941,679	7,589
Madrid	M L3	13,740	16	258,609,216	11,617
Murcia	1	18,260	28	247,036,772	11,920
Parla	1	8,201	15	133,261,566	13,167
Siviglia	1	2,240	5	80,900,377	28,321
Tenerife	1,2	15,911	27	366,905,965	17,957
Valencia	4,6	20,400	43	330,314,724	10,366
Vitoria-Gasteiz	1,2	12,840	20	124,967,644	6,759
Zaragoza	1	12,880	34	558,831,136	32,297

Tabella 6. Costi indicativi al valore 2016 di alcune realizzazioni tranviarie degli ultimi 20 anni: Italia e Spagna



Città	Linea/e	Lunghezza	Fermate intermedie	Costo (EUR 2016)	Costo per metro al netto delle opere d'arte e deim ezzi
Angers	A	12,300	25	241,135,190	13,807
Aubagne	1	2,800	7	40,447,443	8,752
Besançon	A,B	14,500	31	223,895,977	11,756
Bordeaux	1,2,3	58,900	111	1,690,948,722	22,258
Brest	1	14,300	28	301,885,920	16,500
Dijon	T1,T2	19,000	35	353,315,862	14,633
Grenoble	1,2,3,4,5	42,700	78	1,254,138,532	18,592
Le Havre	1,2	13,000	23	398,242,002	23,561
Le Mans	T1,T2	18,900	35	412,535,869	17,130
Lille	1,2	17,500	36	229,447,118	7,650
Lyon	1,2,3,4,5,6	66,300	99	948,342,728	10,543
Marseille	1,2,3	12,700	33	429,647,064	24,859
Montpellier	1,2,3,4,5	56,000	83	895,532,298	11,836
Mulhouse	1,2,3,4	35,200	29	331,669,901	8,044
Nantes	1,2,3	41,300	82	485,408,505	7,709
Nice	1	9,200	22	450,027,305	37,537
Orléans	A,B	29,300	49	875,978,048	23,396
Paris/Île-de-France	1,2,3,4,7,8	83,530	144	2,073,846,517	17,976
Reims	1,2	11,200	23	312,320,144	22,922
Rouen	1	15,100	31	603,820,657	22,493
Saint-Étienne	3	11,700	38	183,709,779	11,857
Strasbourg	1,2,3,4,5,6	40,700	72	1,158,683,290	17,678
Toulouse	1,2	16,700	27	316,683,189	15,041
Tours	1	15,500	29	325,148,815	16,017
Valenciennes	A,B	33,800	48	373,109,338	9,530

* rivalutazione monetaria indice locale

** confronto sull'indice dei prezzi al consumo

Tabella 7. Costi indicativi al valore 2016 di alcune realizzazioni tranviarie degli ultimi 20 anni: Francia

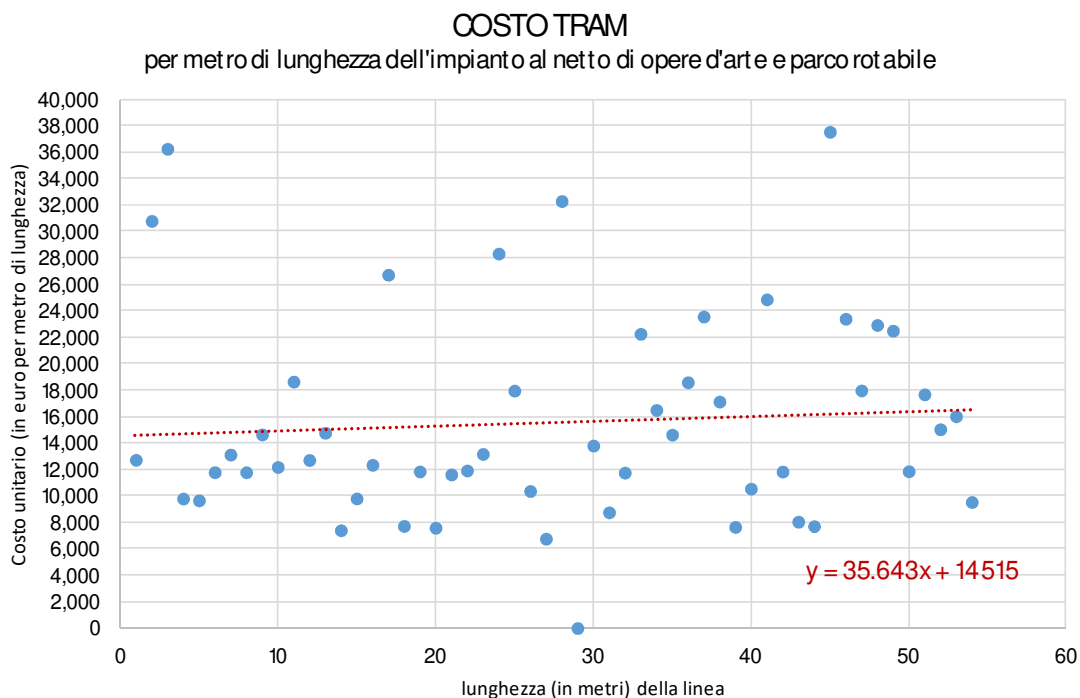


Fig. 1. Curva ponderata del costo per metro di lunghezza dell'impianto al netto di opere civili e parco rotabile

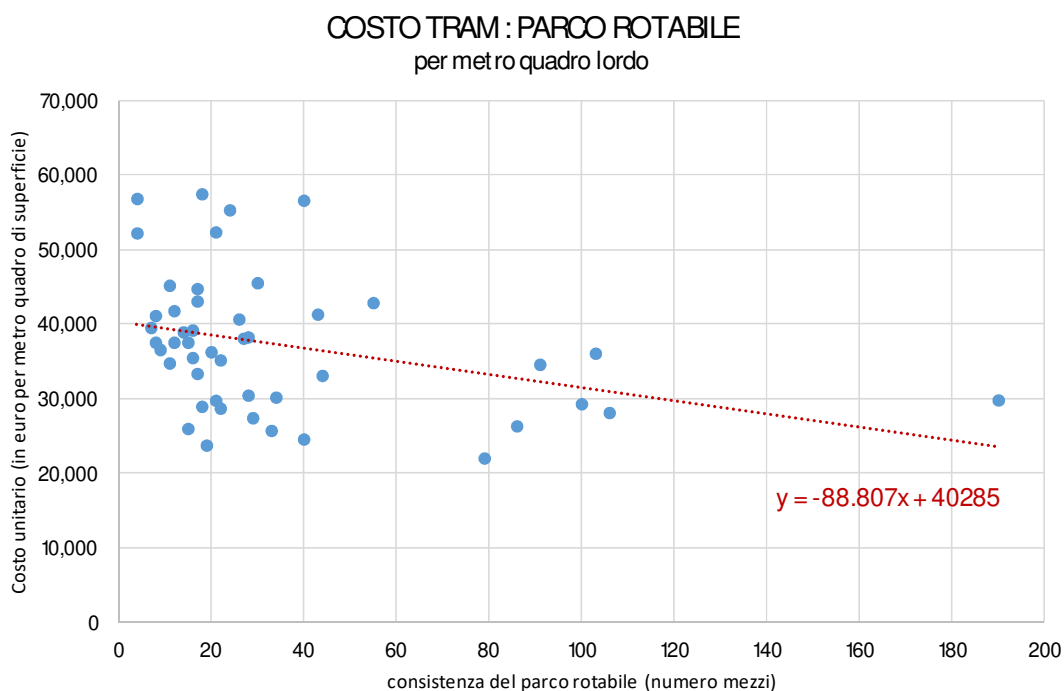


Fig. 2. Costo medio del parco rotabile (per metro quadro lordo)

2.4 CONFRONTO TECNOLOGICO

Di seguito le tabelle di comparazione delle possibili tecnologie per l'implementazione del corridoio di trasporto collettivo in sede propria Borgo Panigale – Centro – CAAB/Facoltà di Agraria. In particolare si considera un corridoio di 15 km con una domanda feriale di 70.000 passeggeri (ed un coefficiente di estensione annuale di 300 giorni feriali equivalenti).

Si tratta di 9 possibili alternative:

1. Autobus diesel (12 m)
2. Autobus diesel (18 m)
3. Filobus (12 m)
4. Filobus (18 m)
5. Elettrobus (12 m) con batterie
6. Elettrobus (18 m) con batterie
7. Elettrobus (12 m) con supercondensatori
8. Elettrobus (18 m) con supercondensatori
9. Tram (33 m)

La lunghezza dei mezzi tranviari è assunta indicativamente da 33 metri.

L'analisi è svolta su un ciclo di vita di 25 anni.

Riferimenti per l'analisi sono:

- database ASSTRA¹;
- database dei costi di trasporto CERTU/CEREMA² trasposti in base di costo italiana (fattore 1,00:1,27).

I costi operativi sono quelli storici di Bologna. Al fine di una puntuale comparazione tra i due diversi scenari si è optato per calcolare i costi operativi per ciascun mezzo di trasporto al netto delle componenti relative agli ammortamenti e alla remunerazione del capitale investito.

¹ Si veda: <http://www.asstra.it/conoscenza/publicazioni.html>

² Si veda: <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/general?boutique%5B0%5D=thematique%3A16>

Tabella 8: Costi gestionali nello scenario programmatico (2026)

Modalità di trasporto	Costo vkm 2017
Filbous	5,79
Bus	5,49

I costi di esercizio del tram, tecnologia oggi non presente a Bologna, sono stati valutati secondo la metodologia dell'allegato 3A del DM 157 del 28/03/2018 "Definizione dei costi standard dei servizi di trasporto pubblico locale e regionale e dei criteri di aggiornamento e applicazione".

Tema	Indicatore	Unità	Scenario di progetto
			2026
Modalità Tram - Costo chilometrico standard		€/veicolo*km	8,36
Modalità Tram - Costo storico e previsto	Costo dell'area esercizio	€/veicolo*km	4,38
	di cui costo del personale di guida	€/veicolo*km	2,41
	di cui costo di altro personale di movimento	€/veicolo*km	0,22
	di cui costo di energia di trazione	€/veicolo*km	0,64
	di cui costo per i rotabili (ammortamenti e canoni d'affitto/leasing)	€/veicolo*km	0,00
	cui costo per la manutenzione di esercizio, pulizia, vigilanza e sicurezza dei rotabili	€/veicolo*km	1,11
	Costo per la manutenzione di esercizio, pulizia, vigilanza e sicurezza dell'infrastruttura	€/veicolo*km	1,14
	Costo per l'energia delle stazioni	€/veicolo*km	0,00
	Costo per l'utilizzo dell'infrastruttura, comprensivo del costo della relativa manutenzione	€/veicolo*km	2,18
	Costi generali e amministrativi	€/veicolo*km	0,66
	Costo del capitale investito netto	€/veicolo*km	0,00
	Costo chilometrico effettivo	€/veicolo*km	8,36

Tutti i costi sono espressi al valore 2017.



Come detto si considera un corridoio di 15 km con una domanda feriale di 70.000 passeggeri (ed un coefficiente di estensione annuale di 300 giorni feriali equivalenti). La comparazione è svolta sulla necessità di rispondere ad una domanda oraria di picco di 2.500 passeggeri sulla direzione più carica.

Nella tabella seguente il dimensionamento del servizio per ciascuna alternativa tecnologica (incluso il confronto con il solo mezzo privato).

Tecnologia	Mezzi necessari (per frequenza)	Mezzi necessari (per capacità)
Automobile a benzina	678	1.313
Automobile a diesel	678	1.313
Autobus diesel (12 m)	31	58
Autobus diesel (18 m)	19	35
Filobus (12 m)	31	58
Filobus (18 m)	19	35
Elettrobus (12 m) con batterie	34	66
Elettrobus (18 m) con batterie	21	40
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	68	131
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	28	53
Tram (33 m)	11	21

Tabella 9. Dimensionamento del servizio per ciascuna alternativa tecnologica (incluso il confronto con il solo mezzo privato) sulla domanda oraria di picco di 2.500 passeggeri sulla direzione più carica. La prima colonna indica la flotta necessaria, sul ciclo di vita di 25 anni, per garantire una frequenza di almeno 7,5'. La seconda per rispondere alla capacità di picco richiesta. Il valore di progetto è il massimo tra le due colonne: si vede che la capacità resta il valore "critico" per tutte le tecnologie.

Per i valori di calcolo di dettaglio si rimanda alle tabelle in allegato.

Il primo confronto è svolto sul peso effettivo per passeggero trasportato a pieno carico.

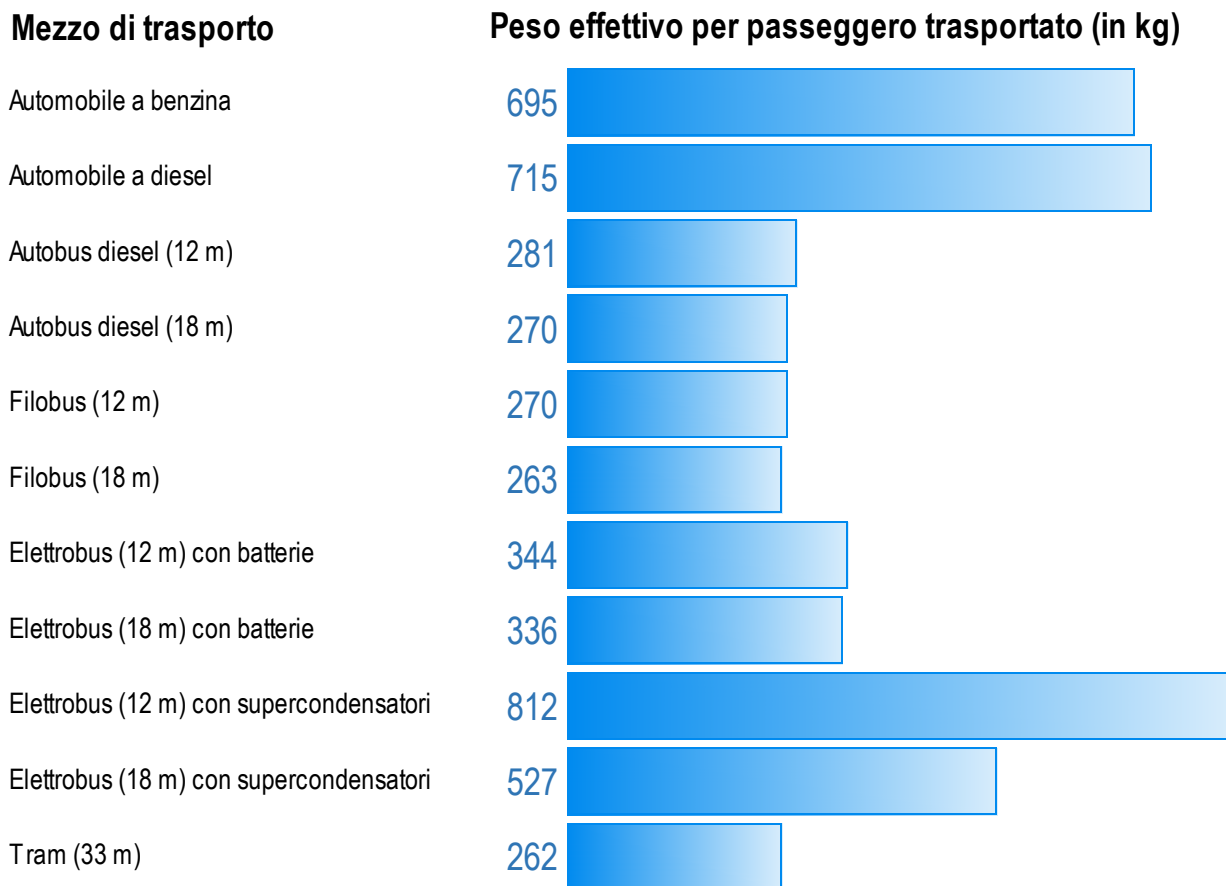


Fig. 3. Peso effettivo per passeggero trasportato (in kg, a pieno carico)

Il secondo confronto riguarda il costo lordo (realizzazione più esercizio e manutenzione).

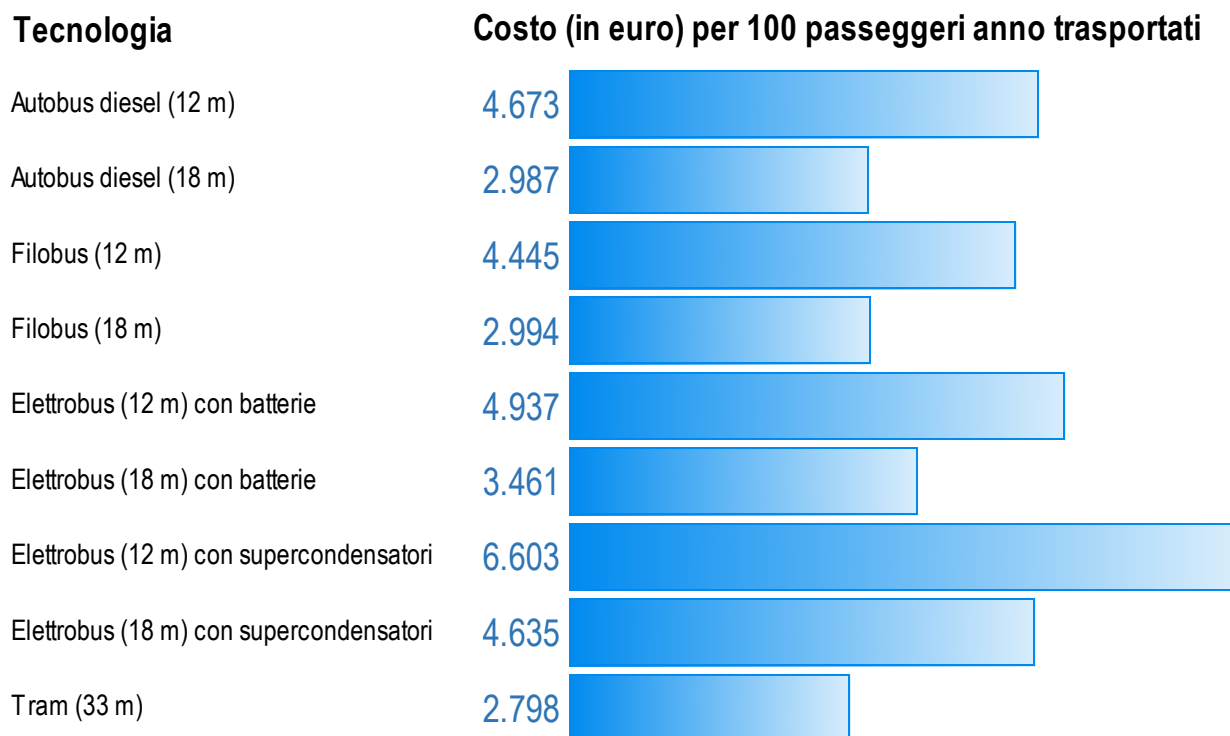


Fig. 4. Costo lordo (realizzazione più esercizio e manutenzione)

Il terzo confronto riguarda l'energia grigia sull'intero ciclo di vita per tecnologia.

Mezzo di trasporto

Energia grigia per posto offerto (kWh) su un ciclo di vita di servizio di 25 anni

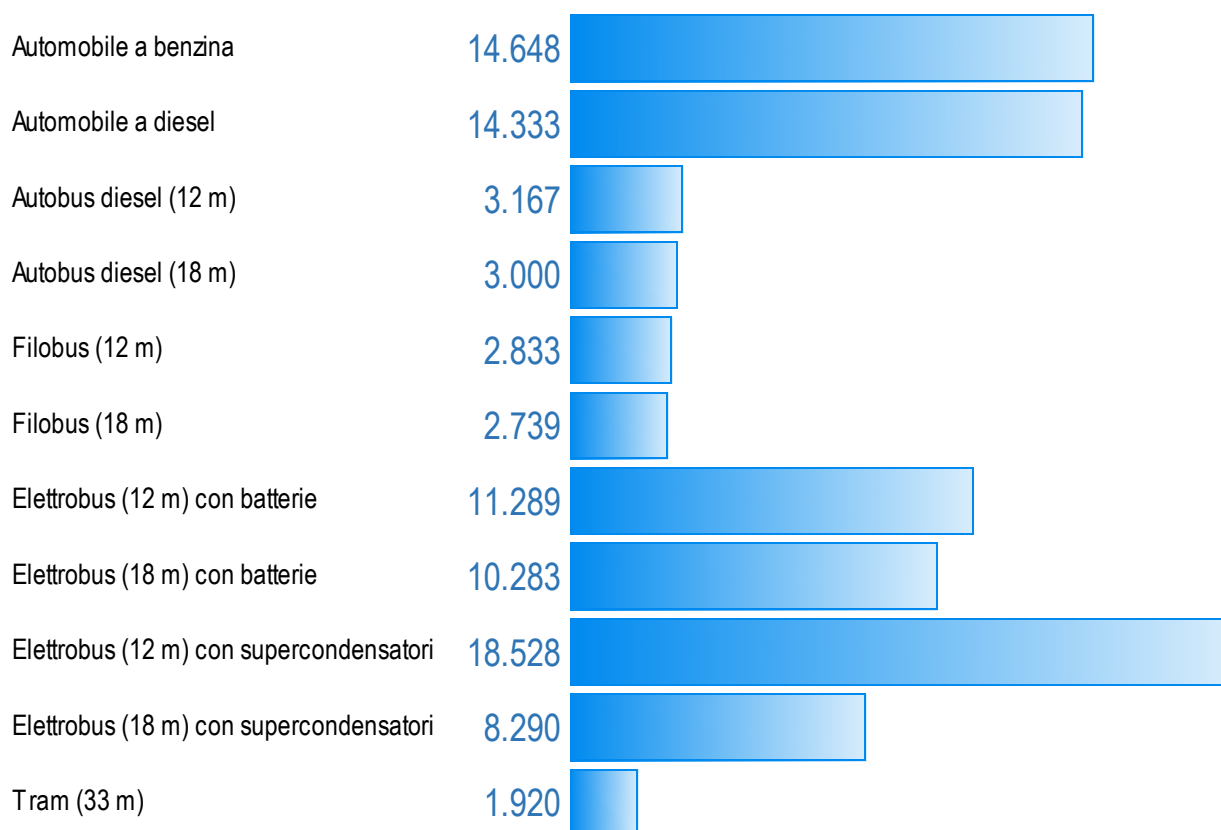


Fig. 5. Energia grigia sull'intero ciclo di vita per tecnologia

Il quarto confronto riguarda l'energia totale (grigia più esercizio) sull'intero ciclo di vita.

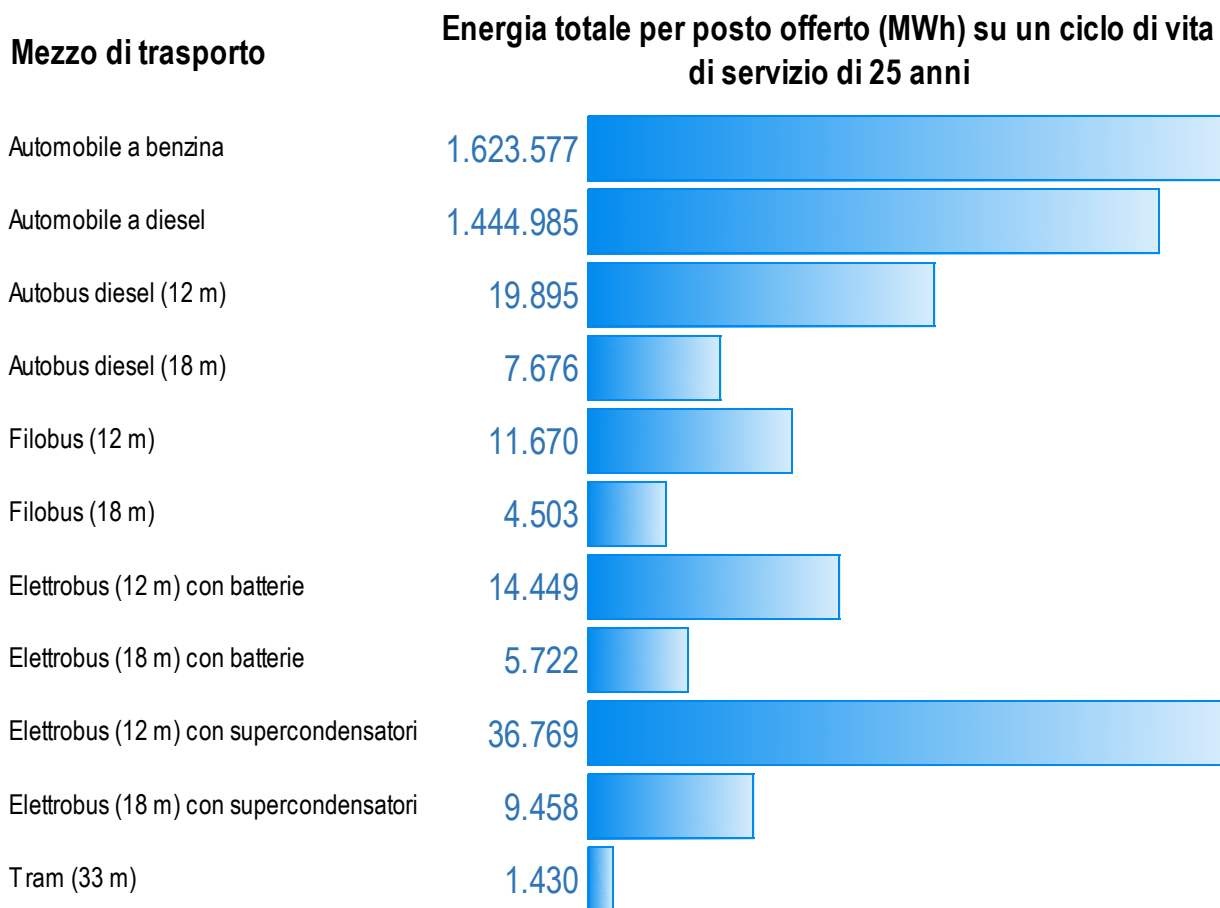


Fig. 6. Energia totale (grigia più esercizio) sull'intero ciclo di vita

Di seguito la valutazione complessiva risultante dalla somma dei costi complessivi per implementazione ed esercizio più l'energia totale per posto offerto (MWh) su un ciclo di vita di servizio di 25 anni. La somma è omogeneizzata a 1.000.

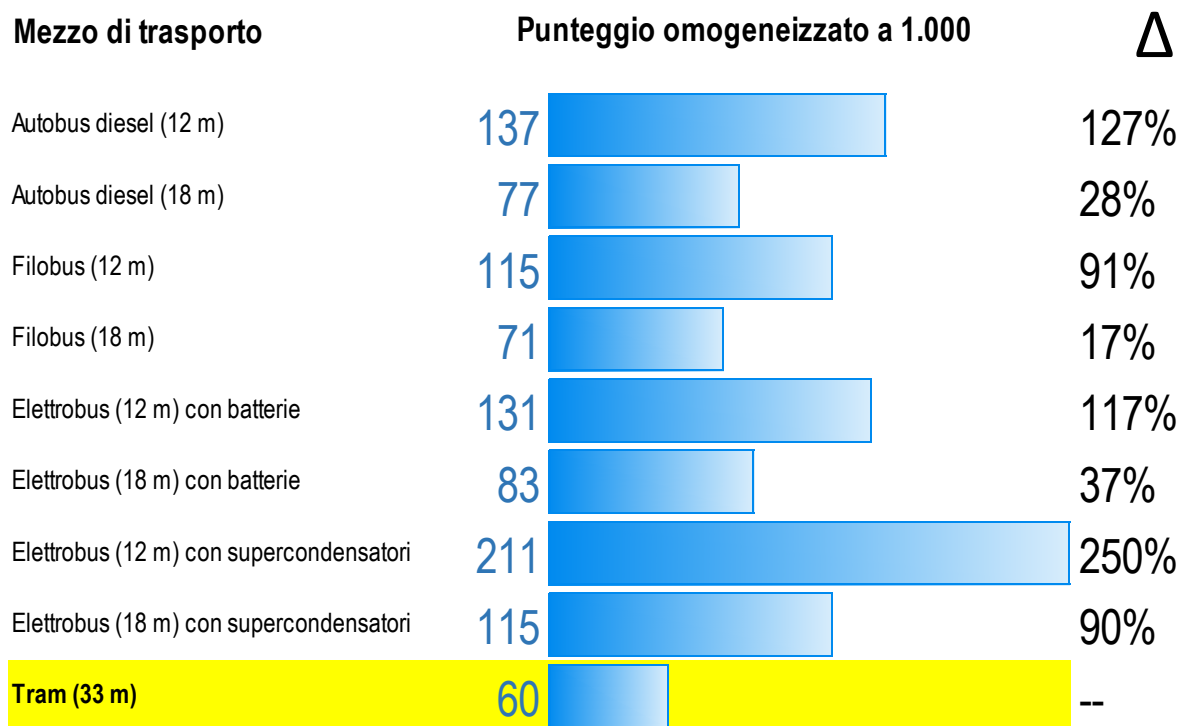


Tabella 10. Punteggio complessivo su efficienza ed efficacia per tecnologia e scarto rispetto al punteggio migliore, quello risultante per il tram

Si vede che il tram, sull'intero ciclo di vita, rappresenta l'opzione che coniuga meglio l'efficienza tecnologia con l'efficacia operativa.

3. TABELLE DI DETTAGLIO DEL CONFRONTO TRA LE DIVERSE TECNOLOGIE

Di seguito il dettaglio delle misure utilizzate per il confronto tra le possibili tecnologie per l'implementazione del corridoio di trasporto collettivo in sede propria Borgo Panigale – Centro – CAAB/Facoltà di Agraria.

Si tratta di 9 possibili alternative:

1. Autobus diesel (12 m)
2. Autobus diesel (18 m)
3. Filobus (12 m)
4. Filobus (18 m)
5. Elettrobus (12 m) con batterie
6. Elettrobus (18 m) con batterie
7. Elettrobus (12 m) con supercondensatori
8. Elettrobus (18 m) con supercondensatori
9. Tram (33 m)

La lunghezza dei mezzi tranviari è assunta indicativamente da 33 metri.

L'analisi è svolta su un ciclo di vita di 25 anni.

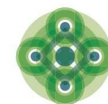
Riferimenti per l'analisi sono:

- database ASSTRA³;
- database dei costi di trasporto CERTU/CEREMA⁴ trasposti in base di costo italiana (fattore 1,00:1,27).

Tutti i costi sono espressi al valore 2017.

³ Si veda: <http://www.asstra.it/conoscenza/publicazioni.html>

⁴ Si veda: <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/general?boutique%5B0%5D=thematique%3A16>



Mezzo	Vita media in km percorsi	Vita media in anni	Costo per p/anno (€)	Costo per milione di pkm/anno (€)	Impianti di trazione e via di corsa
Automobile a benzina	120.000	12,8	253,9	27.083	0
Automobile a diesel	180.000	13,5	314,8	23.611	0
Autobus diesel (12 m)	7.500.000	15,0	185,2	370	0
Autobus diesel (18 m)	7.500.000	15,0	177,8	356	0
Filobus (12 m)	10.000.000	20,0	333,3	667	75.000.000
Filobus (18 m)	10.000.000	20,0	300,0	600	75.000.000
Elettrobus (12 m) con batterie	10.000.000	20,0	437,5	875	53.250.000
Elettrobus (18 m) con batterie	10.000.000	20,0	403,8	808	53.250.000
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	10.000.000	20,0	937,5	1.875	7.500.000
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	10.000.000	20,0	600,0	1.200	7.500.000
Tram (33 m)	12.500.000	25,0	512,0	1.024	225.000.000

Tabella 11. Costo dei mezzi, degli impianti di trazione e della via di corsa



Mezzo	VEICOLI		ESERCIZIO		
	Costo cad. (€)	Costo per milione di pkm/anno (€)	Costo per pkm (cc€)	Costo per vettura km (€)	Costo per milione di pkm/anno (€)
Automobile a benzina	13.000	2.116	12,37	0,49	123.700
Automobile a diesel	17.000	1.749	11,01	0,44	110.093
Autobus diesel (12 m)	250.000	25	3,41	3,07	34.100
Autobus diesel (18 m)	400.000	24	2,19	3,29	21.921
Filobus (12 m)	600.000	59	2,00	1,80	20.000
Filobus (18 m)	900.000	53	1,29	1,93	12.857
Elettrobus (12 m) con batterie	700.000	78	2,20	1,76	22.000
Elettrobus (18 m) con batterie	1.050.000	72	1,41	1,84	14.143
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	750.000	167	2,80	1,12	28.000
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	1.200.000	60	1,80	1,80	18.000
Tram (33 m)	3.200.000	41	0,68	1,70	6.800

Tabella 12. Caratteristiche dimensionali



Mezzo	Vita media in km percorsi	Vita media in anni	Costo per p/anno (€)	Costo per milione di pkm/anno (€)
Automobile a benzina	120.000	12,8	253,9	27.083
Automobile a diesel	180.000	13,5	314,8	23.611
Autobus diesel (12 m)	7.500.000	15,0	185,2	370
Autobus diesel (18 m)	7.500.000	15,0	177,8	356
Filobus (12 m)	10.000.000	20,0	333,3	667
Filobus (18 m)	10.000.000	20,0	300,0	600
Elettrobus (12 m) con batterie	10.000.000	20,0	437,5	875
Elettrobus (18 m) con batterie	10.000.000	20,0	403,8	808
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	10.000.000	20,0	937,5	1.875
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	10.000.000	20,0	600,0	1.200
Tram (33 m)	12.500.000	25,0	528,0	1.056

Fig. 7. Costo di acquisto mezzi e gestione



Mezzo	MANUTENZIONE			AMBIENTE	
	Costo operativo netto per pkm (cc€)	Costo per vettura km (€)	Costo per milione di pkm/anno (€)	Costo per pkm (cc€)	Costo per vettura km (€)
Automobile a benzina	1,42	0,06	14.200	141,01	5,64
Automobile a diesel	1,54	0,06	15.400	118,75	4,75
Autobus diesel (12 m)	3,33	3,00	33.333	5,41	4,87
Autobus diesel (18 m)	2,00	3,00	20.000	3,48	5,22
Filobus (12 m)	3,89	3,50	38.889	4,27	3,84
Filobus (18 m)	2,33	3,50	23.333	2,75	4,12
Elettrobus (12 m) con batterie	3,38	2,70	33.750	4,48	3,59
Elettrobus (18 m) con batterie	2,08	2,70	20.769	2,88	3,75
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	4,67	1,87	46.667	5,34	2,14
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	4,20	4,20	42.000	3,43	3,43
Tram (33 m)	1,80	4,50	18.000	1,27	3,18

Tabella 13. Costo di manutenzione ordinaria e spese sanitarie indotte (qualità dell'aria e rumore)



Tecnologia	Acquisto mezzi	Impianti di trazione e via di corsa	Impianti di accumulo energetico di bordo
Automobile a benzina	33.325.195	0	0
Automobile a diesel	41.319.444	0	0
Autobus diesel (12 m)	24.305.556	0	0
Autobus diesel (18 m)	23.333.333	0	0
Filobus (12 m)	58.333.333	75.000.000	0
Filobus (18 m)	52.500.000	75.000.000	0
Elettrobus (12 m) con batterie	76.562.500	53.250.000	114.843.750
Elettrobus (18 m) con batterie	70.673.077	53.250.000	100.961.538
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	164.062.500	7.500.000	206.718.750
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	105.000.000	7.500.000	118.125.000
Tram (33 m)	67.200.000	225.000.000	0

Tabella 14. Costo complessivo di acquisto per un ciclo di vita di 25 anni



Tecnologia	Esercizio	Manuten- zione	Totale
Automobile a benzina	974.137.500	111.825.000	1.119.287.695
Automobile a diesel	866.982.375	121.275.000	1.029.576.819
Autobus diesel (12 m)	268.537.500	262.500.000	555.343.056
Autobus diesel (18 m)	172.631.250	157.500.000	353.464.583
Filobus (12 m)	157.500.000	306.250.000	597.083.333
Filobus (18 m)	101.250.000	183.750.000	412.500.000
Elettrobus (12 m) con batterie	173.250.000	265.781.250	683.687.500
Elettrobus (18 m) con batterie	111.375.000	163.557.692	499.817.308
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	220.500.000	367.500.000	966.281.250
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	141.750.000	330.750.000	703.125.000
Tram (33 m)	53.550.000	141.750.000	487.500.000

Tabella 15. Costo complessivo di gestione e manutenzione per un ciclo di vita di 25 anni