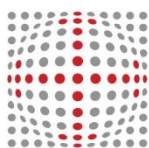




Comune di Pisa



Comune di San Giuliano Terme



**PISAMO**  
AZIENDA PER LA MOBILITÀ SPA

# SISTEMA TRANVIARIO DI PISA – LINEA 1 PIAZZA DEI MIRACOLI – OSPEDALE CISANELLO/CNR

## ELABORATI GENERALI

### Documento di fattibilità delle alternative progettuali

|                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>COMUNE DI PISA<br/>IL DIRIGENTE<br/>Ing. Maurizio Iannotta</p> |  <p>PISAMO s.p.a.<br/>IL DIRETTORE TECNICO<br/>Ing. Alessandro Fiorindi</p> |  <p>ARCHITECNA ENGINEERING s.r.l.<br/>COORDINATORE DELLA PROGETTAZIONE:<br/>Ing. Santi Caminiti</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
| <p>PROGETTISTI</p>     |  |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|

| COMMESSA | FASE | CATEGORIA | DISCIPLINA | TIPO | NUMERO | REV. | NOME FILE               |
|----------|------|-----------|------------|------|--------|------|-------------------------|
| T R P I  | I M  | G E N     | G E N      | R L  | 0 0 2  | A    | TRPI-IM-GEN-GEN-RL002-A |

| REV. | DATA    | DESCRIZIONE     | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO   |
|------|---------|-----------------|---------|------------|-------------|
| A    | DIC. 24 | PRIMA EMISSIONE | AA. VV. | D. SALVO   | S. CAMINITI |
| B    |         |                 |         |            |             |
| C    |         |                 |         |            |             |
| D    |         |                 |         |            |             |



# DOCFAP

## Documento di fattibilità delle alternative progettuali

### *Indice della relazione*

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Premessa .....                                                                         | 4  |
| 2. Inquadramento procedurale della proposta .....                                         | 4  |
| 3. Il sistema della mobilità pisana .....                                                 | 5  |
| 3.1. La rete delle LAM .....                                                              | 5  |
| 3.2. Sistema ettometrico <i>Pisamover</i> .....                                           | 6  |
| 3.3. Il PUMS della città di Pisa .....                                                    | 7  |
| 3.4. Inquadramento intercomunale d'Area vasta .....                                       | 7  |
| 4. Analisi delle alternative di tracciato .....                                           | 9  |
| 4.1. Descrizione delle possibili alternative di tracciato .....                           | 9  |
| 4.2. Definizione dello scenario di progetto .....                                         | 14 |
| 5. Analisi delle alternative tecnologiche .....                                           | 16 |
| 5.1. Il sistema filobus .....                                                             | 16 |
| 5.1.1. Caratteristiche tecniche .....                                                     | 17 |
| 5.1.2. Situazione filoviaria nel mondo .....                                              | 22 |
| 5.1.3. Stato dell'arte dei sistemi di Austria, Cechia, Francia, Germania e Svizzera ..... | 25 |
| 5.1.4. Fonti dei dati utilizzati nell'analisi .....                                       | 52 |
| 5.2. Gli elettrobus .....                                                                 | 54 |
| 5.2.1. Tipologie di infrastruttura di ricarica .....                                      | 56 |
| 5.2.2. Strategie di ricarica delle batterie .....                                         | 59 |
| 5.2.3. Esperienze consolidate di busvie elettriche .....                                  | 62 |
| 5.3. Analisi economica per la scelta della tecnologia .....                               | 68 |
| 5.3.1. Modello di costo operativo .....                                                   | 68 |
| 5.3.2. Modello di comparazione economica .....                                            | 79 |
| 5.3.3. Risultati sull'impianto di progetto .....                                          | 88 |
| 6. Possibili scenari d'Area vasta .....                                                   | 91 |
| 6.1. Cenni storici .....                                                                  | 91 |
| 6.1.1. Pisa .....                                                                         | 91 |
| 6.1.2. Livorno .....                                                                      | 92 |
| 6.1.3. Le tramvie extraurbane .....                                                       | 93 |
| 6.1.4. La ferrovia costiera Pisa – Tirrenia – Livorno .....                               | 95 |
| 6.2. Prospettive di sviluppo d'Area vasta .....                                           | 96 |

## 1. Premessa

La presente relazione riguarda lo studio delle alternative progettuali in merito al progetto di fattibilità tecnico-economica del nuovo impianto tramviario di Pisa, Piazza dei Miracoli – Stazione – Ospedale Cisanello e diramazione per il polo CNR e parcheggio scambiatore di San Giuliano Terme.

## 2. Inquadramento procedurale della proposta

Il progetto di fattibilità tecnico-economica (PFTE) presentato per la scadenza del 15/01/21 dell'Avviso numero 2 per la presentazione delle istanze di finanziamento per il Trasporto Rapido di Massa (TRM), prevedeva una nuova linea tramviaria, inserita nel tessuto urbano centrale della città, dalla stazione centrale, punto di arrivo del *Pisa Mover*, con l'ospedale di Cisanello.

Secondo la visione di lungo periodo del PUMS e anche alla luce delle perplessità trasportistiche circa la sostenibilità di una visione infrastrutturale eccessivamente ridotta, l'Amministrazione Comunale ha deciso di presentare un ampliamento di tale proposta progettuale che vede il completamento del tracciato tramviario ipotizzato all'intero tracciato della attuale linea portante del TPL (LAM rossa) con un prolungamento verso via Bonanno Pisano e il Campo dei Miracoli e una diramazione della linea verso l'area del CNR con un nuovo parcheggio scambiatore a servizio del comune di San Giuliano Terme.

Il tracciato tramviario aggiornato consta di un impianto tramviario di 9.062 metri conformato a Y: dal capolinea ovest di piazza Manin-Duomo il tracciato raggiunge la stazione ferroviaria di Pisa Centrale, viale Bonaini, via Metteotti, via Matteucci, via Cisanello e da qui diramarsi a sud verso l'ospedale di Cisanello e lato nord verso via Giovannini e le residenze universitarie dei Praticelli, il Centro Nazionale delle Ricerche e il polo cardiologico della Fondazione Toscana Monasterio.



Fig. 1 – Schema unifilare della rete tramviaria di progetto



## 3. Il sistema della mobilità pisana

### 3.1. La rete delle LAM

Con l'obiettivo di rendere al contempo più razionale ed efficiente l'offerta di trasporto pubblico nel bacino pisano, nel 2006 viene approvato il progetto di riorganizzazione della rete con gerarchizzazione tra linee ad alta (frequenza) di mobilità – LAM e linee complementari.

Il concept delle linee LAM vede:

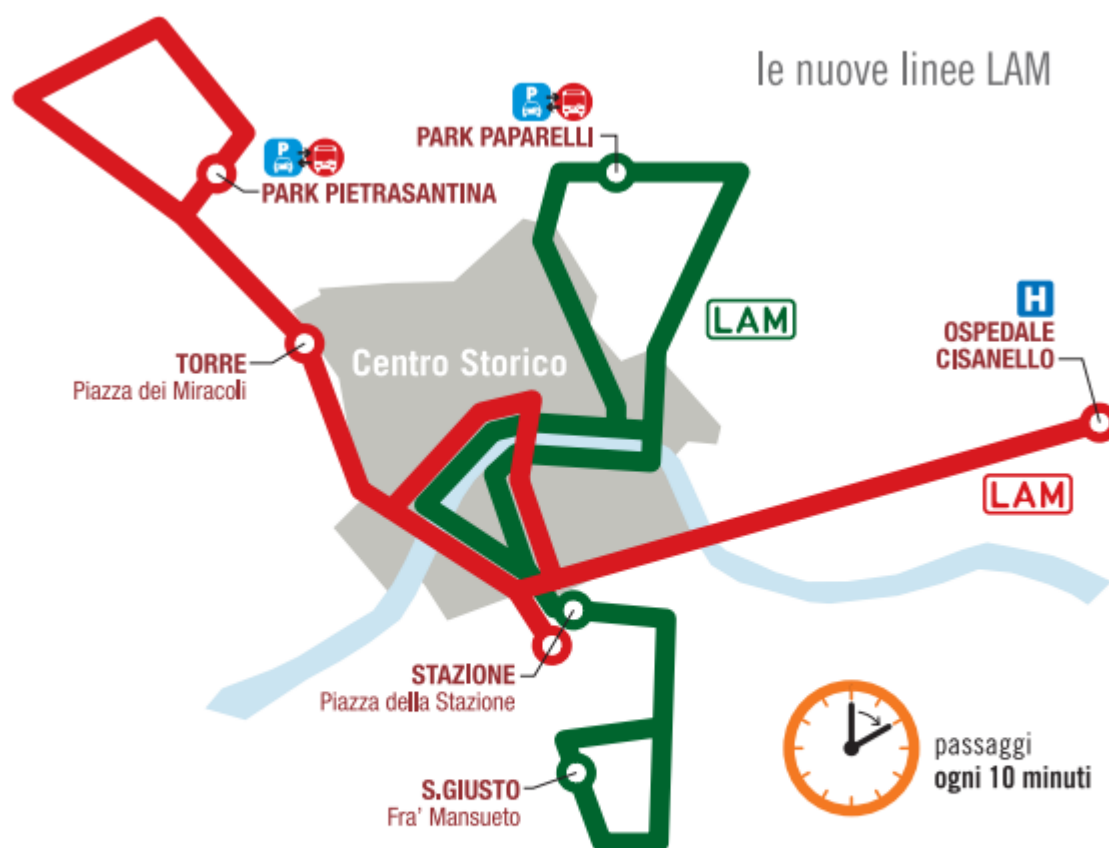
- Introduzione di tratte in sede riservata;
- Orario cadenzato su intertempi non superiori a 15';
- Parco rotabile dedicato con una maggiore offerta di posti;
- Identità grafica e segnaletica dedicata.



Fig. 2 – Rete linee ad alta mobilità al 2012

Il sistema viene attivato gradualmente tra il 2009 e il 2012 fino a comprendere una rete di 3 linee: LAM rossa, LAM blu e LAM verde per uno sviluppo di sedi di 17,6 km e 44 fermate (bidirezionali).

La rete viene riorganizzata nel 2017, in considerazione tra l'altro dell'entrata in servizio del collegamento ettometrico per *Pisamover* l'aeroporto: il ramo per l'aeroporto della rossa viene soppresso; la verde viene prolungata a sud, verso la frazione di San Giusto; la rossa viene parzialmente rimodulata lato Pietrasantina e viene fusa con la blu in una linea passante Pietrasantina-stazione-Cisanello. In quell'occasione viene ampiamente rimodulata anche la rete complementare: la linea 2 non attraversa più San Giusto, e dalla Stazione - dove si attesta alla fermata di viale Gramsci - raggiunge Porta a Lucca con una maggiore frequenza delle corse; la linea 5 cambia percorso nella zona di San Giusto con due nuove fermate in via Antoni e via Cerboni; la linea serale 21 non raggiunge più il terminal dell'Aeroporto.



### Sono due ma sono meglio di tre

Con le nuove linee **LAM rossa** e **LAM verde** ti muovi in Città in modo più semplice facendo meno cambi. I passaggi, ad esclusione del mese di agosto, hanno sempre frequenza di 10 minuti.

**LAM verde** sostituisce la linea 2 nel quartiere di S. Giusto aumentandone la frequenza dei passaggi, mentre la nuova **LAM rossa**, accorpando il percorso della LAM blu in direzione dell'Ospedale Cisanello, consente una maggiore regolarità del servizio a tutto vantaggio della puntualità.

Fig. 3 – Riorganizzazione della rete LAM, 2017

## 3.2. Sistema ettometrico Pisamover

Dopo un lungo periodo di gestazione amministrativa, la costruzione di un raccordo ferroviario tra la stazione di Pisa Centrale e lo scalo aeroportuale di Pisa-San Giusto è finanziata con la legge n. 369 del 1974 con 8 miliardi di lire (80,98 milioni di euro al valore 2024). La ferrovia fu attivata il 29 gennaio 1983, risultando il primo esempio di collegamento ferroviario aeroportuale in Italia. La ferrovia aveva inizio presso il binario 14 della stazione di Pisa Centrale; dopo aver seguito il percorso della ferrovia Leopolda in direzione di Livorno per circa un chilometro, la linea voltava verso est in direzione dell'aeroporto di Pisa-San Giusto, terminando il suo tragitto presso la stazione di Pisa Aeroporto, direttamente collegata alle strutture dello scalo aeroportuale. Il servizio sulla linea era svolto da treni regionali con corse cadenzate ogni mezz'ora. I convogli impiegavano 5 minuti per coprire l'intero tragitto; quasi tutte le corse erano attestare presso la stazione di Pisa Centrale, eccetto 4 corse giornaliere che raggiungevano la stazione di Firenze Santa Maria Novella.

La ferrovia, a singolo binario, rimase in servizio per 30 anni finché, il 15 dicembre 2013, non viene chiusa in via definitiva per consentire la costruzione del *Pisamover*, un impianto ettometrico a funicolare che ne ha ricalcato il percorso e, a partire dal 18 marzo 2017, ha sostituito la ferrovia mantenendone i tempi di percorrenza e aumentando la frequenza delle corse.

Il tracciato del *Pisamover* è lungo complessivamente 1,78 chilometri, ha tre fermate (più la predisposizione per una quarta) e ricalca esattamente il percorso della precedente ferrovia Pisa Centrale-Pisa Aeroporto. Il parco rotabile è costituito da due convogli di tipo Leitner *MiniMetro*, composti da tre casse con una capienza di 95 posti ciascuna: impiegano 5' per percorrere il tracciato (inclusa la fermata intermedia) con una velocità massima di 40 km/h.

### 3.3. Il PUMS della città di Pisa

Il Comune di Pisa si è dotato dal 2002 di un Piano Urbano Generale del Traffico Urbano (PGTU), adottato in via definitiva con Delibera del Consiglio Comunale n. 4 del 24/01/2002; con Delibera della Giunta Comunale n. 48 del 2/04/2020 sono state approvate le Linee Guida del PUMS; con Determina n. 825 del 13/08/2020 sono stati approvati gli esiti della procedura concorrenziale avviata sulla piattaforma regionale START-Rt (come da precedente Determina n. 742 del 29/07/2020) per la prestazione di servizi finalizzata alla Redazione del PUMS.

Con delibera della Giunta comunale n. 202 del 12/11/2020 è stato adottato il PUMS L'avviso di adozione del PUMS è stato pubblicato Albo Pretorio del Comune di Pisa in data 17/11/2020, nel medesimo avviso, inserito nella sezione Adozione PUMS a destra, sono indicati i tempi e i modi per la presentazione delle osservazioni.

Il PUMS è stato infine approvato con Delibera di Consiglio Comunale n. 19 dell'11/05/2021 e costituito dagli elaborati redatti in conformità alle controdeduzioni alle osservazioni pervenute ed allegati al provvedimento.

Il Piano individua una serie di interventi volti a dare un radicale cambio di paradigma della mobilità cittadina e d'area vasta dell'area urbana pisana<sup>1</sup>: il progetto della linea 1 della Tramvia di Pisa (Stazione Centrale-Ospedale di Cisanello) costituisce una delle principali azioni previste, progetto che ha la forza di modificare l'aspetto e la fruibilità generale di una parte importante della città. È in corso di redazione l'aggiornamento del PUMS in merito, tra l'altro, all'adeguamento del previsto sistema tramviario al percorso della LAM rossa, Duomo-Stazione-Cisanello e alla diramazione per il CNR e le residenze universitarie Praticelli oltre al nuovo parcheggio di scambio nel comune di San Giuliano Terme.

### 3.4. Inquadramento intercomunale d'Area vasta

Il 1° aprile 2021 i sindaci delle città di Firenze, Livorno, Lucca e Pisa, sottoscrissero una bozza di accordo, con l'obiettivo di arrivare a definire la collaborazione tra i Comuni per la redazione di un Piano della Mobilità Sostenibile riguardante un adeguamento del sistema delle infrastrutture che collegano la costa al centro della Regione. Il 6 giugno 2022 la bozza è diventata un atto ufficiale, coerente con il Piano Regionale Integrato Infrastrutture e Mobilità (PRIIM), in accordo quindi con la Regione Toscana.

L'accordo riconosce la centralità della città di Pisa non solo per la posizione geografica baricentrica tra le province della costa, né perché sede di istituzioni di grande rilievo internazionale, come le tre Università, il Cnr e l'Ospedale, o come sede di monumenti e attrattrice di flussi turistici di rilievo mondiale. Ma è principalmente il traffico ferroviario che la pone in posizione di eccellenza, come sede di una stazione ferroviaria la cui affluenza annua, circa 15.000.000 di passeggeri, è superata nell'Italia Centrale solo da Roma e Firenze. È da questa considerazione che parte la proposta condivisa di una promozione di un sistema ferroviario metropolitano caratterizzato da un collegamento rapido fra i centri maggiori – anche con servizi ferroviari leggeri tipo *tram-treno* -, costituente il primo passo da compiere per l'accordo di Area Vasta tra Pisa, Pontedera, Lucca, Viareggio e Livorno.

---

<sup>1</sup> Da ISTAT individuata dal Sistema Locale del Lavoro di Pisa, costituito da 5 comuni (Calci, Cascina, Pisa, San Giuliano Terme, Vecchiano) per una superficie di 448,3 km<sup>2</sup> e una popolazione di 184.194 abitanti.

Per quanto riguarda i collegamenti tra Livorno, Pisa e Lucca, allo stato attuale per andare dal centro di Pisa al centro di Livorno, distanti appena 20 km, se si usano mezzi pubblici occorre circa un'ora di tempo, tenuto conto della posizione molto decentrata della stazione di Livorno. In un quadro siffatto l'uso dell'auto privata viene preferito, con il conseguente intenso traffico sulla viabilità che collega i due centri. Non molto migliore è la situazione dei collegamenti tra Pisa e Lucca, aggravato dalla minore velocità della linea ferroviaria. Naturalmente ancora peggiore risulta il collegamento tra Livorno e Lucca.

Da studi preliminari compiuti sia dall'Unione industriale Pisana che dal Comune di Livorno è emerso che con interventi strutturali relativamente non onerosi il collegamento ferroviario tra il centro di Livorno e quello di Pisa potrebbe enormemente migliorare, semplicemente adeguando alla funzione di scalo per passeggeri le stazioni di Livorno Marittima e Livorno San Marco, e potenziando la funzione di Pisa San Rossore (di cui è stato proposto il cambio di denominazione in *Pisa Piazza dei Miracoli*). Il centro di Pisa potrebbe così essere raggiunto dal centro di Livorno in 15', con possibilità inoltre di connettere la tratta ferroviaria, già esistente, con l'aeroporto attraverso il *Pisamover* e una nuova fermata in corrispondenza di quella intermedia di questo. Per il collegamento Pisa San Rossore - Lucca si rende necessario, innanzitutto, il raddoppio della attuale tratta ferroviaria con l'eliminazione dei passaggi a livello esistenti, quindi la realizzazione di una fermata a Lucca San Concordio.

La seconda fase, certamente più onerosa ma con notevoli vantaggi per i centri intermedi tra Pisa e Pontedera, prevede invece la realizzazione di una nuova linea di trasporto rapido di massa in affiancamento alla ferrovia tra Pisa ed Empoli, che consentirebbe una maggiore accessibilità per diminuire drasticamente il traffico automobilistico.

## 4. Analisi delle alternative di tracciato

La proposta prevede la realizzazione di un corridoio di trasporto rapido di massa sull'allineamento dell'attuale linea LAM rossa, tra piazza Manin (accesso alla piazza dei Miracoli), la Stazione di Pisa Centrale, l'ospedale di Cisanello e la sede del Centro Nazionale delle Ricerche (CNR) le residenze universitarie dei Praticelli.

### 4.1. Descrizione delle possibili alternative di tracciato

Considerati gli assi viari di larghezza adeguata all'inserimento di un tracciato tramviario sono individuati tre scenari:

- A) Figura 4: linea rossa sulla direttrice Cisanello – Stazione centrale con regresso da piazza Vittorio Emanuele II a piazza della Stazione e continuazione verso via Battisti, il ponte della Cittadella, via Bonanno Pisano e chiusura ad anello sulla Stazione San Rossore da via Andrea Pisano e via Giunta Pisano; linea gialla sul medesimo percorso con deviazione in via Nenni/via Luzzato/via Volpi e via Moruzzi;
- B) Figura 5: linea rossa sulla direttrice Cisanello – Stazione centrale con regresso da piazza Vittorio Emanuele II a piazza della Stazione e continuazione verso via Battisti, il ponte della Cittadella, via Bonanno Pisano e chiusura ad anello sulla Stazione San Rossore da via Andrea Pisano e via Giunta Pisano; linea gialla dalle residenze Praticelli e parcheggio scambiatore di San Giuliano Terme per via Monsignor Manghi. Quindi percorso della rossa fino a piazza Caduti di Cefalonia e da qui passaggi sui lungarni fino al ponte della Cittadella dove si riunisce al percorso della rossa;
- C) Figura 6: linea rossa sulla direttrice Cisanello – Stazione centrale senza regresso da piazza Vittorio Emanuele II a piazza della Stazione e continuazione verso via Battisti, il ponte della Cittadella, via Bonanno Pisano e terminale in piazza Manin presso l'accesso alla piazza dei Miracoli; linea gialla dalle residenze Praticelli e parcheggio scambiatore di San Giuliano Terme per via Monsignor Manghi quindi percorso sovrapposto alla linea rossa.

Dal punto di vista dell'efficacia trasportistica (tabella 1) lo scenario B presenta i valori migliori in termini di domanda complessiva e domanda in diversione modale dal trasporto privato.

Tab. 1 – Analisi delle alternative di tracciato, efficacia trasportistica

|            | <i>Estensione<br/>impianti<br/>(metri, [1])</i> | <i>Domanda<br/>annuale totale</i> | <i>Domanda annuale in diversione<br/>modale</i> |                              |
|------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------|
|            |                                                 |                                   | <i>Totale</i>                                   | <i>Per m di<br/>impianto</i> |
| Scenario A | 15.469                                          | 7.975.796                         | 4.890.069                                       | 316                          |
| Scenario B | 17.966                                          | 9.986.097                         | 6.111.284                                       | <b>340</b>                   |
| Scenario C | 15.686                                          | 8.502.981                         | 5.077.953                                       | 324                          |

[1] estesa equivalente a doppio binario

Dal punto di vista della complessità progettuale sono valutati i seguenti indicatori:

- quota di tracciato in aree di rischio archeologico moderato o elevato;
- quota di tracciato in zone di vincolo idrogeologico;
- quota di tracciato insistente in aree di difficile inserimento urbanistico (per larghezza della carreggiata inferiore a 9 metri comprese le banchine).

La somma dei valori di detti indicatori restituisce la quota totale (evitando i doppi conteggi) di tracciato insistente in area di difficile trasformabilità.

Tab. 2 – Analisi delle alternative di tracciato, analisi della trasformabilità urbanistica

|                   | Estesa di tracciato (metri) |                             |                                                       |                                            |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                   | in rischio<br>archeologico  | in vincolo<br>idrogeologico | in aree di<br>difficile<br>inserimento<br>urbanistico | in area di<br>difficile<br>trasformabilità |
| Scenario A        | 2.738                       | 1.356                       | 2.178                                                 | 4.094                                      |
| Scenario B        | 4.394                       | 4.005                       | 3.834                                                 | 6.119                                      |
| <b>Scenario C</b> | <b>2.140</b>                | <b>1.298</b>                | <b>1.350</b>                                          | <b>3.438</b>                               |

|                   | Quota di tracciato         |                             |                                                       |                                            |
|-------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                   | in rischio<br>archeologico | in vincolo<br>idrogeologico | in aree di<br>difficile<br>inserimento<br>urbanistico | in area di<br>difficile<br>trasformabilità |
| Scenario A        | 17,7%                      | 8,8%                        | 14,1%                                                 | 26,5%                                      |
| Scenario B        | 24,5%                      | 22,3%                       | 21,3%                                                 | 34,1%                                      |
| <b>Scenario C</b> | <b>13,6%</b>               | <b>8,3%</b>                 | <b>8,6%</b>                                           | <b>21,9%</b>                               |

Dal punto di vista del migliore inserimento urbanistico, lo scenario migliore è il C. Assegnando un punteggio relativo rapportato al valore più alto tra quelli della serie per l'efficacia trasportistica, ovvero al più basso per la compatibilità urbanistica, e rapportando i due valori a 500 su una scala di 1.000 punti massimi si trova che l'alternativa migliore – ovvero in grado di coniugare l'efficienza trasportistica all'efficacia dell'inserimento urbano - è proprio quella rappresentata dallo scenario C.

Tab. 3 – Analisi delle alternative di tracciato, punteggi

|                   | <i>Efficacia<br/>trasportistica</i> | <i>Inserimento<br/>urbanistico</i> | <i>Punteggio<br/>totale</i> |
|-------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Scenario A        | 465                                 | 405                                | 869                         |
| Scenario B        | 500                                 | 110                                | 610                         |
| <b>Scenario C</b> | <b>476</b>                          | <b>500</b>                         | <b>976</b>                  |

Si segnalano in particolare, come aree di elevata difficoltà di inserimento da sviluppare eventualmente in futuro come scenario di completamento della rete: il passaggio sui lungarni, che prevederebbe una profonda ristrutturazione della circolazione viaria del centro città essendo i lungarni l'unico asse di attraversamento della città; l'anello di chiusura sulla stazione San Rossore, con una viabilità di larghezza estremamente ridotta; il regresso tra piazza Vittorio Emanuele II e piazza della Stazione, non compatibile con un esercizio snello dell'impianto, causando un perditempo superiore ai 7' per una distanza tra fabbricato Stazione e fermata di piazza Vittorio di circa 270 metri.



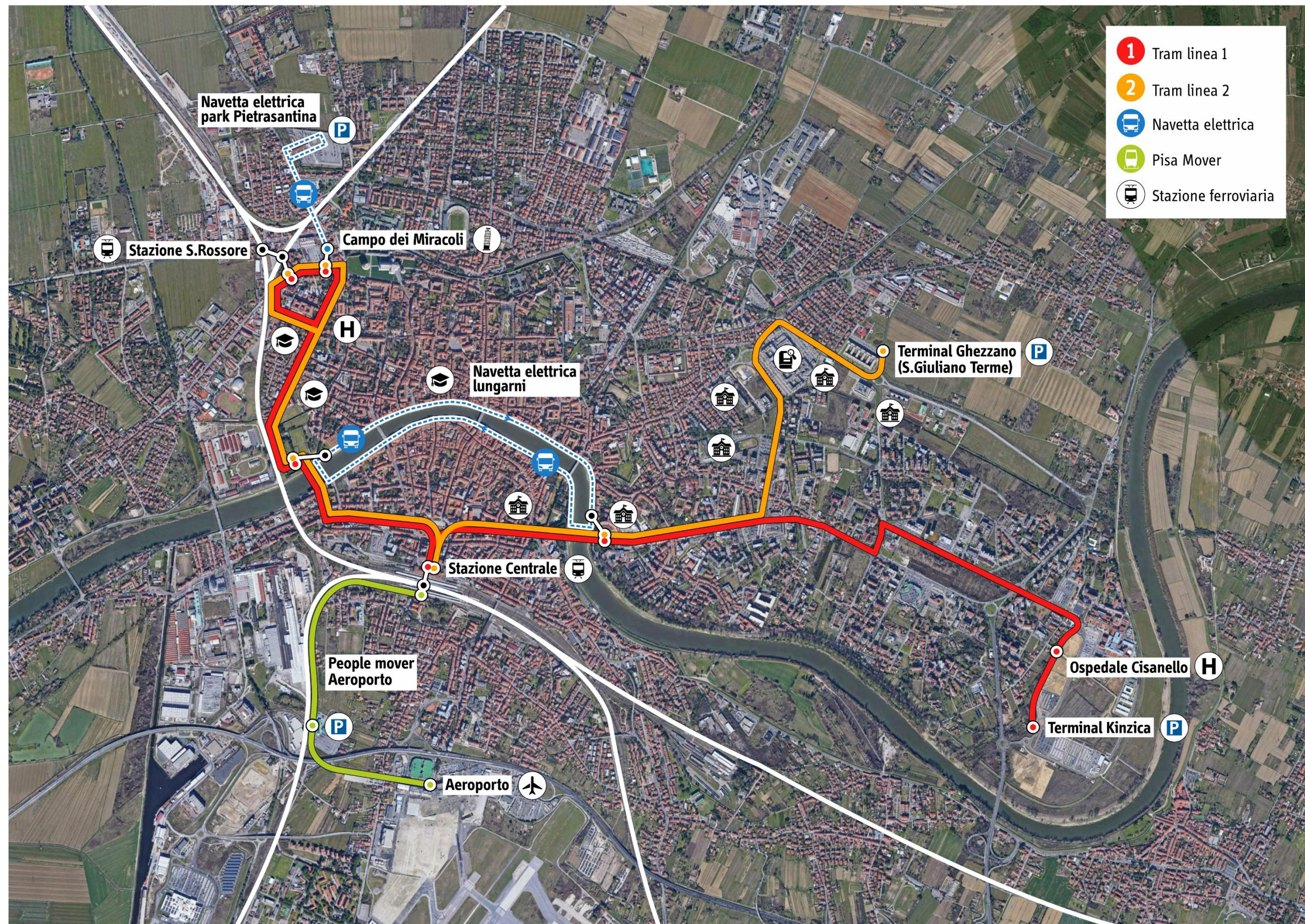


Fig. 4 – Dorsale tramviaria, alternativa A



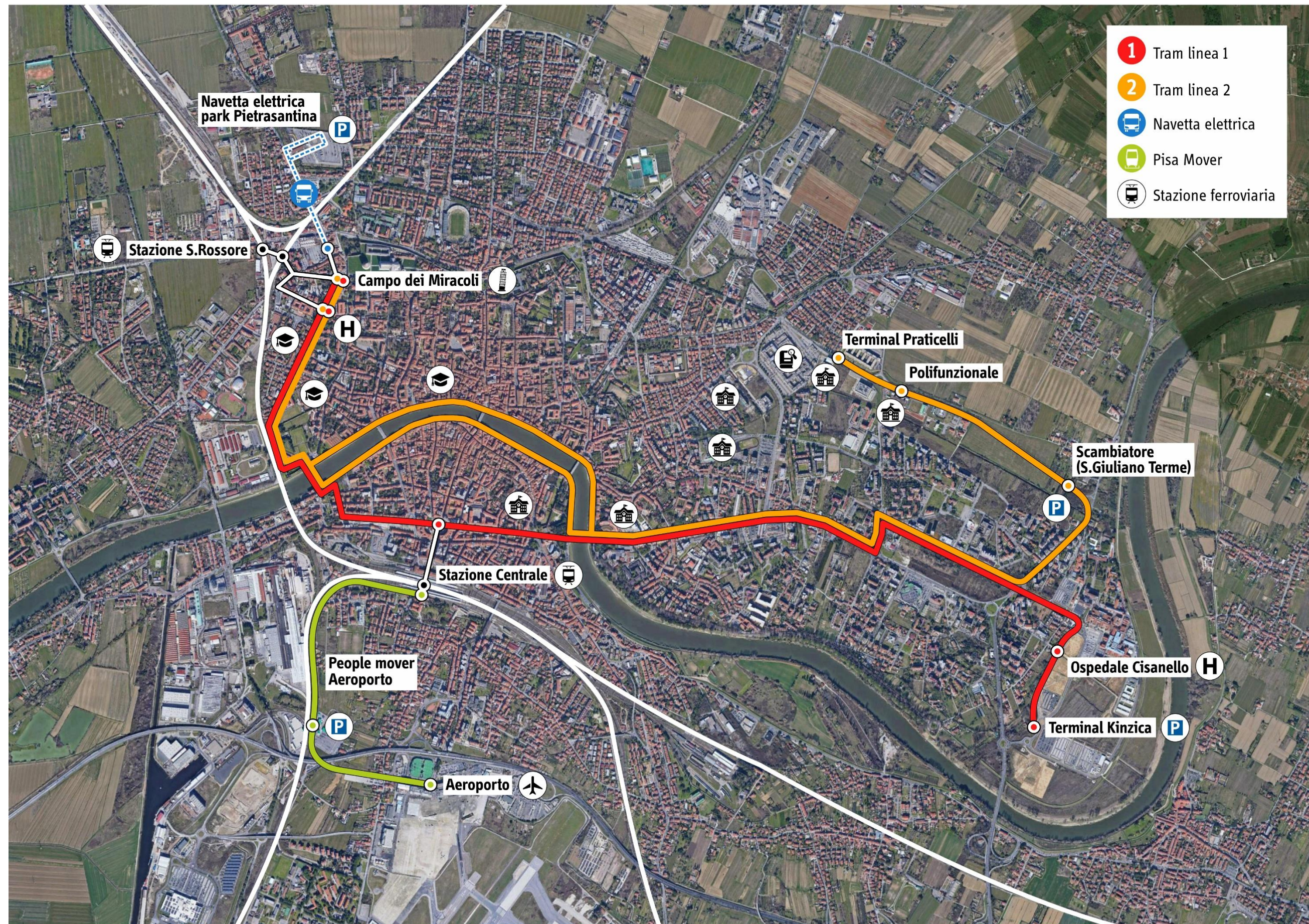


Fig. 5 – Dorsale tramviaria, alternativa A



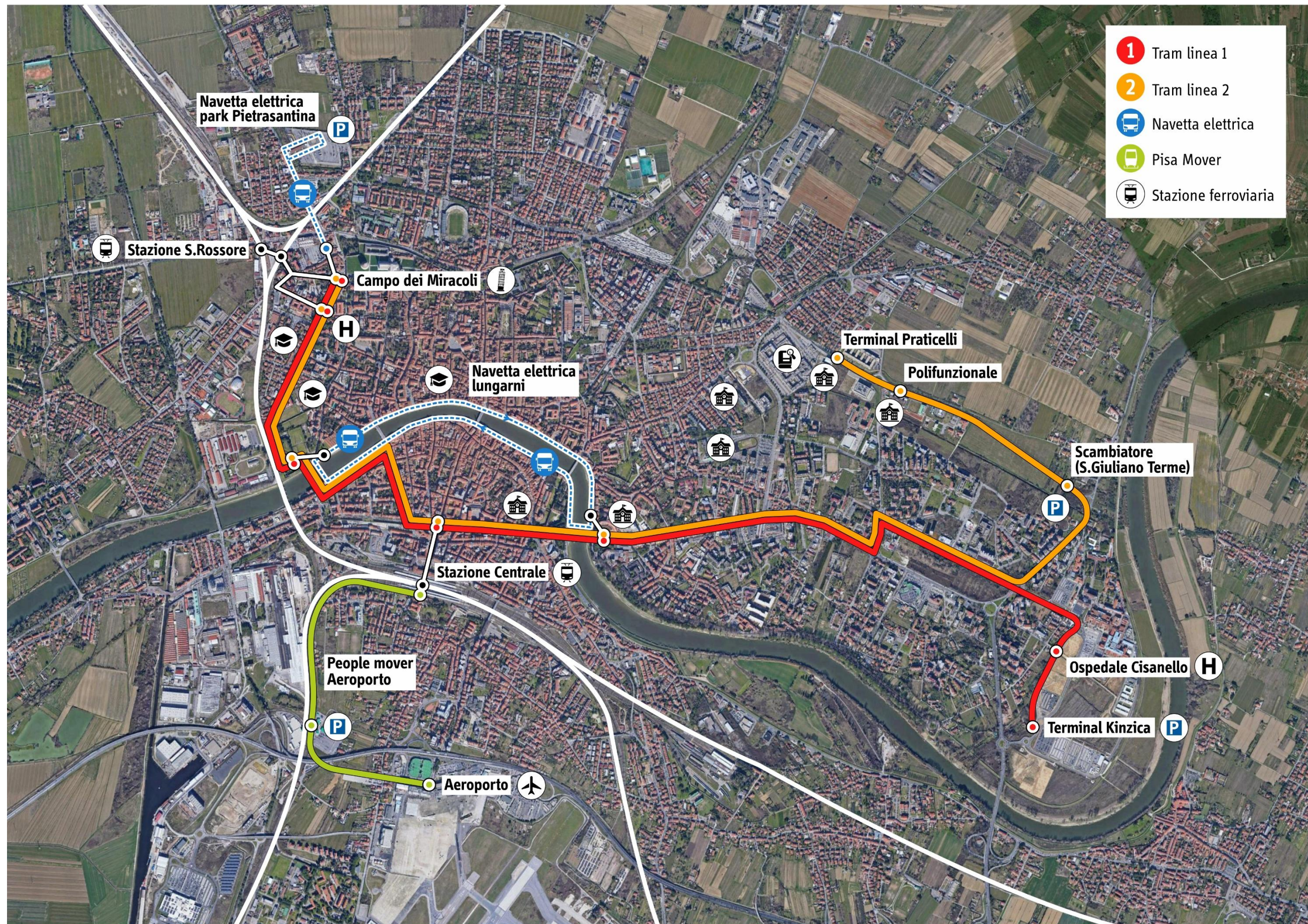


Fig. 6- Dorsale tramviaria, alternativa C



## 4.2. Definizione dello scenario di progetto

La nuova proposta progettuale prevede (figura 7) la realizzazione di un impianto tranviario di 8,43 km circa e 23 fermate per l'attivazione di due linee:

- Linea 1: Stazione S. Rossore - Stazione Centrale - Ospedale Cisanello (6,7 km);
- Linea 2: Stazione S. Rossore - Stazione Centrale – Residenze Praticelli (6,8 km).

Il bacino della rete tranviaria è costituito dai comuni di Pisa (89.117 abitanti al 1/1/24<sup>2</sup>) e San Giuliano Terme (30.749 ab.) per un totale di 119.866 abitanti. L'area di influenza del progetto tranviario è quella del Sistema Locale del Lavoro<sup>3</sup> di Pisa, che è costituita da 5 comuni (Calci, Cascina, Pisa, San Giuliano Terme, Vecchiano) per una superficie di 448,3 km<sup>2</sup> e una popolazione di 184.194 abitanti.

Il bacino di attrazione potenziale (residenti e addetti entro un raggio di 500 metri dall'infrastruttura) della tranvia così definita è:

- 34.396 abitanti pari al 29% della popolazione aggregata di Pisa e San Giuliano Terme;
- 26.271 addetti pari al 25% del numero aggregato di addetti di Pisa e San Giuliano Terme;

Il sistema tranviario è completato dalla rimodulazione della rete di superficie con due nuovi servizi di navette elettriche complementari (finanziate su altro appalto):

- Navetta dei lungarni: che percorre circolarmente l'anello dei lungarni, in senso orario, scambiano con il tram presso il Ponte della Cittadella e il Ponte della Vittoria;
- Navetta per il Park Pietrasantina: che unisce la fermata del tram della Stazione di San Rossore con il park Pietrasantina, punto di arrivo dei pullman turistici.

Le due navette integrano e completano il servizio tranviario con un'offerta cadenzata durante tutta la giornata (senza fasce di morbida) su un orario ampliato 5:30 – 23:30 con ulteriore estensione estiva e durante gli eventi di grande richiamo turistico.

---

<sup>2</sup> Si veda: <https://demo.istat.it/app/?i=POS&l=it>

<sup>3</sup> Si veda: <https://www.istat.it/it/informazioni-territoriali-e-cartografiche/sistemi-locali-del-lavoro>



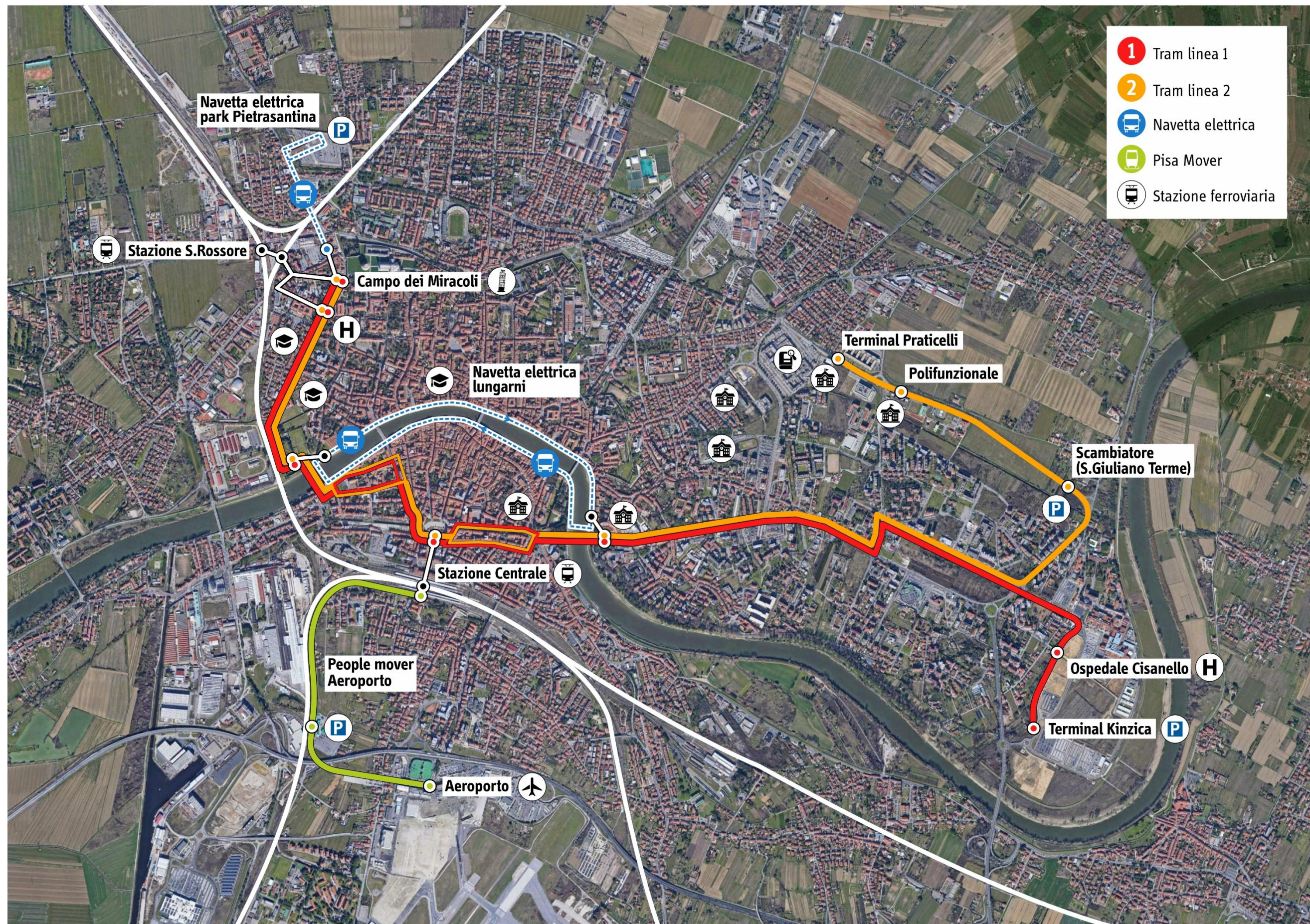


Fig. 7 - Dorsale tramviaria, scenario di progetto



## 5. Analisi delle alternative tecnologiche

### 5.1. Il sistema filobus

L'autobus con motore elettrico alimentato da un filo aereo, dopo un moderato inizio negli anni Trenta del Novecento, visse il suo periodo d'oro nell'immediato Dopoguerra, prima della drastica catena di soppressioni tra la fine degli anni Sessanta e il decennio successivo.

Filovia perché? Sebbene possa apparire strano, questo mezzo che non è tram e non è autobus, che a prima vista potrebbe sommare i difetti di entrambi, all'atto pratico si dimostrò capace di unirne in realtà i pregi: una flessibilità paragonabile all'autobus e un minor costo di infrastruttura rispetto ai binari, ma con un confort di marcia e una affidabilità, legati alla trazione elettrica, che la tecnologia degli autobus del tempo non poteva assolutamente eguagliare. A questi pregi, tenendo conto della sensibilità ecologica attuale, si aggiungono una maggiore efficienza energetica e un minore impatto acustico oltre ad un costo economico valutato sul ciclo di vita nettamente favorevole rispetto a quello degli autobus. Questo almeno fin tanto che qualcuno non trovi irrimediabilmente "sgradevoli" tutti quei fili sospesi.

Dall'ordinamento per estensione chilometrica delle reti attualmente in esercizio emerge un dato caratteristico, legato all'utilizzo del filobus in funzione della dimensione dei centri serviti, con una prevalenza nei centri di medie dimensioni. Tra le grandi città troviamo i casi di Napoli e Milano, dove le linee filoviarie operano in importanti zone semi-periferiche fungendo da supporto ad una rete fondamentale basata sul trasporto su ferro. Oppure Roma, in cui è stato introdotto di recente su una linea radiale che dall'importante nodo di Termini raggiunge il popoloso quartiere di Montesacro e la periferia nord-est. Ci sono poi Bologna e Genova, nelle quali non esiste un servizio tranviario dove il filobus svolge servizio su linee di forza. A Genova il filobus è stato reintrodotta di recente su una linea parallela alla costa che collega piazza Vittorio Veneto alla Foce e via di Francia alla stazione Brignole.

All'estremo opposto si trovano invece Chieti e Cremona: nella prima ove il servizio è da tempo sospeso nonostante il ripristino della filovia risulti già finanziato, mentre nella seconda la filovia è stata addirittura soppressa nel 2001. Le proposte di riattivazione di almeno una parte della rete cremonese non hanno avuto alcun effetto pratico, così nel 2015 è stata smantellata completamente la linea aerea.

Il gruppo di città più numeroso è quello dei centri che contano 100-200.000 abitanti (incluse Sanremo e Rimini dove le filovie servono comprensori formati da diversi comuni), caratterizzate da impianti, pur rinnovati, risalenti al dopoguerra (con la sola eccezione di La Spezia, dove dopo una peraltro breve interruzione il servizio è stato ripristinato nel 1987).

Dunque, in Italia, il filobus si presenta come il mezzo di trasporto caratteristico dei capoluoghi di medie dimensioni, nei quali svolge servizio portante, ed appare altresì utile per integrare le reti ferrotranviarie nelle metropoli, fungendo inoltre da soluzione "ponte" per quei grandi centri che si stanno dotando di infrastrutture più pesanti (tramvie, metropolitane e ferrovie suburbane) e hanno dunque necessità di collaudare procedure ed abitudini (tanto da parte delle aziende esercenti quanto da parte dell'utenza) legate alla presenza di impianti fissi. Ma se negli anni Novanta del secolo scorso il futuro del filobus in Italia appariva assai roseo, anche grazie all'effetto indotto dal piano di rilancio in atto a Napoli, che prevedeva l'immissione in servizio del più ingente parco vetture mai ordinato negli ultimi quarant'anni. Quel progetto prevedeva la filoviarizzazione di ben 4 linee portanti per un parco complessivo di 90 mezzi: ma oggi è rimasta in costruzione solo una linea.

In questo contesto altre reti storiche, con caratteristiche di domanda di tutto rispetto, vengono esercitate solo saltuariamente con mezzi filoviarie e si trascinano stancamente senza una reale prospettiva di rilancio: Sanremo, Ancona e Chieti.

Si tratta di problemi legati alla tecnologia? Lo stato di salute e gli investimenti confermati per le reti dell'Europa centrale e orientale sembrerebbero dire il contrario: Lucerna, 70 mezzi; Zurigo 80; Losanna 70; Ginevra 110; Salisburgo, 80; Solingen 50 e Lione 135 per citarne alcune. La stessa Milano ha in servizio un parco di 131 unità utilizzate tutte su linee ad alta frequenza. Si confronti però il modello di esercizio tipicamente adottato nelle reti italiane – dove non è una eccezione la sostituzione con autobus nottetempo, nelle festività e in numerose altre occasioni – con quello di Eberswalde, città del Brandeburgo, 50 km a nord-est di Berlino, con una popolazione di circa 44 mila abitanti dove i 20 filobus in esercizio circolano sempre, in qualunque condizione.

### 5.1.1. Caratteristiche tecniche

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.

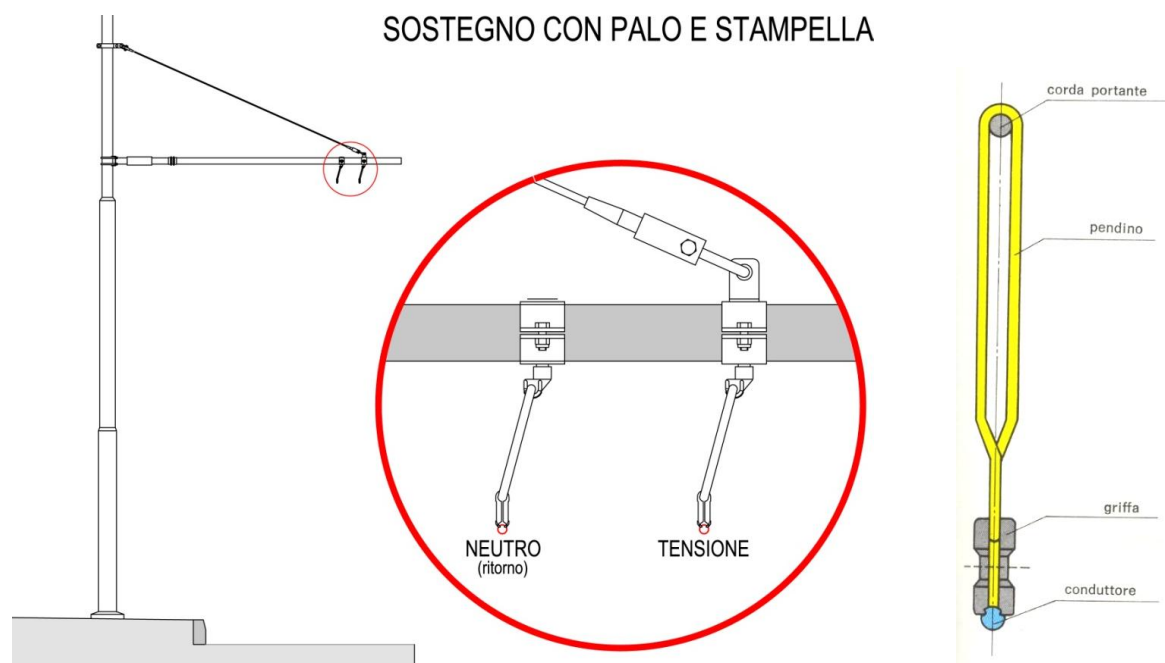


Fig. 8 - Sistema di sospensione della linea di contatto

In un sistema filoviario, i **cavi dell'alimentazione aerea** adoperano isolanti in porcellana, oppure sistemi costituiti da una stampella d'acciaio, e guide metalliche incrociate con intersezioni in bronzo. Le **deviazioni** avvengono tramite un comando azionato a solenoide, alimentato da appositi contatti eccitati dalla corrente di trazione, che permettono al conducente di condurre tranquillamente – tranquillamente, per inerzia, o, velocemente con potenza - il veicolo lungo la traiettoria da seguire.

I **cavi** ha una sezione di 80 o 107 mm<sup>2</sup>, con un interasse di 610/700 mm. Sono tenuti a una tensione costante di 600-750 Vcc.

Le **aste di captazione** sono costituite da tubi – rastremati verso l’alto, o strozzati verso il centro - d’acciaio. All’interno di ciascuna asta, scorre un conduttore di rame, la cui capacità di raccogliere la corrente è fortemente legata al tipo di pattino in carbonio che scorre lungo la linea aerea, nonché dalla flessibilità del tubo metallico che costituisce il corpo dell’asta. La pressione delle aste sulla linea di contatto viene mantenuta costante dall’azione di un meccanismo a molla, che lavora in contrasto con la forza di gravità. Il contatto delle aste sulla linea aerea può essere interrotto ritraendo le stesse manualmente, oppure grazie a un sistema a mulinello elettrico, utilizzato soprattutto in casi di emergenza.

I costruttori che operano nel campo filoviario, negli ultimi decenni, hanno apportato cambiamenti, a volte notevoli, ai loro prodotti grazie all’utilizzo di tecnologie sempre più moderne, ma nella maggior parte dei casi si è trattato solo di interventi di natura “cosmetica”. Alcuni esempi: i cavi della linea aerea di alimentazione ora utilizzano rivestimenti realizzati tramite isolanti sintetici (GRP) invece dei vecchi isolanti in porcellana; **cavi sintetici isolati** ravvicinati invece dei soliti fili d’acciaio, per eliminare del tutto gli isolanti separati.

I cavi sintetici hanno una sezione maggiore, a parità di lunghezza, rispetto ai cavi metallici, e questo comporta un’invasività maggiore dei primi rispetto ai secondi, del paesaggio in cui vengono inseriti.

Per mantenere ben tesi i conduttori di contatto, la linea aerea viene divisa in tronchi di circa 750 – 1.000 m di lunghezza e alle estremità si eseguono degli **amarri** con tenditori a contrappesi. L’amarro è un sistema relativamente grezzo, che deve semplicemente mantenere costante la tensione di trazione del filo su cui insiste, tramite dei cilindretti che fungono da contrappeso. I cavi odierni sono costituiti da un tubo di poliestere rinforzato con vetro o carbonio, che ha sostituito i vecchi cilindri d’acciaio. L’uso del poliestere rinforzato ha permesso una riduzione del peso degli stessi cavi, nonché la rimozione delle fasce isolanti – che rivestivano i fili d’acciaio superiormente e inferiormente – anche se l’effetto complessivo è stato quello di incrementare il diametro dei cavi stessi, facendoli, nella maggior parte dei casi, apparire più massicci.

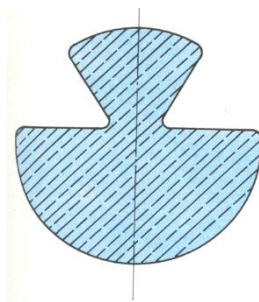


Fig. 9 – Sezione del cavo conduttore

Effettivamente la minor flessibilità dei cavi di alimentazione spesso comporta l’aggiunta di uno secondo filo di supporto per ciascun cavo, con la funzione di sospensione secondaria per la linea di contatto. E questo ha reso più complicato l’assemblaggio della linea aerea. Alla prova dei fatti i cavi di alimentazione in poliestere, vetroso o carbonato, si sono dimostrati meno flessibili, sebbene molto più leggeri, dei vecchi cavi metallici.

Il progetto di un moderno sistema filoviario si basa su concetti antichi, affrontati in un’ottica totalmente nuova. Non si tratta di progettare semplicemente una nuova linea di trasporto pubblico, ma di elaborare un progetto di trasporto urbano, che permetta di riprogettare interi brani di città.



Il tracciamento della nuova infrastruttura, il disegno della via di corsa assieme a quello dei nodi di scambio, affrontato al di là dei limiti puramente funzionali di un programma di trasporto, può contribuire a **ricostituire luoghi urbani** e addirittura crearne di nuovi.

| Denominazione palo | Diametro di base (mm) | Tiro in testa (daN) |
|--------------------|-----------------------|---------------------|
| M 28               | 219,1                 | 660                 |
| P 28               | 325                   | 660                 |
| M 29               | 273 (spessore 6,3 mm) | 801                 |
| P 29               | 380                   | 801                 |
| M 30               | 273 (spessore 8,8 mm) | 1.087               |
| P 30               | 405                   | 1.087               |

Tab. 4 - Tabella di confronto con i pali di sostegno più in uso (la denominazione è quella ferroviaria, più conosciuta) dove il prefisso M indica palo rastremato, P indica il palo poligonale: si vede chiaramente come il palo poligonale sia più impattante a parità di capacità portante



Fig. 10 - Esempio di palo su un solo lato con mensola a sbalzo da 8 metri. Castellon de la Plana (Spagna)

Nonostante il filobus sia un sistema di trasporto elettrico quindi senza emissioni nocive in loco e con un livello acustico nettamente inferiore a quello dei veicoli a trazione termica, può generare delle reazioni avverse – più o meno giustificabili – principalmente legate all’invasività della rete di alimentazione aerea. Risulta pertanto fondamentale che la progettazione sia condotta seguendo le peculiarità della trazione filoviaria: troppo spesso la pesantezza delle realizzazioni deriva dall’aver applicato norme e consuetudini proprie di altri sistemi (dal tram o addirittura dalla ferrovia).

Si comincia dai **pali di sostegno**: la sezione cilindrica rastremata (tipo ex Dalmine) ora viene prodotta con uno spessore di 12 mm. Un diametro Ø219 ha la stessa resistenza in testa superiore a quella di un palo a sezione poligonale Ø350: un palo con una radice più spessa del 40% e magari di colore nero ha un impatto nettamente diverso di un palo più snello e magari di colore chiaro.

Le nuove **mensole in fibra di vetro** sono da preferire per due motivi: perché naturalmente isolate e quindi senza necessità di inserire un isolatore all’attacco con il palo; perché sufficientemente resistenti da sostenere il bifilare di entrambe le corsie con un palo su un solo lato. Ove le dimensioni della strada

lo permettono si può realizzare un cordolo spartitraffico a bordi arrotondati e inserire un palo centrale: la mensola si sdoppia, una per lato, ma con una luce dimezzata ed un prezzo inferiore.

Per quanto riguarda le sospensioni, al tipo rigido meglio quella a delta (con luci da 28 metri), oppure il trapezio articolato con pendini che permette luci sino a 35 metri.

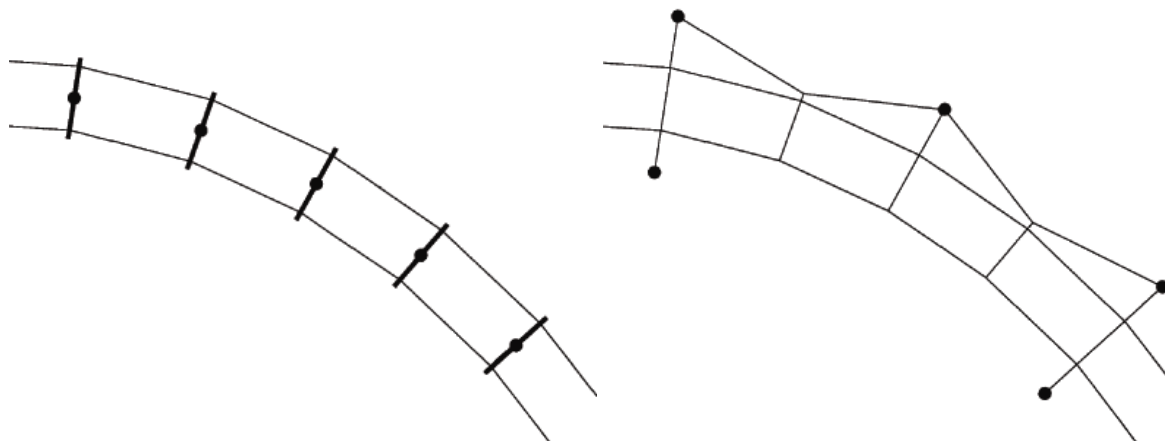


Fig. 11 - Esempio di ottimizzazione della struttura di sostegno. A sinistra sospensione con mensole di sostegno e 5 pali centrali. A destra cavi a pendolo e rompitratta sospesi: i pali sono sempre 5 ma la disposizione fa sì che l'impatto visivo sia nettamente inferiore

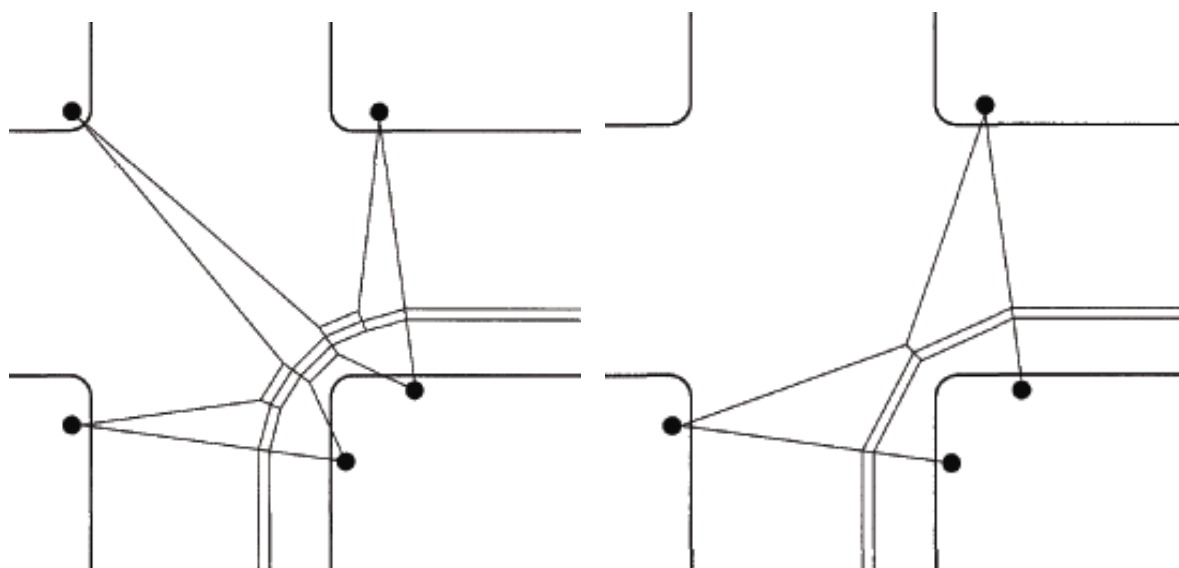


Fig. 12 - Ottimizzazione della triangolazione in una curva. A sinistra 6 traversi a 15° e 5 pali; a destra 3 traversi a 30° con un palo in meno

La **sezione dei fili di contatto** (anche ai sensi della EN 50119) può essere Ø100 mm (ad esempio Bologna o Milano) piuttosto che Ø120 mm (come nelle recenti realizzazioni di Avellino e Lecce): una maggiorazione del 20% dettata da abitudini tranviarie – dove l'unico filo di contatto ha quasi sempre sezione Ø110/120 – che comporta una maggiorazione dei costi ed una maggiore visibilità della rete aerea. Sempre a proposito dei fili di contatto il dubbio è **acciaio o fibra sintetica**? La fibra sintetica costa meno ed è di veloce montaggio mentre l'acciaio necessita di tempi più lunghi e maestranze specializzate.



Ma l'acciaio ha una maggiore resistenza specifica ed una vita media più lunga: a fronte di un risparmio economico di circa il 40%, l'acciaio ha una durata di 30 anni contro un massimo di 15 anni della fibra sintetica ed un costante decadimento delle caratteristiche prestazionali. La fibra sintetica tende, infatti, a rilassarsi piuttosto velocemente con l'insorgenza di microlesioni. Nonostante la fibra sintetica non necessiti di isolatori in giornate umide le microlesioni possono raccogliere particelle d'acqua con conseguente circolazione di microcorrenti.

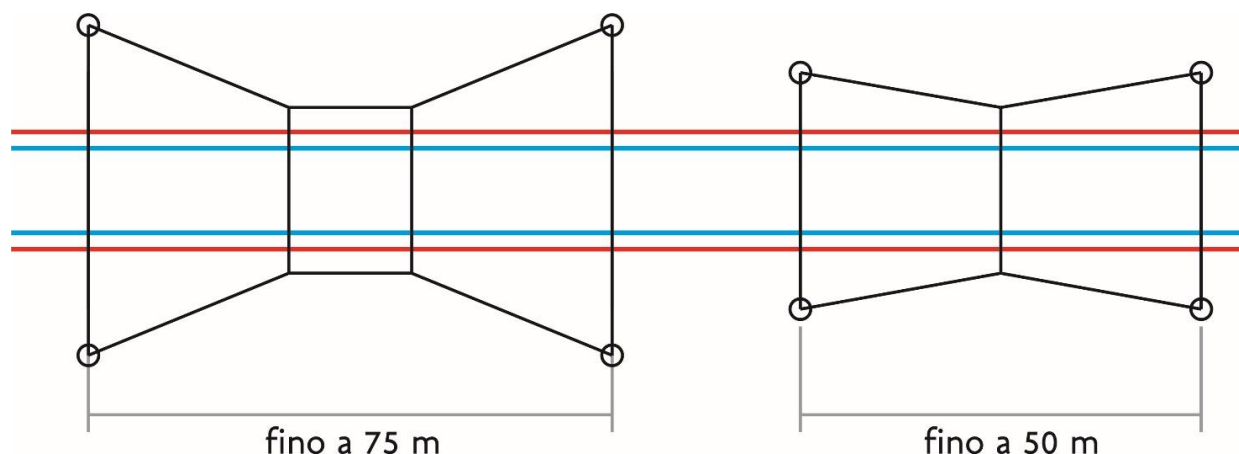


Fig. 13 - Esempio di sostegni a losanga e fili in acciaio con campate extra-lunghe

La resistenza è il fattore più importante da tenere in considerazione nella valutazione: un filo d'acciaio da 8 mm ha lo stesso carico di rottura di uno sintetico da 13 mm. Il 60% di spessore in più ed una colorazione nera lo rendono sicuramente più impattante.

| Fune in acciaio |                   | Fune in fibra sintetica |                   |
|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Diametro (mm)   | Carico di rottura | Diametro (mm)           | Carico di rottura |
| 8,0             | 3.920 daN         | 11,0                    | 2.500 daN         |
| 9,0             | 4.865 daN         | 13,5                    | 3.500 daN         |
| 10,0            | 6.030 daN         |                         |                   |

Tab. 5 - Tabella di confronto secondo il carico di rottura ai sensi della EN 50119. Si evince chiaramente che, a fronte di un costo minore ma di maggiori costi di manutenzione, la fibra sintetica (tipo Parafil o simili) ha spessori maggiori e quindi un maggior impatto visivo

In caso di diramazioni gli **scambi automatici** sono ormai da preferire rispetto a quelli tradizionali: montati a Modena nel 2012 hanno ridotto i costi di esercizio del 10% senza alcun problema di manutenzione.

### 5.1.2. Situazione filoviaria nel mondo

Dopo un picco di 523 sistemi nel 1967, oggi ci sono 298 città che hanno mantenuto o reintrodotta il trasporto filoviario. Sino al 2017, la rete più estesa del mondo era quella di Mosca: 598 km, 104 linee, 8 depositi e una flotta di 1.740 mezzi.

Le reti più estese in esercizio (tab. 1) sono quelli di Minsk (456 km; 68 linee), Kiev (249 km; 46 linee), Pechino (214 km; 27 linee), Città del Messico (203,6 km; 8 linee), Sofia (193,2 km; 9 linee). La linea più lunga del mondo è la *Krymskiy trolleybus*, che unisce la città di Simferopol a Yalta e alle spiagge del Mar Nero: realizzata nel 1959 percorre la superstrada Simferopol–Alushta per una lunghezza di 86 km.

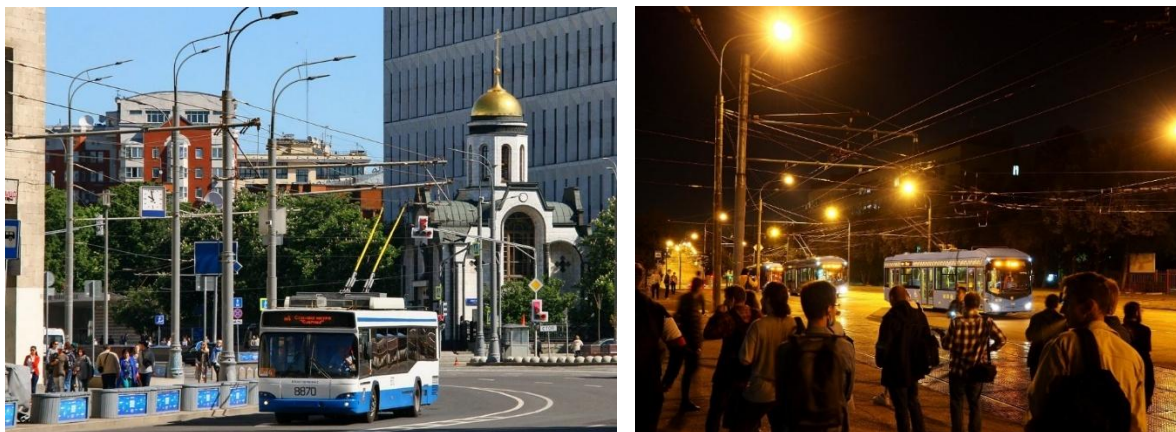


Fig. 14 – Mosca, filobus presso la stazione Oktjabrskaja (foto Bernhard Kußmagk) e, a destra, ultima corsa prima della dismissione completa il 25 agosto 2019 (foto Jiří Hönes)

La recente decisione della municipalità di Mosca, di sostituire la più grande flotta filoviaria del mondo con elettrobus si è basata su una serie di test di tre diversi modelli di elettrobus equipaggiati con batterie agli ioni di litio. Sono stati percorsi 13.000 km, parzialmente con passeggeri (25.000 in totale), che hanno dimostrato (tab. 2) un risparmio complessivo del 10% in termini di costi operativi tra elettrobus e filobus. Una decisione in controtendenza rispetto al resto del mondo dove (Parigi, Madrid e Città del Messico) gli elettrobus vanno a sostituire i mezzi a trazione termica piuttosto che l'elettrico a filo: d'altro canto considerando i costi per posto km (tab. 2, espressi in euro per milione di posti km) anche l'analisi di *Belkommunmash* conferma sostanzialmente una uguaglianza tra i costi di esercizio di filobus ed elettrobus.

Ma la valutazione di *Belkommunmash* è afflitta da un altro bias: pur accettandola nel calcolo dell'ammortamento, non considera la differenza di vita media tra i due sistemi. Interessante in questo senso la conclusione di una analisi<sup>4</sup> di *Verkehrsbetriebe Zürich* circa lo sviluppo degli elettrobus: “*il filobus resta indispensabile per Zurigo: in servizio sulle linee più frequentate con una topologia più esigente*”. Se da una parte gli elettrobus appaiono il futuro della mobilità in termini di sostituzione della trazione endotermica, la trazione a filo si dimostra ancora necessaria in termini di sostenibilità (finanziaria ed economica) per le linee portanti della rete. Tornando ancora alla analisi di Mosca, a fronte di una vita utile<sup>5</sup> di 15 per l'elettrobus e 18 anni per il filobus il costo per 1.000 posti km – in base russa – per l'elettrobus sale a 18.280 euro per milione di posti km, il 21% in più del filobus.

<sup>4</sup> Sintesi disponibile all'indirizzo [tst-suisse.ch/files/248/vbz-ebus-strategie-franz-11052017.pdf](https://tst-suisse.ch/files/248/vbz-ebus-strategie-franz-11052017.pdf)

<sup>5</sup> Durata media di vita di un veicolo al netto di interventi di manutenzione straordinaria e *revamping*.

| <b>Parametro</b> | <b>Filobus<br/>(ammortamento<br/>12 anni)</b> | <b>Elettrobus<br/>(ammortamento<br/>15 anni)</b> | <b>Differenza</b> | <b>Note</b>                                              |
|------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|
| Energia          | 10,00                                         | 8,80                                             | -12,0%            | Test condotti dall'azienda bielorusa Belkommunmash       |
| Ammortamento     | 38,90                                         | 30,50                                            | -21,6%            |                                                          |
| Infrastruttura   | 17,60                                         | 11,30                                            | -35,8%            | Infrastruttura più leggera, meno esposta alle intemperie |
| Manutenzione     | 38,60                                         | 43,90                                            | 13,7%             | Incluso il costo di sostituzione delle batterie          |
| Totale           | 105,10                                        | 94,50                                            | -10,1%            |                                                          |

Tab. 6 - Tabella di sintesi della analisi comparativa condotta dall'azienda bielorusa Belkommunmash per la municipalità di Mosca. Dati diffusi nell'aprile 2017<sup>6</sup>. Dati economici espressi in rubli per vettura km.

| <b>Parametro</b> | <b>Filobus<br/>(ammortamento<br/>12 anni)</b> | <b>Elettrobus<br/>(ammortamento<br/>15 anni)</b> | <b>Differenza</b> |
|------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------|
| Energia          | 1.442                                         | 1.418                                            | -1,6%             |
| Ammortamento     | 5.610                                         | 4.916                                            | -12,4%            |
| Infrastruttura   | 2.538                                         | 1.821                                            | -28,2%            |
| Manutenzione     | 5.567                                         | 7.076                                            | +27,1%            |
| Totale           | 15.157                                        | 15.231                                           | +0,5%             |

Tab. 7 - Dati dell'analisi di Belkommunmash per la municipalità di Mosca espressi in euro per 1 milione di posti km (cambio 1.000 RUB = 13,70 EUR). Nei modelli analizzati – tutti da 12 metri - gli elettrobus hanno un peso maggiore del filobus del 7% e una capacità inferiore di circa il 10% (a 4 passeggeri al metro quadro, 85 posti contro 95).

<sup>6</sup> Si veda <https://www.mos.ru/en/news/item/27668073/>

| Paese               | Città             | Linee | Lunghezza (km) |
|---------------------|-------------------|-------|----------------|
| 1 Bielorussia       | Minsk             | 68    | 456,4          |
| 2 Ucraina           | Kijev             | 46    | 249,0          |
| 3 Cina              | Pechino           | 27    | 214,0          |
| 4 Messico           | Città del Messico | 8     | 203,6          |
| 5 Bulgaria          | Sofia             | 9     | 193,2          |
| 6 Grecia            | Athina            | 22    | 177,6          |
| 7 Stati Uniti       | San Francisco     | 17    | 158,0          |
| 8 Cina              | Shanghai          | 13    | 124,9          |
| 9 Canada            | Vancouver         | 13    | 123,5          |
| 10 Salzburg         | Austria           | 11    | 121,0          |
| 11 Armenia          | Yerevan           | 5     | 114,5          |
| 12 Stati Uniti      | Seattle           | 15    | 109,0          |
| 13 Polonia          | Gdynia            | 12    | 96,0           |
| 14 Plzeň            | Cechia            | 9     | 86,9           |
| 15 Stati Uniti      | Boston            | 4     | 79,0           |
| 16 Bulgaria         | Pleven            | 14    | 74,2           |
| 17 Ecuador          | Quito             | 3     | 71,0           |
| 18 České Budějovice | Cechia            | 8     | 67,2           |
| 19 Stati Uniti      | Dayton            | 3     | 62,4           |
| 20 Lyon             | Francia           | 8     | 61,3           |
| 21 Lausanne         | Svizzera          | 10    | 60,7           |
| 22 Solingen         | Germania          | 6     | 56,6           |
| 23 Mongolia         | Ulaanbaatar       | 7     | 54,0           |
| 24 Brno             | Cechia            | 6     | 53,8           |
| 25 Zürich           | Svizzera          | 6     | 53,8           |
| 26 Brasile          | São Paulo         | 4     | 53,0           |
| 27 Corea del Nord   | Pyongyang         | 5     | 52,8           |
| 28 Argentina        | Córdoba           | 3     | 49,7           |
| 29 Jihlava          | Cechia            | 6     | 47,2           |
| 30 Ústí nad Labem   | Cechia            | 11    | 46,7           |
| 31 Argentina        | Mendoza           | 6     | 45,0           |
| 32 Paesi Bassi      | Arnhem            | 6     | 44,0           |
| 33 Bologna          | Italia            | 4     | 44,0           |
| 34 Turchia          | Malatya           | 3     | 43,2           |
| 35 Milano           | Italia            | 4     | 40,4           |
| 36 Polonia          | Tychy             | 6     | 40,0           |
| 37 Luzern           | Svizzera          | 7     | 37,6           |
| 38 Eberswalde       | Germania          | 3     | 37,2           |
| 39 Chomutov-Jirkov  | Cechia            | 7     | 36,1           |
| 40 Polonia          | Lublin            | 7     | 35,4           |

Tab. 8 - Prime 40 reti filoviarie attualmente in esercizio nel mondo

### 5.1.3. Stato dell'arte dei sistemi di Austria, Cechia, Francia, Germania e Svizzera

In Austria sono operativi due sistemi dei 12 attivati nel corso del Novecento. La transizione paradigmatica dal tram al filobus e quindi all'autobus non si è realizzata, essendo rimasti attivi 5 sistemi tramviari e diversi ferrovie vicinali. Esempio però la rete filoviaria di Salisburgo che assolve quasi unicamente alla funzione di servizio pubblico urbano.

| Città          | Area urbana                   |                         | Spostamenti per giorno feriale |                    |               |
|----------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------|
|                | Superficie (km <sup>2</sup> ) | Popolazione al 1/1/2017 | Spostamenti totali             | Passeggeri del TPL | Rateo del TPL |
| Linz           | 373,1                         | 381.293                 | 662.055                        | 151.300            | 23%           |
| Salzburg       | 320,1                         | 261.108                 | 430.570                        | 139.200            | 32%           |
| <b>Austria</b> | <b>693,2</b>                  | <b>642.401</b>          | <b>1.092.625</b>               | <b>290.500</b>     | <b>27%</b>    |

Tab. 9 - Austria: caratteristica delle città filoviarie. Dati per giorno feriale

| Città          | Rete del trasporto pubblico di superficie: estensione in km dell'infrastruttura |              |             |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|
|                | Bus                                                                             | Filobus      | Tram        |
| Linz           | 153,2                                                                           | 19,1         | 30,9        |
| Salzburg       | -                                                                               | 121,0        | 37,0        |
| <b>Austria</b> | <b>153,2</b>                                                                    | <b>140,1</b> | <b>67,9</b> |

| Quota sul totale |       |
|------------------|-------|
| Bus              | 42,4% |
| Filobus          | 38,8% |
| Tram             | 18,8% |

Tab. 10 - Austria: sistemi di trasporto pubblico delle città filoviarie

In Cechia i sistemi filoviari attivi sono 13 a fronte di 4 sistemi tramviari.

| Città            | Area urbana                   |                        | Spostamenti per giorno feriale |                    |               |
|------------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------|
|                  | Superficie (km <sup>2</sup> ) | Popolazione (1/1/2019) | Spostamenti totali             | Passeggeri del TPL | Rateo del TPL |
| Brno             | 335,8                         | 455.372                | 812.086                        | 520.100            | 64%           |
| České Budějovice | 95,5                          | 100.761                | 150.163                        | 124.500            | 83%           |
| Hradec Králové   | 190,2                         | 101.322                | 151.073                        | 17.900             | 12%           |
| Jihlava          | 91,6                          | 51.748                 | 73.303                         | 45.400             | 62%           |
| Mariánské Lázně  | 51,8                          | 13.684                 | 18.144                         | 4.800              | 26%           |

| Città           | Area urbana                   |                        | Spostamenti per giorno feriale |                    |               |
|-----------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------|
|                 | Superficie (km <sup>2</sup> ) | Popolazione (1/1/2017) | Spostamenti totali             | Passeggeri del TPL | Rateo del TPL |
| Opava           | 211,9                         | 79.210                 | 115.709                        | 29.200             | 25%           |
| Ostrava         | 602,6                         | 686.108                | 1.309.931                      | 142.200            | 11%           |
| Pardubice       | 149,0                         | 117.626                | 177.760                        | 21.000             | 12%           |
| Plzeň           | 264,6                         | 213.480                | 343.462                        | 230.600            | 67%           |
| Teplice         | 219,9                         | 111.095                | 167.011                        | 48.000             | 29%           |
| Ústí nad Labem  | 113,5                         | 105.452                | 157.786                        | 127.400            | 81%           |
| Zlín-Otrokovice | 244,7                         | 113.630                | 171.174                        | 102.700            | 60%           |
| <b>Cechia</b>   | <b>2.617,7</b>                | <b>2.218.383</b>       | <b>3.747.171</b>               | <b>1.437.100</b>   | <b>38%</b>    |

Tab. 11 - Cechia: caratteristica delle città filoviarie. Dati per giorno feriale

| Città            | Rete del trasporto pubblico di superficie:<br>estensione in km dell'infrastruttura |              |              |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|
|                  | Bus                                                                                | Filobus      | Tram         |
| Brno             | 153,6                                                                              | 53,8         | 70,2         |
| České Budějovice | 158,8                                                                              | 67,2         | -            |
| Hradec Králové   | 298,8                                                                              | 24,2         | -            |
| Chomutov-Jirkov  | 313,8                                                                              | 36,1         | -            |
| Jihlava          | 114,8                                                                              | 47,2         | -            |
| Mariánské Lázně  | 52,4                                                                               | 12,1         | -            |
| Opava            | 112,5                                                                              | 31,3         | -            |
| Ostrava          | 351,2                                                                              | 33,6         | 62,7         |
| Pardubice        | 114,0                                                                              | 19,6         | -            |
| Plzeň            | 471,9                                                                              | 86,9         | 23,9         |
| Teplice          | 127,0                                                                              | 21,4         | -            |
| Ústí nad Labem   | 121,3                                                                              | 46,7         | -            |
| Zlín-Otrokovice  | 53,2                                                                               | 33,5         | -            |
| <b>Cechia</b>    | <b>2.443,3</b>                                                                     | <b>513,6</b> | <b>156,8</b> |



Tab. 12 - Cechia: sistemi di trasporto pubblico delle città filoviarie

In Francia la rinascita tramviaria non ha interessato i filobus. Cinque sistemi molto eterogeni: Limoges dove il filobus assolve a sistema portante della mobilità, Lione, dove con le nuove linee C si sono realizzate delle filovie ad alto livello di servizio che integrano la rete del trasporto su ferro (metro e tram). A Nancy il filobus è stato ripristinato come tram su gomma, cioè come mezzo ibrido su gomma a guida vincolata (*Transport léger guidé* di Bombardier).

| Città          | Area urbana                   |                        | Spostamenti per giorno feriale |                    |               |
|----------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------|
|                | Superficie (km <sup>2</sup> ) | Popolazione (1/1/2019) | Spostamenti totali             | Passeggeri del TPL | Rateo del TPL |
| Limoges        | 292,2                         | 211.870                | 340.568                        | 49.300             | 14%           |
| Lyon           | 1.347,3                       | 1.783.593              | 4.147.068                      | 1.305.915          | 31%           |
| Nancy          | 325,4                         | 328.673                | 558.779                        | 84.000             | 15%           |
| Saint-Étienne  | 419,6                         | 406.617                | 712.753                        | 149.600            | 21%           |
| <b>Francia</b> | <b>2.384,5</b>                | <b>2.730.753</b>       | <b>5.759.168</b>               | <b>1.588.815</b>   | <b>28%</b>    |

Tab. 13 - Francia: caratteristica delle città filoviarie. Dati per giorno feriale

| Città          | Rete del trasporto pubblico di superficie:<br>estensione in km dell'infrastruttura |              |             |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|
|                | Bus                                                                                | Filobus      | Tram        |
| Limoges        | 64,7                                                                               | 32,5         | -           |
| Lyon           | 263,2                                                                              | 61,3         | 48,5        |
| Nancy          | 114,7                                                                              | 11,2         | -           |
| Saint-Étienne  | 132,5                                                                              | 8,4          | 23,3        |
| <b>Francia</b> | <b>575,1</b>                                                                       | <b>113,4</b> | <b>71,8</b> |

| Quota sul totale |       |
|------------------|-------|
| Bus              | 75,6% |
| Filobus          | 14,9% |
| Tram             | 9,4%  |

Tab. 14 - Francia: sistemi di trasporto pubblico delle città filoviarie

La Germania non ha mai rinunciato al tram e il filobus non ha trovato molti spazi applicativi. A fronte di 57 città con il tram solo 3 hanno conservato il filobus. Eccezione è Solingen dove, come a Salisburgo, il trasporto pubblico è svolto prevalentemente con mezzi filoviari.

| Città           | Area urbana                   |                        | Spostamenti per giorno feriale |                    |               |
|-----------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------|
|                 | Superficie (km <sup>2</sup> ) | Popolazione (1/1/2019) | Spostamenti totali             | Passeggeri del TPL | Rateo del TPL |
| Eberswalde      | 93,5                          | 36.687                 | 50.887                         | 26.600             | 52%           |
| Esslingen am N. | 101,5                         | 172.278                | 270.537                        | 29.100             | 11%           |
| Solingen        | 344,5                         | 410.052                | 719.678                        | 152.400            | 21%           |
| <b>Germania</b> | <b>539,5</b>                  | <b>619.017</b>         | <b>1.041.102</b>               | <b>208.100</b>     | <b>20%</b>    |

Tab. 15 - Germania: caratteristica delle città filoviarie. Dati per giorno feriale

| Città               | Rete del trasporto pubblico di superficie:<br>estensione in km dell'infrastruttura |              |            |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|
|                     | Bus                                                                                | Filobus      | Tram       |
| Eberswalde          | 42,0                                                                               | 37,2         | -          |
| Esslingen am Neckar | 54,3                                                                               | 15,2         | -          |
| Solingen            | 86,0                                                                               | 56,6         | -          |
| <b>Germania</b>     | <b>182,3</b>                                                                       | <b>109,0</b> | <b>0,0</b> |

| Quota sul totale |       |
|------------------|-------|
| Bus              | 62,6% |
| Filobus          | 37,4% |
| Tram             | 0,0%  |

Tab. 16 - Germania: sistemi di trasporto pubblico delle città filoviarie

Come la Cechia, anche la Svizzera ha conservato un uso diffuso del filobus in città grandi, medie e di piccole dimensioni. 12 i sistemi attualmente in esercizio.

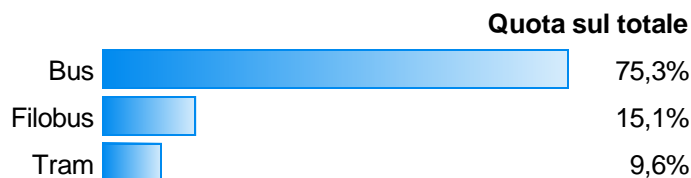
| Città        | Area urbana                   |                        | Spostamenti per giorno feriale |                    |               |
|--------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------|
|              | Superficie (km <sup>2</sup> ) | Popolazione (1/1/2019) | Spostamenti totali             | Passeggeri del TPL | Rateo del TPL |
| Bern         | 201,7                         | 264.101                | 436.138                        | 167.800            | 38%           |
| Biel         | 91,9                          | 96.711                 | 143.616                        | 50.400             | 35%           |
| Freiburg     | 62,6                          | 68.265                 | 98.591                         | 55.400             | 56%           |
| Géneve       | 533,8                         | 752.415                | 1.460.651                      | 306.000            | 21%           |
| Lausanne     | 235,4                         | 358.204                | 616.387                        | 209.400            | 34%           |
| Luzern       | 321,7                         | 276.111                | 458.587                        | 156.400            | 34%           |
| Neuchâtel    | 116,3                         | 86.947                 | 127.968                        | 78.000             | 61%           |
| Schaffhausen | 145,4                         | 67.648                 | 97.635                         | 43.500             | 45%           |



| Città            | Area urbana      |                        | Spostamenti per giorno feriale |                    |               |
|------------------|------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------|
|                  | Superficie (km²) | Popolazione (1/1/2019) | Spostamenti totali             | Passeggeri del TPL | Rateo del TPL |
| Sankt Gallen     | 338,0            | 292.968                | 490.381                        | 80.900             | 16%           |
| Vevey–Villeneuve | 93,9             | 86.442                 | 127.164                        | 27.800             | 22%           |
| Winterthur       | 139,5            | 151.447                | 234.608                        | 71.900             | 31%           |
| Zürich           | 637,2            | 1.083.951              | 2.258.657                      | 780.600            | 35%           |
| <b>Svizzera</b>  | <b>2.917,3</b>   | <b>3.585.210</b>       | <b>6.550.383</b>               | <b>2.028.100</b>   | <b>31%</b>    |

Tab. 17 - Svizzera: caratteristica delle città filoviarie. Dati per giorno feriale

| Città            | Rete del trasporto pubblico di superficie:<br>estensione in km dell'infrastruttura |              |              |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|
|                  | Bus                                                                                | Filobus      | Tram         |
| Bern             | 107,8                                                                              | 21,7         | 39,6         |
| Biel             | 229,2                                                                              | 16,3         | -            |
| Freiburg         | 51,2                                                                               | 15,1         | -            |
| Géneve           | 363,5                                                                              | 30,4         | 33,1         |
| Lausanne         | 97,5                                                                               | 60,7         | 7,8          |
| Luzern           | 264,7                                                                              | 37,6         | -            |
| Neuchâtel        | 205,7                                                                              | 27,7         | 8,8          |
| Schaffhausen     | 50,1                                                                               | 7,3          | -            |
| Sankt Gallen     | 38,5                                                                               | 22,6         | -            |
| Vevey–Villeneuve | 67,2                                                                               | 12,8         | -            |
| Winterthur       | 96,1                                                                               | 26,3         | -            |
| Zürich           | 86,8                                                                               | 53,8         | 122,6        |
| <b>Svizzera</b>  | <b>1.658,3</b>                                                                     | <b>332,2</b> | <b>212,0</b> |



Tab. 18 - Svizzera: sistemi di trasporto pubblico delle città filoviarie

In termini di passeggeri trasportati, il campione (fig. 8) è composto per il 37% dalla somma delle città svizzere, 29% da città francesi, 26% da città ceche, 5% da città tedesche e per il rimanente 4% dalle città tedesche.

La ripartizione media modale sul trasporto pubblico (fig. 9) oscilla tra il 20% del campione tedesco e il 38% di quello ceco. La media generale sul campione è del 30,5%.

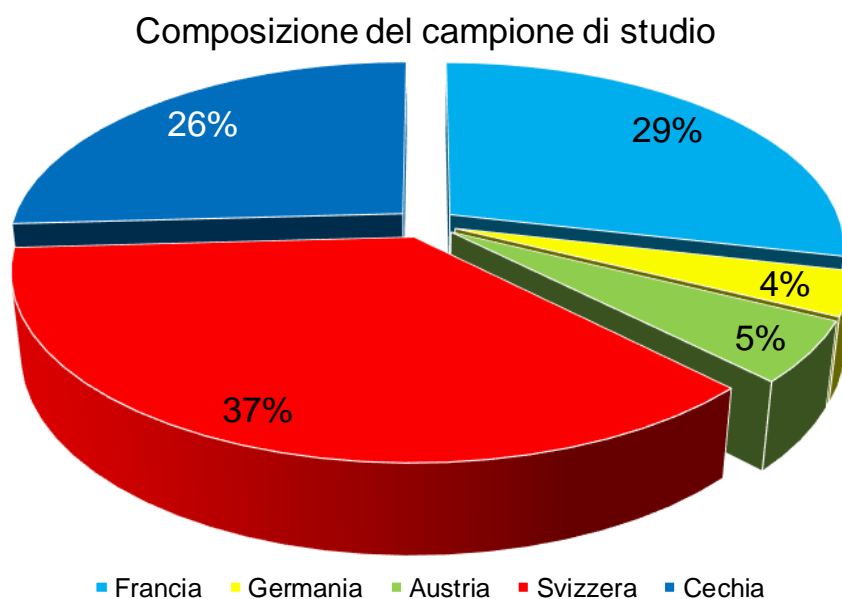


Fig. 15 - Composizione del campione di studio

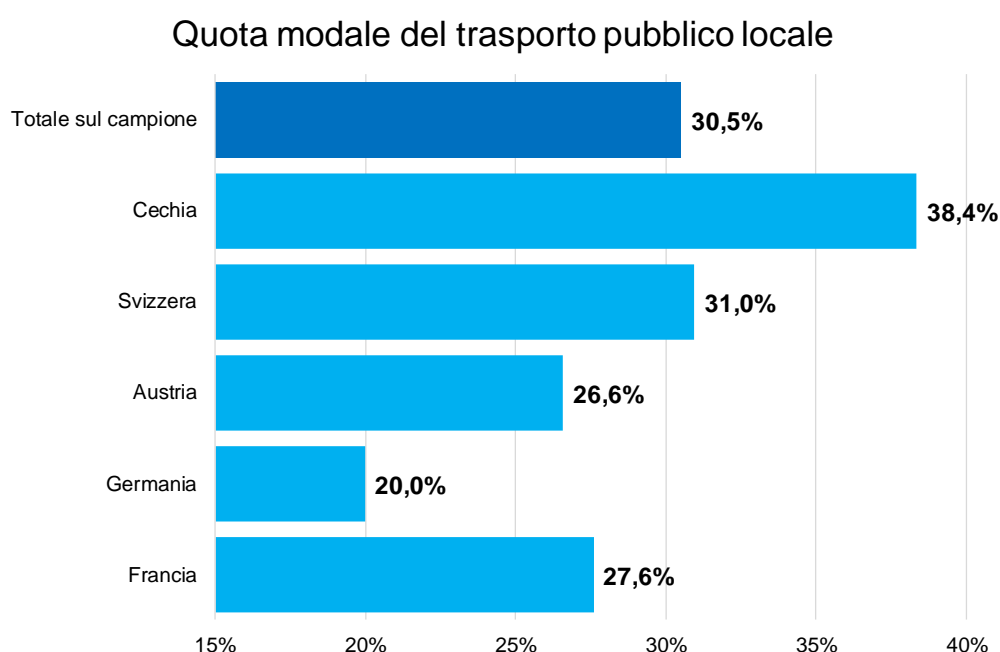


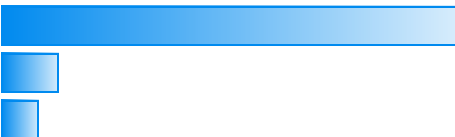


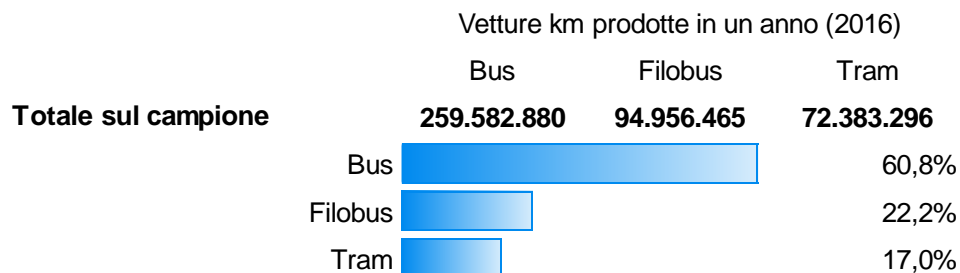
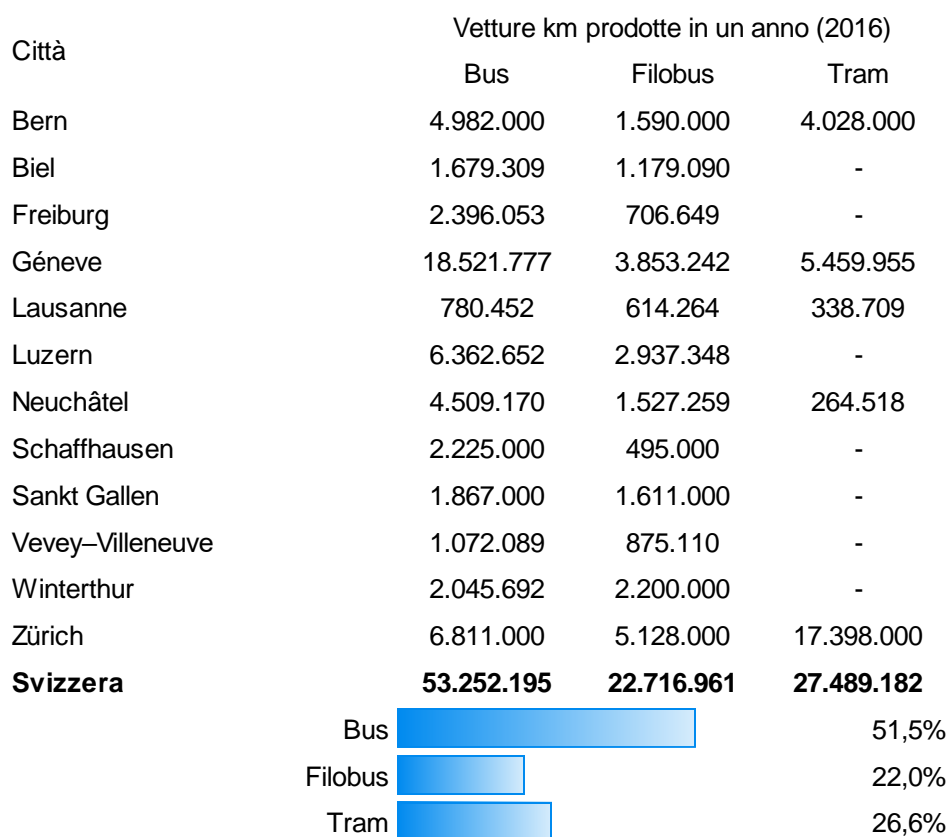
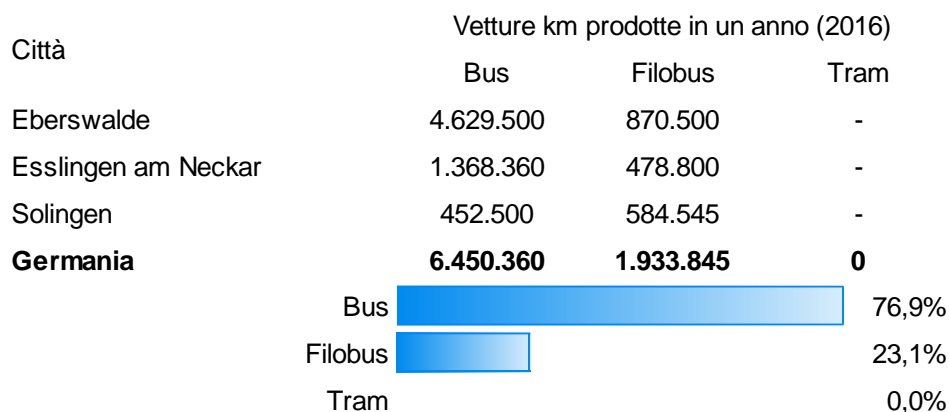
Fig. 16 - Valori medi di ripartizione modale del trasporto pubblico locale nelle città oggetto dello studio

Di seguito la produzione annuale al 2016 in termini di vetture km.

| Città          | Vetture km prodotte in un anno (2016)                                             |                  |                  |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
|                | Bus                                                                               | Filobus          | Tram             |
| Linz           | 4.087.778                                                                         | 1.533.556        | 3.279.864        |
| Salzburg       | -                                                                                 | 5.584.423        | 1.020.511        |
| <b>Austria</b> | <b>4.087.778</b>                                                                  | <b>7.117.979</b> | <b>4.300.375</b> |
| Bus            |  |                  | 26,4%            |
| Filobus        |                                                                                   |                  | 45,9%            |
| Tram           |                                                                                   |                  | 27,7%            |

| Città            | Vetture km prodotte in un anno (2016)                                                |                   |                   |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                  | Bus                                                                                  | Filobus           | Tram              |
| Brno             | 17.470.000                                                                           | 6.241.000         | 14.597.000        |
| České Budějovice | 21.363.000                                                                           | 17.258.000        | -                 |
| Hradec Králové   | 25.418.400                                                                           | 6.954.600         | -                 |
| Chomutov-Jirkov  | 4.950.000                                                                            | 765.000           | -                 |
| Jihlava          | 1.494.066                                                                            | 1.412.609         | -                 |
| Mariánské Lázně  | 163.000                                                                              | 326.000           | -                 |
| Opava            | 1.633.000                                                                            | 1.260.000         | -                 |
| Ostrava          | 16.420.000                                                                           | 3.061.000         | 13.065.000        |
| Pardubice        | 3.451.123                                                                            | 2.283.665         | -                 |
| Plzeň            | 5.347.468                                                                            | 4.477.728         | 5.458.335         |
| Teplice          | 4.377.000                                                                            | 1.330.100         | -                 |
| Ústí nad Labem   | 3.688.000                                                                            | 3.589.000         | -                 |
| Zlín-Otrokovice  | 1.667.000                                                                            | 3.122.000         | -                 |
| <b>Cechia</b>    | <b>107.442.057</b>                                                                   | <b>52.080.702</b> | <b>33.120.335</b> |
| Bus              |  |                   | 55,8%             |
| Filobus          |                                                                                      |                   | 27,0%             |
| Tram             |                                                                                      |                   | 17,2%             |

|                |                                                                                      |                   |                  |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------|
| Limoges        | 3.819.283                                                                            | 1.461.348         | -                |
| Lyon           | 72.110.394                                                                           | 3.914.220         | 5.763.080        |
| Nancy          | 3.569.257                                                                            | 5.110.840         | -                |
| Saint-Étienne  | 8.851.557                                                                            | 620.570           | 1.710.324        |
| <b>Francia</b> | <b>88.350.491</b>                                                                    | <b>11.106.978</b> | <b>7.473.404</b> |
| Bus            |  |                   | 82,6%            |
| Filobus        |                                                                                      |                   | 10,4%            |
| Tram           |                                                                                      |                   | 7,0%             |



Di seguito la composizione dei parchi rotabile per le città del campione.

| Città          | Linee     | Mezzi filoviari |            |          |            |
|----------------|-----------|-----------------|------------|----------|------------|
|                |           | 12 metri        | 18 metri   | 24 metri | Totali     |
| Linz           | 5         | 0               | 22         | 2        | 24         |
| Salzburg       | 11        | 0               | 98         | 0        | 98         |
| <b>Austria</b> | <b>16</b> | <b>0</b>        | <b>120</b> | <b>2</b> | <b>122</b> |

Tab. 19 - Parco filoviario austriaco

| Città            | Linee      | Mezzi filoviari |            |          |            |
|------------------|------------|-----------------|------------|----------|------------|
|                  |            | 12 metri        | 18 metri   | 24 metri | Totali     |
| Brno             | 6          | 96              | 53         | 0        | 149        |
| České Budějovice | 8          | 0               | 60         | 0        | 60         |
| Hradec Králové   | 5          | 18              | 13         | 0        | 31         |
| Chomutov-Jirkov  | 7          | 5               | 11         | 0        | 16         |
| Jihlava          | 6          | 29              | 0          | 0        | 29         |
| Mariánské Lázně  | 4          | 9               | 0          | 0        | 9          |
| Opava            | 11         | 33              | 0          | 0        | 33         |
| Ostrava          | 14         | 67              | 0          | 0        | 67         |
| Pardubice        | 10         | 57              | 0          | 0        | 57         |
| Plzeň            | 9          | 83              | 16         | 0        | 99         |
| Teplice          | 10         | 24              | 31         | 0        | 55         |
| Ústí nad Labem   | 11         | 0               | 72         | 0        | 72         |
| Zlín-Otrokovice  | 13         | 30              | 25         | 0        | 55         |
| <b>Cechia</b>    | <b>114</b> | <b>451</b>      | <b>281</b> | <b>0</b> | <b>732</b> |

Tab. 20 - Parco filoviario ceco

| Città          | Linee    | Mezzi filoviari |          |           |           |
|----------------|----------|-----------------|----------|-----------|-----------|
|                |          | 12 metri        | 18 metri | 24 metri  | Totali    |
| Limoges        | 5        | 27              | 4        | 0         | 31        |
| Lyon           | 8        | 68              | 55       | 0         | 123       |
| Nancy          | 1        | 0               | 0        | 25        | 25        |
| Saint-Étienne  | 1        | 11              | 0        | 0         | 11        |
| <b>Francia</b> | <b>2</b> | <b>11</b>       | <b>0</b> | <b>25</b> | <b>36</b> |

Tab. 21 - Parco filoviario francese

| Città               | Linee    | Mezzi filoviari |           |          |           |
|---------------------|----------|-----------------|-----------|----------|-----------|
|                     |          | 12 metri        | 18 metri  | 24 metri | Totali    |
| Eberswalde          | 3        | 0               | 15        | 0        | 15        |
| Esslingen am Neckar | 2        | 0               | 13        | 0        | 13        |
| Solingen            | 6        | 0               | 50        | 0        | 50        |
| <b>Germania</b>     | <b>8</b> | <b>0</b>        | <b>63</b> | <b>0</b> | <b>63</b> |

Tab. 22 - Parco filoviario tedesco

| Città            | Linee     | Mezzi filoviari |            |           |            |
|------------------|-----------|-----------------|------------|-----------|------------|
|                  |           | 12 metri        | 18 metri   | 24 metri  | Totali     |
| Bern             | 3         | 0               | 20         | 0         | 20         |
| Biel             | 2         | 0               | 20         | 0         | 20         |
| Freiburg         | 3         | 0               | 21         | 0         | 21         |
| Géneve           | 6         | 0               | 82         | 12        | 94         |
| Lausanne         | 10        | 34              | 62         | 0         | 96         |
| Luzern           | 7         | 0               | 36         | 29        | 65         |
| Neuchâtel        | 3         | 0               | 34         | 0         | 34         |
| Schaffhausen     | 1         | 0               | 7          | 0         | 7          |
| Sankt Gallen     | 4         | 0               | 17         | 8         | 25         |
| Vevey-Villeneuve | 1         | 0               | 16         | 0         | 16         |
| Winterthur       | 4         | 0               | 34         | 0         | 34         |
| Zürich           | 6         | 0               | 39         | 31        | 70         |
| <b>Svizzera</b>  | <b>50</b> | <b>34</b>       | <b>388</b> | <b>80</b> | <b>502</b> |

Tab. 23 - Parco filoviario svizzero

| Città               | Linee        | Mezzi filoviari |            |            |              |
|---------------------|--------------|-----------------|------------|------------|--------------|
|                     |              | 12 metri        | 18 metri   | 24 metri   | Totali       |
| Totale sul campione | <b>190,0</b> | <b>496</b>      | <b>852</b> | <b>107</b> | <b>1.455</b> |

Tab. 24 - Parco filoviario totale sul campione

Il parco complessivo è composto per il 34% da mezzi singoli (12 metri), per il 59% da filosnodati (18 metri) e per il 7% da bi-snodati (24 metri).

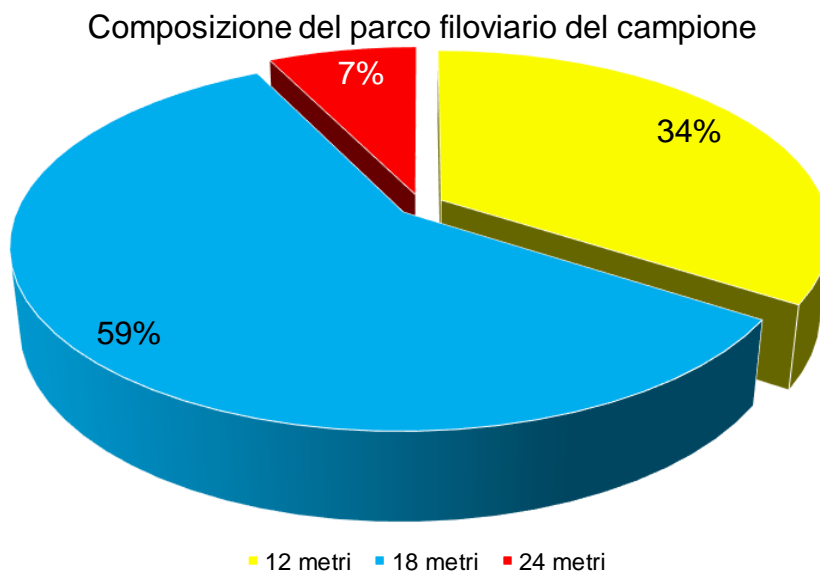


Fig. 17 - Composizione del parco rotabile del campione di studio

Di seguito si riportano i costi operativi di esercizio espressi in euro per 1.000 vetture km.

| Città          | Costo operativo lordo per 1.000 vkm |              |               |
|----------------|-------------------------------------|--------------|---------------|
|                | Bus                                 | Filobus      | Tram          |
| Linz           | 7.592                               | 12.832       | 18.688        |
| Salzburg       | -                                   | 7.200        | 15.085        |
| <b>Austria</b> | <b>7.592</b>                        | <b>8.413</b> | <b>17.833</b> |

Tab. 25 - Costi operativi lordi dei sistemi filoviari austriaci, espressi in euro per 1.000 vetture km

| Città            | Costo operativo lordo per 1.000 vkm |         |       |
|------------------|-------------------------------------|---------|-------|
|                  | Bus                                 | Filobus | Tram  |
| Brno             | 1.045                               | 4.722   | 6.245 |
| České Budějovice | 1.184                               | 4.863   | -     |
| Hradec Králové   | 923                                 | 4.819   | -     |
| Chomutov-Jirkov  | 976                                 | 4.956   | -     |
| Jihlava          | 1.035                               | 3.421   | -     |
| Mariánské Lázně  | 984                                 | 2.625   | -     |
| Opava            | 1.024                               | 3.494   | -     |

| Città | Costo operativo lordo per 1.000 vkm |  |  |
|-------|-------------------------------------|--|--|
|-------|-------------------------------------|--|--|

|                 | <b>Bus</b>   | <b>Filobus</b> | <b>Tram</b>  |
|-----------------|--------------|----------------|--------------|
| Ostrava         | 1.059        | 3.212          | 4.818        |
| Pardubice       | 910          | 3.196          | -            |
| Plzeň           | 1.474        | 3.060          | 4.070        |
| Teplice         | 1.191        | 3.574          | -            |
| Ústí nad Labem  | 1.103        | 3.888          | -            |
| Zlín-Otrokovice | 980          | 3.868          | -            |
| <b>Cechia</b>   | <b>1.066</b> | <b>4.270</b>   | <b>5.324</b> |

Tab. 26 - Costi operativi lordi dei sistemi filoviari cechi, espressi in euro per 1.000 vetture km

| <b>Città</b>   | <b>Costo operativo lordo per 1.000 vkm</b> |                |               |
|----------------|--------------------------------------------|----------------|---------------|
|                | <b>Bus</b>                                 | <b>Filobus</b> | <b>Tram</b>   |
| Limoges        | 5.236                                      | 10.535         | -             |
| Lyon           | 3.472                                      | 8.175          | 11.620        |
| Nancy          | 3.987                                      | -              | 13.660        |
| Saint-Étienne  | 4.163                                      | 8.325          | 12.210        |
| <b>Francia</b> | <b>3.638</b>                               | <b>8.766</b>   | <b>12.529</b> |

Tab. 27 - Costi operativi lordi dei sistemi filoviari francesi, espressi in euro per 1.000 vetture km

| <b>Città</b>        | <b>Costo operativo lordo per 1.000 vkm</b> |                |             |
|---------------------|--------------------------------------------|----------------|-------------|
|                     | <b>Bus</b>                                 | <b>Filobus</b> | <b>Tram</b> |
| Eberswalde          | 5.682                                      | 9.990          | -           |
| Esslingen am Neckar | 7.310                                      | 12.258         | -           |
| Solingen            | 12.184                                     | 18.476         | -           |
| <b>Germania</b>     | <b>6.483</b>                               | <b>13.116</b>  | <b>-</b>    |

Tab. 28 - Costi operativi lordi dei sistemi filoviari tedeschi, espressi in euro per 1.000 vetture km

| <b>Città</b> | <b>Costo operativo lordo per 1.000 vkm</b> |                |             |
|--------------|--------------------------------------------|----------------|-------------|
|              | <b>Bus</b>                                 | <b>Filobus</b> | <b>Tram</b> |
| Bern         | 8.924                                      | 11.899         | 18.698      |
| Biel         | 9.300                                      | 12.018         | -           |
| Freiburg     | 7.358                                      | 11.716         | -           |
| Géneve       | 12.420                                     | 16.710         | 23.063      |



| Città            | Costo operativo lordo per 1.000 vkm |               |               |
|------------------|-------------------------------------|---------------|---------------|
|                  | Bus                                 | Filobus       | Tram          |
| Lausanne         | 8.290                               | 12.714        | 19.743        |
| Luzern           | 8.157                               | 11.308        | -             |
| Neuchâtel        | 7.862                               | 11.544        | 17.192        |
| Schaffhausen     | 7.851                               | 12.492        | -             |
| Sankt Gallen     | 9.788                               | 12.889        | -             |
| Vevey-Villeneuve | 9.174                               | 12.228        | -             |
| Winterthur       | 9.304                               | 13.551        | -             |
| Zürich           | 8.487                               | 13.791        | 22.278        |
| <b>Svizzera</b>  | <b>9.840</b>                        | <b>13.320</b> | <b>21.829</b> |

Tab. 29 - Costi operativi lordi dei sistemi filoviari svizzeri, espressi in euro per 1.000 vetture km

I costi precedenti sono espressi al valore nazionale locale: per poter svolgere un confronto rispetto all'Italia è necessario individuare dei fattori di trasposizione. Tali fattori sono costruiti sui tre parametri di costo di un servizio di trasporto pubblico: costo del lavoro, materiali ed energia e carburanti.

### Ripartizione dei costi di produzione

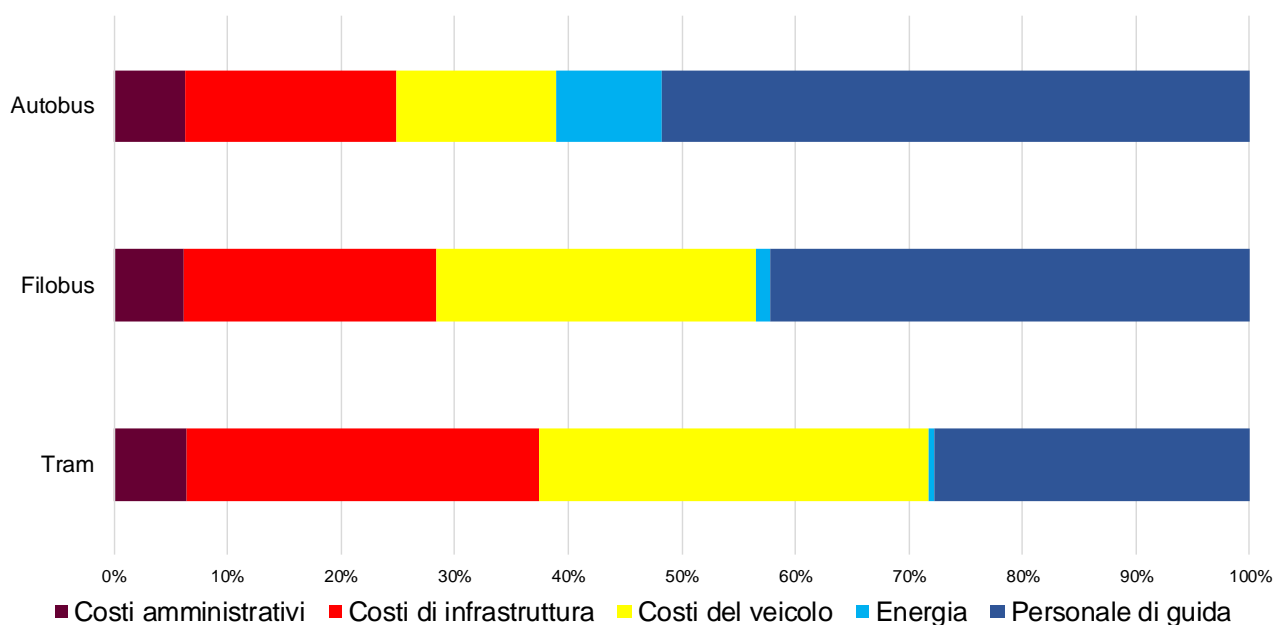


Fig. 18 - Ripartizione dei costi di produzione tra autobus, filobus e tram. Media sulle città del campione

|                      | Tram    | Filobus | Autobus |
|----------------------|---------|---------|---------|
| Lavoro               | 50,26%  | 60,73%  | 66,35%  |
| Materiali            | 49,15%  | 38,01%  | 24,36%  |
| Energia e carburante | 0,60%   | 1,26%   | 9,29%   |
|                      | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

Tab. 30 - Ripartizione tra i parametri di costo di un servizio di trasporto pubblico

Il confronto è svolto su parametri mediati dagli indicatori Eurostat<sup>7</sup>.

| Austria/Italia       | Tram    | Filobus | Autobus |
|----------------------|---------|---------|---------|
| Lavoro               | 139,41% | 139,41% | 139,41% |
| Materiali            | 152,75% | 152,75% | 152,75% |
| Energia e carburante | 161,16% | 161,16% | 77,80%  |

|                            | Tram         | Filobus      | Autobus      |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Lavoro                     | 0,701        | 0,847        | 0,925        |
| Materiali                  | 0,751        | 0,581        | 0,372        |
| Energia e carburante       | 0,010        | 0,020        | 0,072        |
| <b>Base Austria/Italia</b> | <b>1,461</b> | <b>1,448</b> | <b>1,369</b> |

Tab. 31 - Austria: fattori di trasposizione alla base di costo italiana

| Cechia/Italia        | Tram    | Filobus | Autobus |
|----------------------|---------|---------|---------|
| Lavoro               | 64,80%  | 64,80%  | 64,80%  |
| Materiali            | 50,20%  | 50,20%  | 50,20%  |
| Energia e carburante | 141,87% | 141,87% | 67,89%  |

|                           | Tram         | Filobus      | Autobus      |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Lavoro                    | 0,326        | 0,394        | 0,430        |
| Materiali                 | 0,247        | 0,191        | 0,122        |
| Energia e carburante      | 0,008        | 0,018        | 0,063        |
| <b>Base Cechia/Italia</b> | <b>0,581</b> | <b>0,602</b> | <b>0,615</b> |

Tab. 32 - Cechia: fattori di trasposizione alla base di costo italiana

| Francia/Italia       | Tram    | Filobus | Autobus |
|----------------------|---------|---------|---------|
| Lavoro               | 126,58% | 126,58% | 126,58% |
| Materiali            | 113,23% | 113,23% | 113,23% |
| Energia e carburante | 120,13% | 120,13% | 88,93%  |

<sup>7</sup> Si veda

[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Comparative\\_price\\_levels\\_of\\_consumer\\_goods\\_and\\_services](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Comparative_price_levels_of_consumer_goods_and_services)

|                            | Tram         | Filobus      | Autobus      |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Lavoro                     | 0,636        | 0,769        | 0,840        |
| Materiali                  | 0,557        | 0,430        | 0,276        |
| Energia e carburante       | 0,007        | 0,015        | 0,083        |
| <b>Base Francia/Italia</b> | <b>1,200</b> | <b>1,214</b> | <b>1,198</b> |

Tab. 33 - Francia: fattori di trasposizione alla base di costo italiana

| Germania/Italia             | Tram         | Filobus      | Autobus      |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Lavoro                      | 163,49%      | 163,49%      | 163,49%      |
| Materiali                   | 103,71%      | 103,71%      | 103,71%      |
| Energia e carburante        | 167,14%      | 167,14%      | 85,70%       |
|                             | Tram         | Filobus      | Autobus      |
| Lavoro                      | 0,822        | 0,993        | 1,085        |
| Materiali                   | 0,510        | 0,394        | 0,253        |
| Energia e carburante        | 0,010        | 0,021        | 0,080        |
| <b>Base Germania/Italia</b> | <b>1,341</b> | <b>1,408</b> | <b>1,417</b> |

Tab. 34 - Germania: fattori di trasposizione alla base di costo italiana

| Svizzera/Italia             | Tram         | Filobus      | Autobus      |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Lavoro                      | 233,49%      | 233,49%      | 233,49%      |
| Materiali                   | 177,17%      | 177,17%      | 177,17%      |
| Energia e carburante        | 135,63%      | 135,63%      | 85,72%       |
|                             | Tram         | Filobus      | Autobus      |
| Lavoro                      | 1,173        | 1,418        | 1,549        |
| Materiali                   | 0,871        | 0,673        | 0,432        |
| Energia e carburante        | 0,008        | 0,017        | 0,080        |
| <b>Base Svizzera/Italia</b> | <b>2,052</b> | <b>2,108</b> | <b>2,060</b> |

Tab. 35 - Svizzera: fattori di trasposizione alla base di costo italiana

Di seguito si riportano i costi operativi di esercizio espressi in euro per 1.000 vetture km in base economica italiana.

| Città          | Costo operativo lordo per 1.000 vkm |              |               |
|----------------|-------------------------------------|--------------|---------------|
|                | Bus                                 | Filobus      | Tram          |
| Linz           | 5.544                               | 8.864        | 12.791        |
| Salzburg       | -                                   | 4.974        | 10.325        |
| <b>Austria</b> | <b>5.544</b>                        | <b>5.812</b> | <b>12.206</b> |

Tab. 36 - Costi operativi lordi dei sistemi filoviari austriaci, espressi in euro per 1.000 vetture km in base economica italiana

| Città            | Costo operativo lordo per 1.000 vkm |              |              |
|------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|
|                  | Bus                                 | Filobus      | Tram         |
| Brno             | 1.698                               | 7.841        | 10.752       |
| České Budějovice | 1.925                               | 8.075        | -            |
| Hradec Králové   | 1.501                               | 8.003        | -            |
| Chomutov-Jirkov  | 1.586                               | 8.230        | -            |
| Jihlava          | 1.682                               | 5.682        | -            |
| Mariánské Lázně  | 1.599                               | 4.359        | -            |
| Opava            | 1.665                               | 5.803        | -            |
| Ostrava          | 1.721                               | 5.333        | 8.294        |
| Pardubice        | 1.479                               | 5.307        | -            |
| Plzeň            | 2.395                               | 5.081        | 7.008        |
| Teplice          | 1.936                               | 5.934        | -            |
| Ústí nad Labem   | 1.793                               | 6.456        | -            |
| Zlín-Otrokovice  | 1.592                               | 6.423        | -            |
| <b>Cechia</b>    | <b>1.733</b>                        | <b>7.091</b> | <b>9.165</b> |

Tab. 37 - Costi operativi lordi dei sistemi filoviari cechi, espressi in euro per 1.000 vetture km in base economica italiana

| Città          | Costo operativo lordo per 1.000 vkm |              |               |
|----------------|-------------------------------------|--------------|---------------|
|                | Bus                                 | Filobus      | Tram          |
| Limoges        | 4.370                               | 8.676        | -             |
| Lyon           | 2.898                               | 6.733        | 9.685         |
| Nancy          | 3.327                               | -            | 11.385        |
| Saint-Étienne  | 3.474                               | 6.856        | 10.177        |
| <b>Francia</b> | <b>3.036</b>                        | <b>7.219</b> | <b>10.442</b> |

Tab. 38 - Costi operativi lordi dei sistemi filoviari francesi, espressi in euro per 1.000 vetture km in base economica italiana

| Città               | Costo operativo lordo per 1.000 vkm |              |          |
|---------------------|-------------------------------------|--------------|----------|
|                     | Bus                                 | Filobus      | Tram     |
| Eberswalde          | 4.010                               | 7.094        | -        |
| Esslingen am Neckar | 5.159                               | 8.705        | -        |
| Solingen            | 8.598                               | 13.121       | -        |
| <b>Germania</b>     | <b>4.575</b>                        | <b>9.315</b> | <b>-</b> |

Tab. 39 - Costi operativi lordi dei sistemi filoviari tedeschi, espressi in euro per 1.000 vetture km in base economica italiana

| Città            | Costo operativo lordo per 1.000 vkm |              |               |
|------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|
|                  | Bus                                 | Filobus      | Tram          |
| Bern             | 4.331                               | 5.643        | 9.111         |
| Biel             | 4.514                               | 5.700        | -             |
| Freiburg         | 3.571                               | 5.557        | -             |
| Géneve           | 6.028                               | 7.925        | 11.238        |
| Lausanne         | 4.023                               | 6.030        | 9.620         |
| Luzern           | 3.959                               | 5.363        | -             |
| Neuchâtel        | 3.816                               | 5.475        | 8.377         |
| Schaffhausen     | 3.810                               | 5.925        | -             |
| Sankt Gallen     | 4.750                               | 6.113        | -             |
| Vevey-Villeneuve | 4.452                               | 5.799        | -             |
| Winterthur       | 4.516                               | 6.427        | -             |
| Zürich           | 4.119                               | 6.541        | 10.855        |
| <b>Svizzera</b>  | <b>4.776</b>                        | <b>6.317</b> | <b>10.637</b> |

Tab. 40 - Costi operativi lordi dei sistemi filoviari svizzeri, espressi in euro per 1.000 vetture km in base economica italiana

Nei grafici seguenti si mette a confronto il costo operativo filoviario con la dimensione media del veicolo e con l'ampiezza del parco rotabile (dimensione media del veicolo in termini di posti medi per il numero di mezzi in servizio). Si vede quanto a incidere sui costi operativi non sia tanto l'ampiezza del parco rotabile e le relative economie di sistema (Fig. 19) ma la capacità dei veicoli (Fig. 22). In particolare, la relazione non è tanto evidente nei sistemi composti in prevalenza da mezzi semplici (12 metri, come nel caso ceco, Fig. 23) quanto tale relazione diventa esplicita nei sistemi nei quali sono prevalenti i mezzi snodati e aumenta con i mezzi bi-snodati (come nel caso svizzero, Fig. 24, dove i mezzi da 24 metri sono in servizio sia a Lucerna che a Zurigo).

Tale fattore è legato non tanto al fabbisogno energetico (Fig. 25, che rappresenta invece la principale voce di risparmio rispetto alla trazione endotermica) quanto all'aumento di efficacia rispetto alla spesa del costo per il personale in termini di posti unitari disponibili.

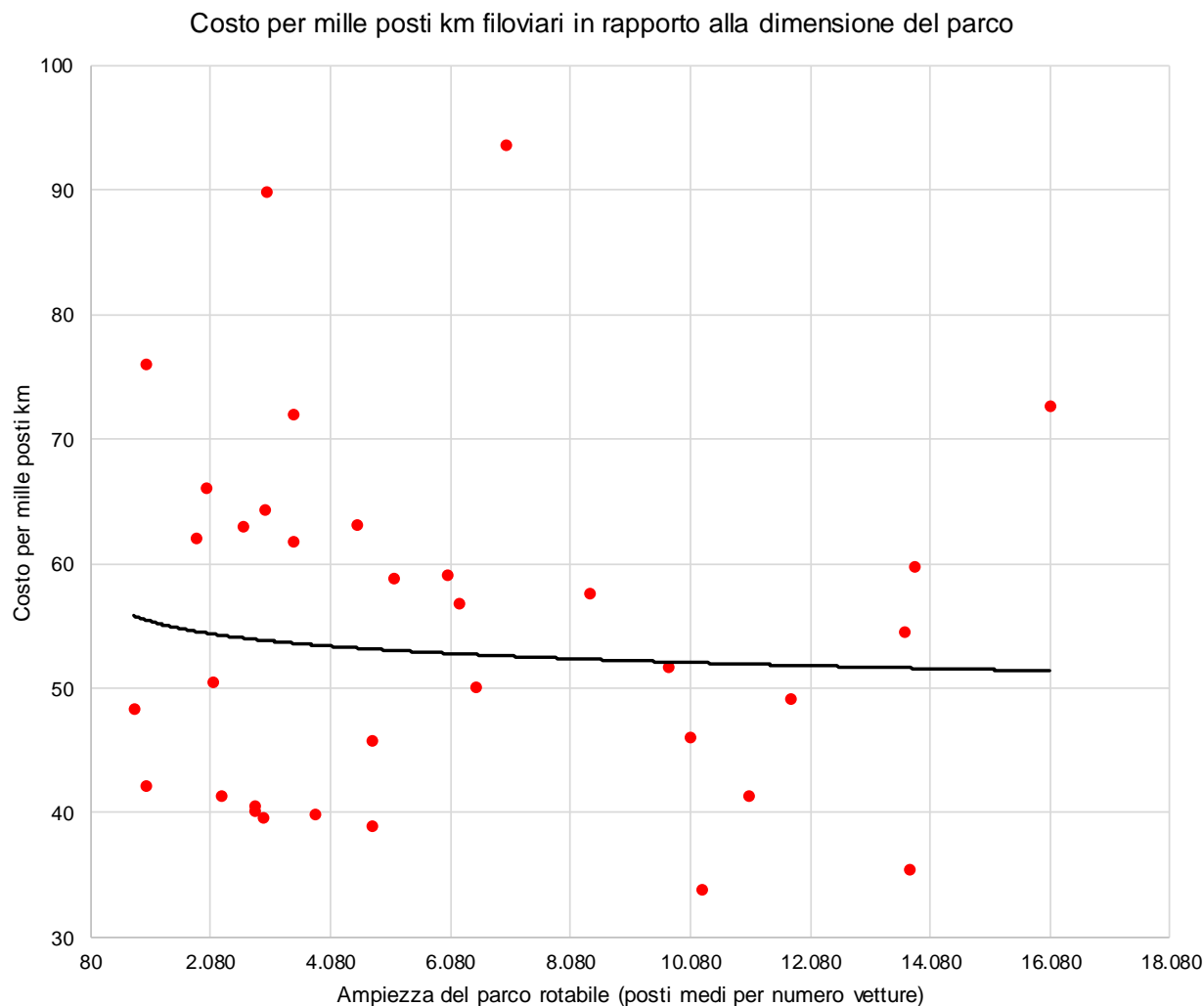


Fig. 19 - Costo per mille posti km filoviari in rapporto alla dimensione del parco rotabile. Analisi sull'intero campione analizzato (34 città)

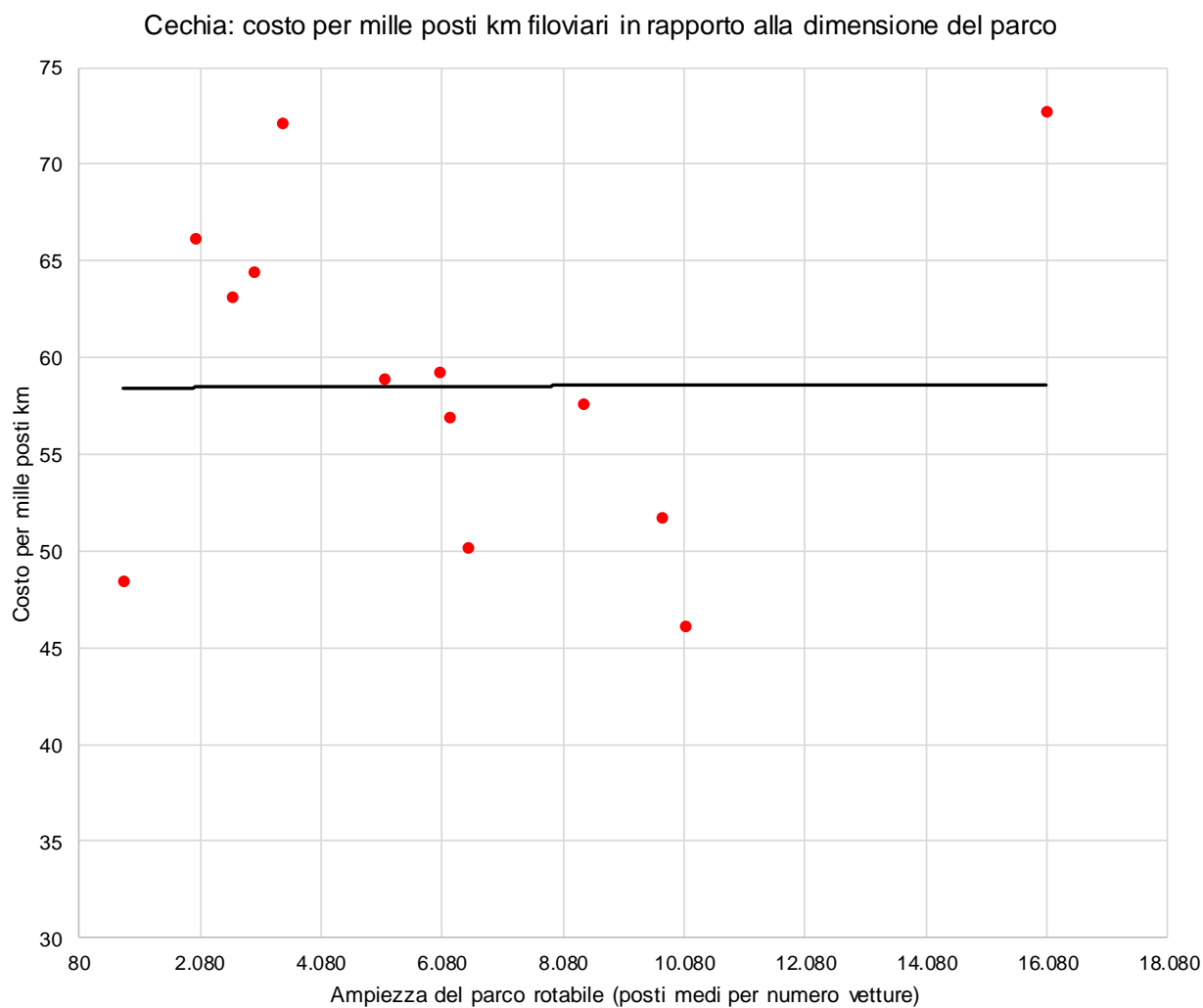


Fig. 20 - Costo per mille posti km filoviari in rapporto alla dimensione del parco rotabile. Analisi per i sistemi cechi

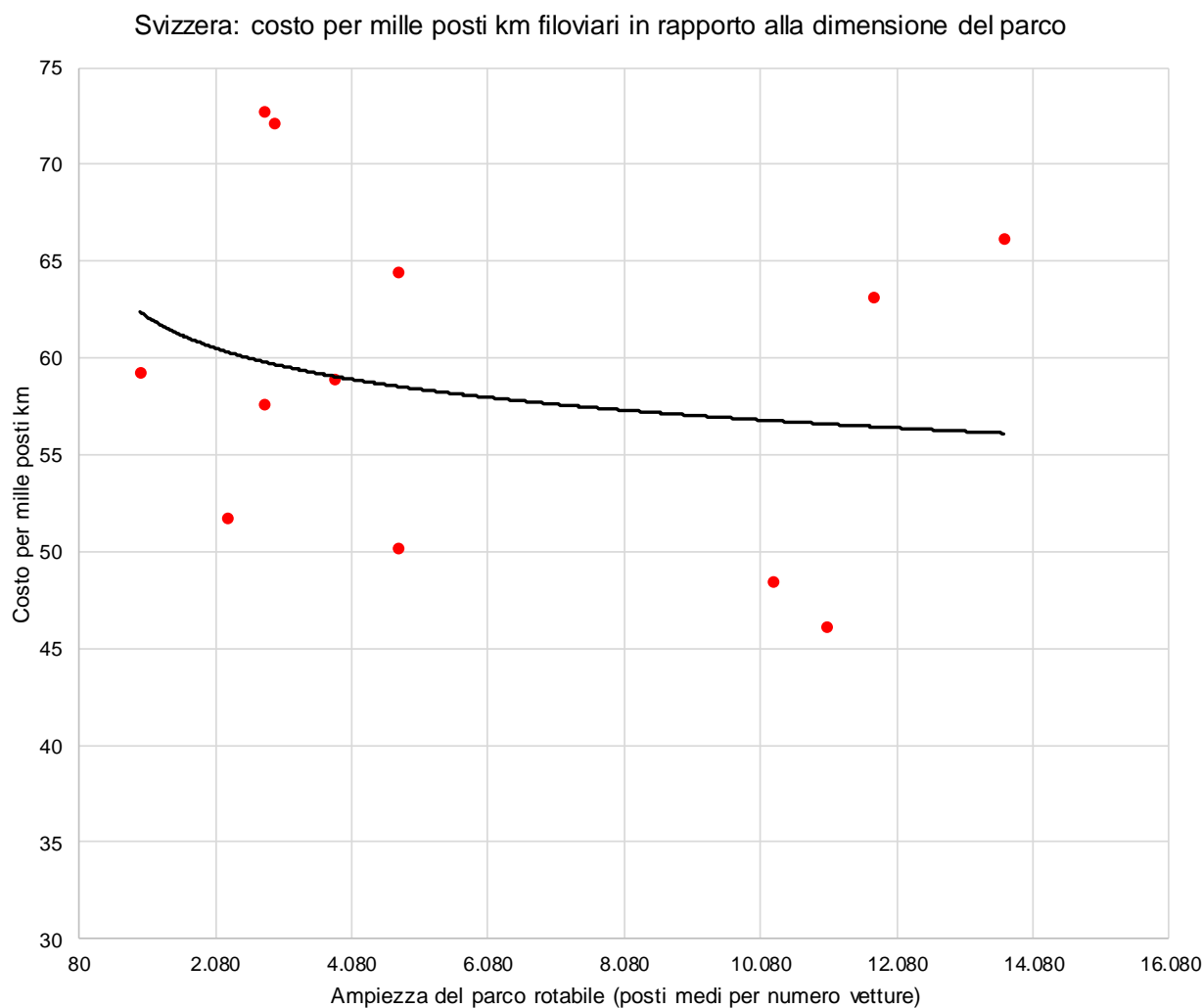


Fig. 21 - Costo per mille posti km filoviari in rapporto alla dimensione del parco rotabile. Analisi per i sistemi svizzeri



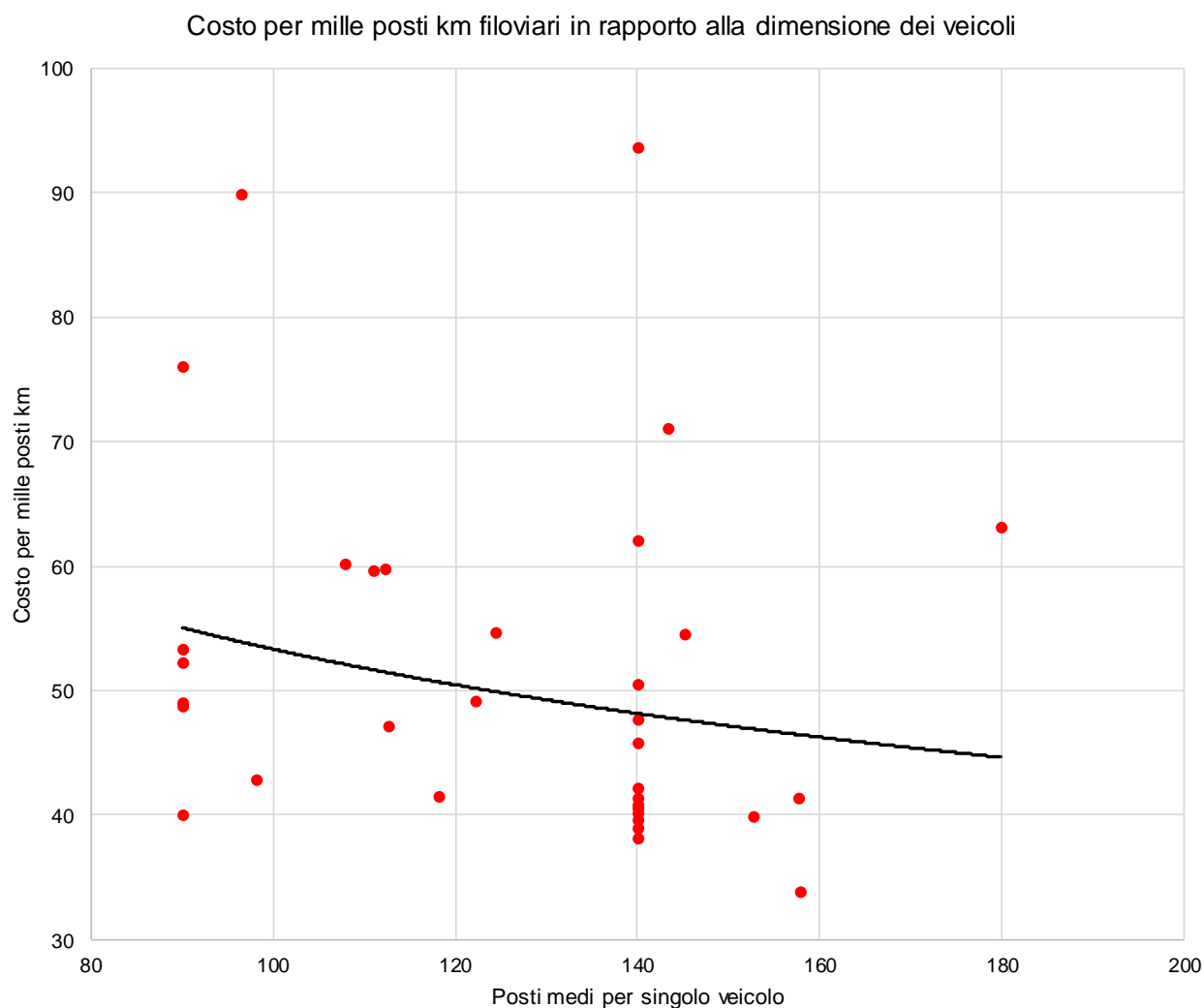


Fig. 22 - Costo per mille posti km filoviari in rapporto alla dimensione media dei veicoli in esercizio. Analisi sull'intero campione analizzato (34 città)

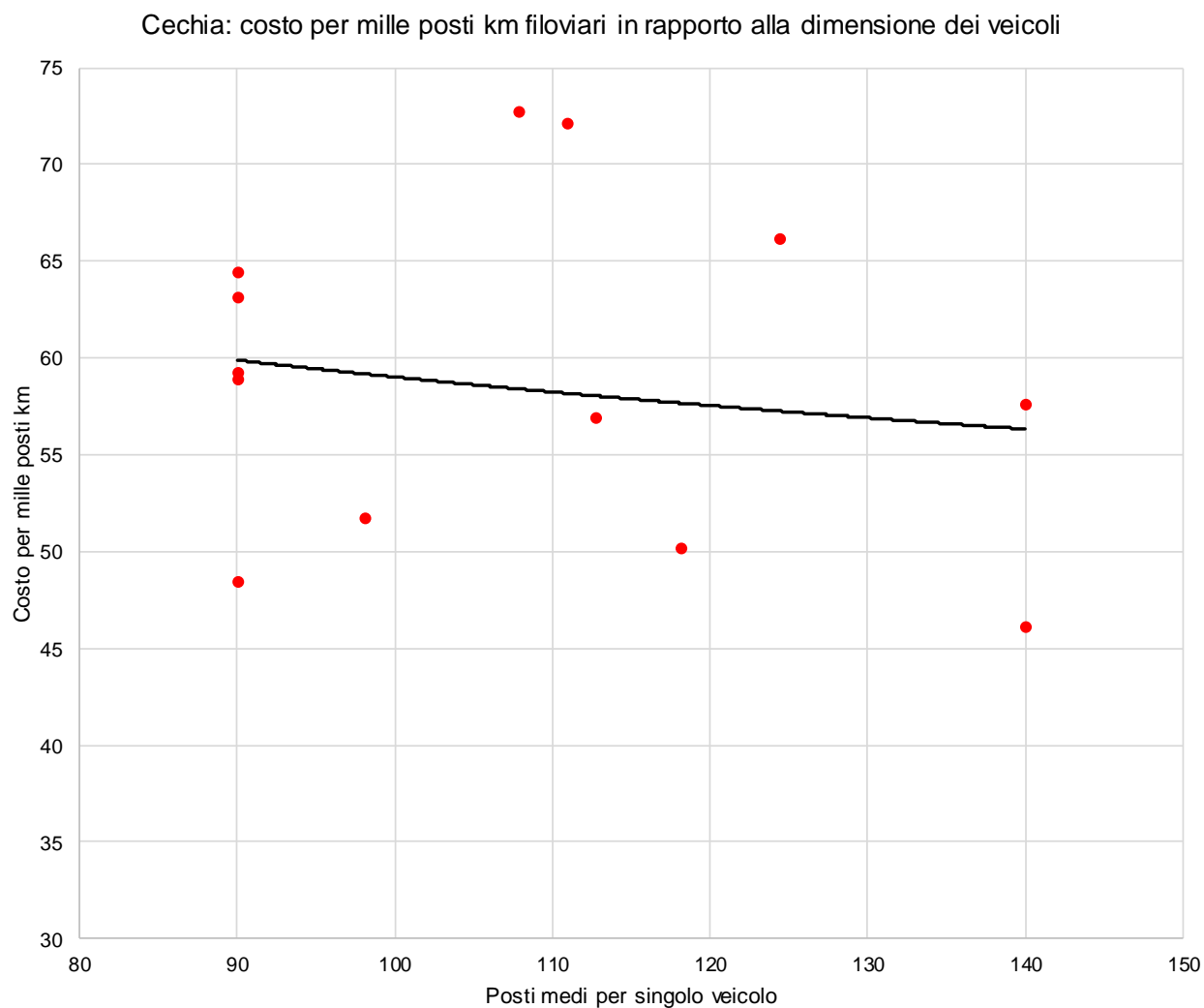


Fig. 23 - Costo per mille posti km filoviari in rapporto alla dimensione media dei veicoli in esercizio. Analisi per i sistemi cechi

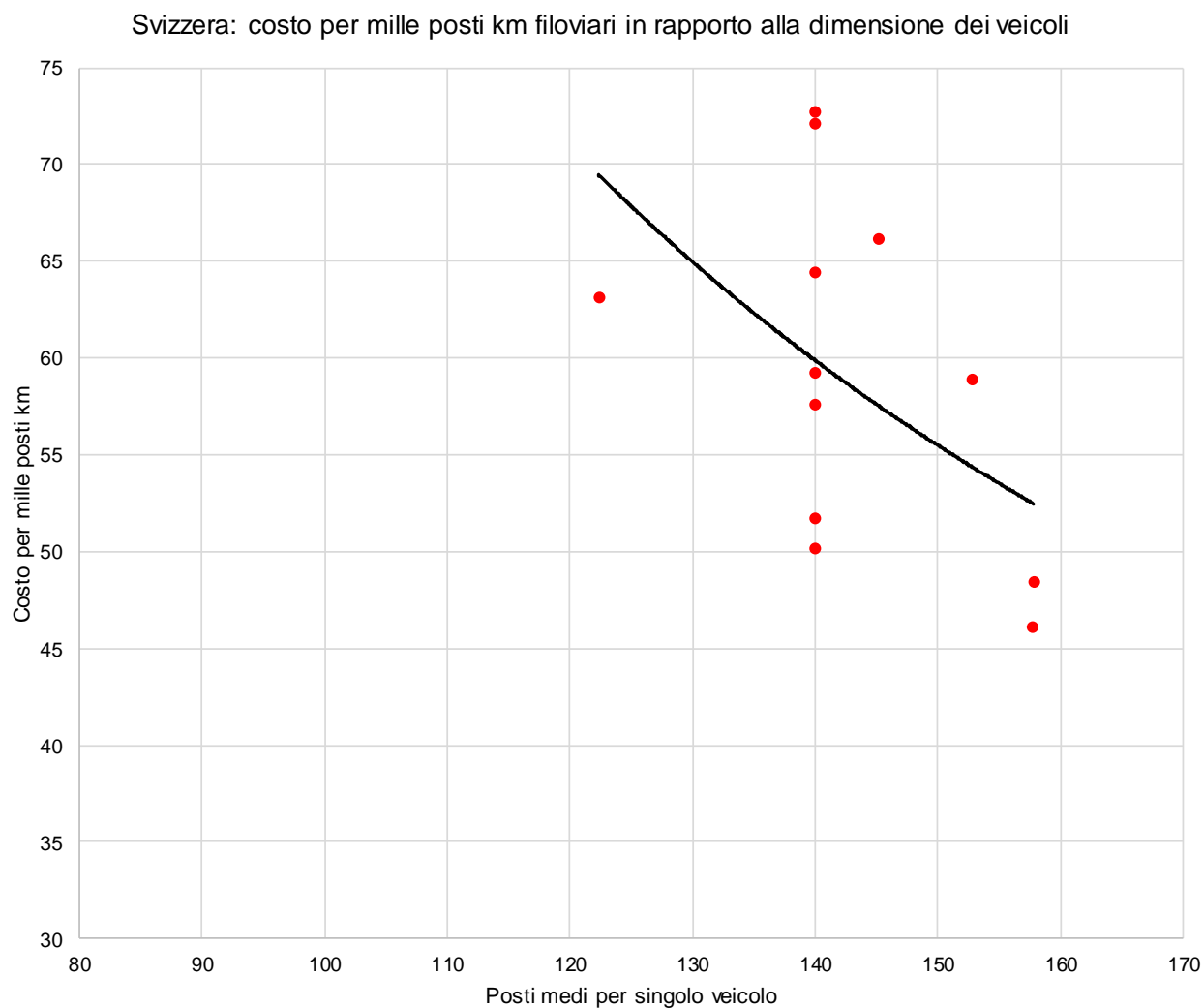


Fig. 24 - Costo per mille posti km filoviari in rapporto alla dimensione media dei veicoli in esercizio. Analisi per i sistemi svizzeri

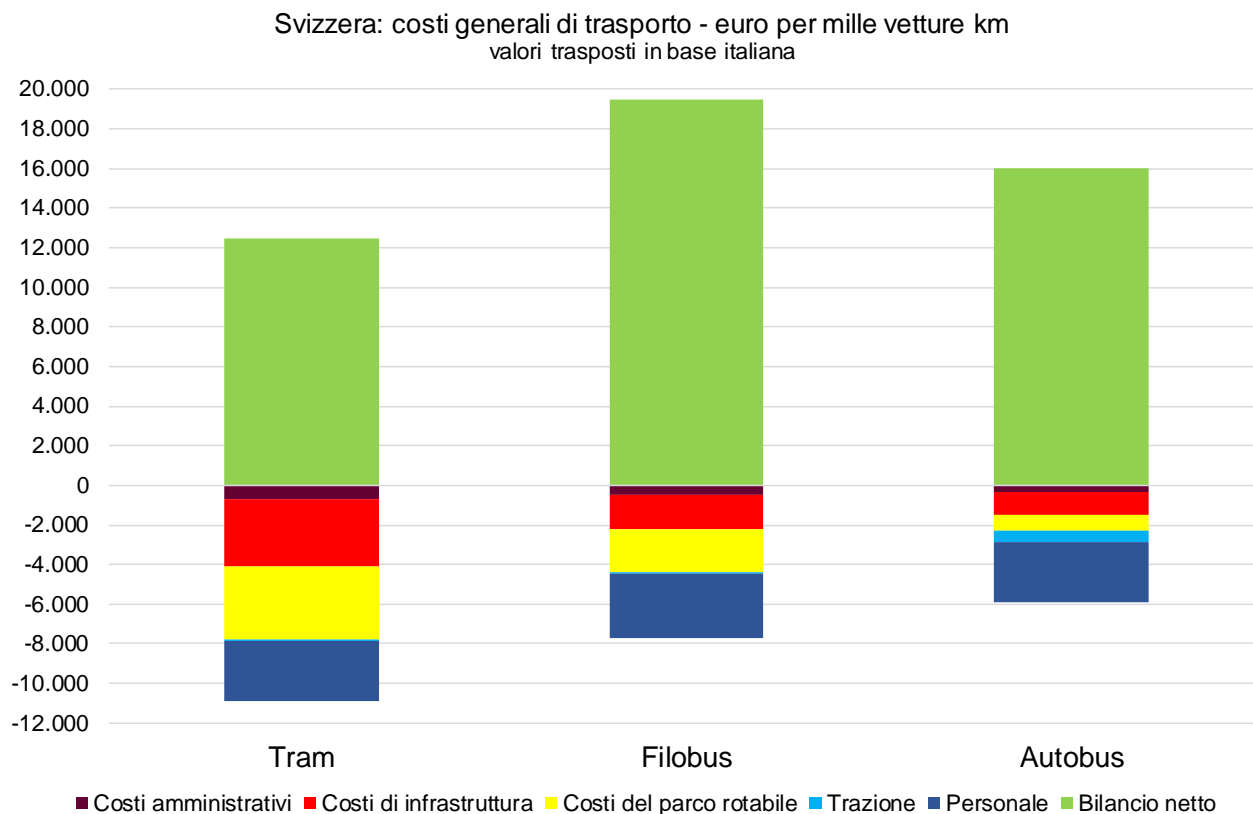


Fig. 25 - Svizzera: costi generali di trasporto - euro per mille vetture km. Valori trasposti in base italiana

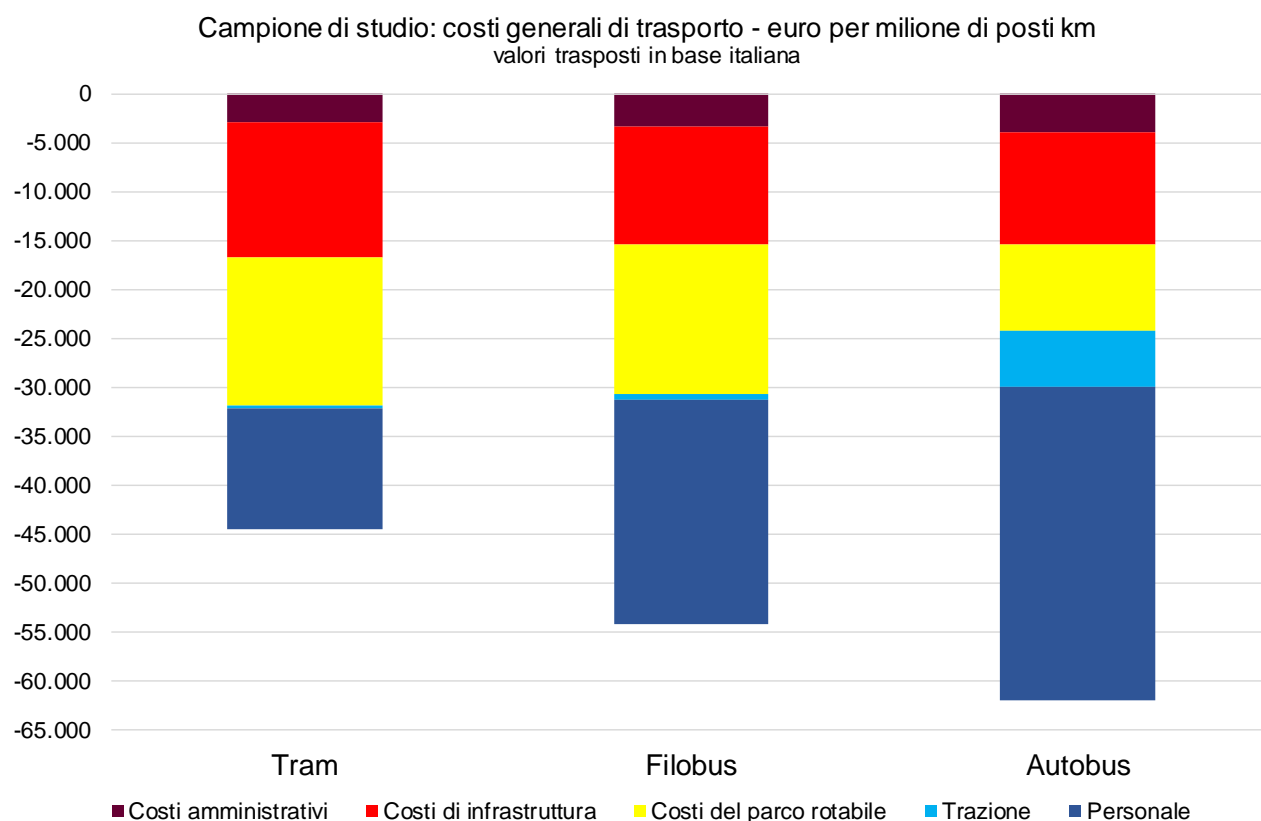


Fig. 26 - Media sul campione: costi in euro per milione di posti km offerti

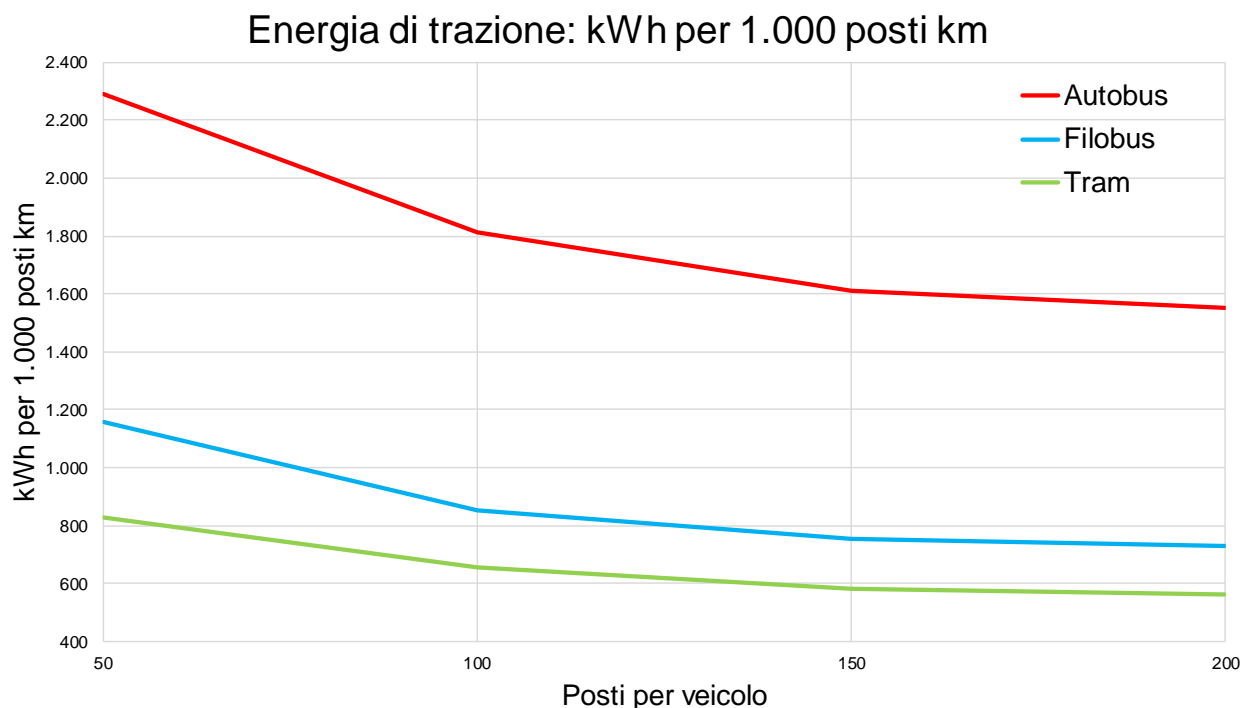


Fig. 27 - Valori mediati sul campione. Confronto del fabbisogno di energia per la trazione tra autobus a motore endotermico e filobus di diversa dimensione

L'analisi condotta sui Paesi dell'Europa centrale mostra che l'efficacia nell'esercizio filoviario si raggiunge più che nell'ampiezza del parco rotabile in sé, nell'adozione di mezzi con maggiore capacità. Il filobus (inteso con alimentazione a bifilare) mostra migliori performance quando:

- in città di medie dimensioni è adottato come sistema portante sulle direttrici a maggiore domanda e comunque compresa almeno tra 5.000 e 10.000 passeggeri per giorno feriale;
- nelle grandi città è adottato come sistema complementare di adduzione alla rete portante su ferro (metropolitane, ferrovie suburbane o tramvie).

Il costo unitario di produzione per posto km filoviario tende ad essere più conveniente degli altri mezzi su gomma a trazione endotermica oppure elettrici a batterie quando aumentano le ore di servizio annuali. Paradigmatico che la rete di Salisburgo, dove la rete filoviaria assolve quasi completamente al trasporto pubblico locale incluso il servizio notturno, il costo di produzione sia considerevolmente più basso di tutte le altre città esaminate: 4.947 euro per 1.000 vetture km contro una media del campione di 7.091 euro.

Per contro l'omologo sistema di Solingen ha un costo di 13.121 euro per 1.000 vetture km: su questo valore pesano però differenti condizioni contrattuali per il personale di guida. Condizioni che portano il costo di produzione degli autobus da una media di 3.933 euro per 1.000 vetture km a 8.598 euro.



Fig. 28 – Per gli impianti fissi vale la legge dell’offerta: maggiore è la capacità (in termini di vetture impegnate e di posti offerti) e minore sarà il costo unitario di servizio. Lucerna (nella foto un bisnodato da 24 metri), nonostante le modeste dimensioni (276 mila abitanti nell’area vasta) presenta il costo di esercizio filoviario più basso della Svizzera: 5.363 euro per milione di vetture km.

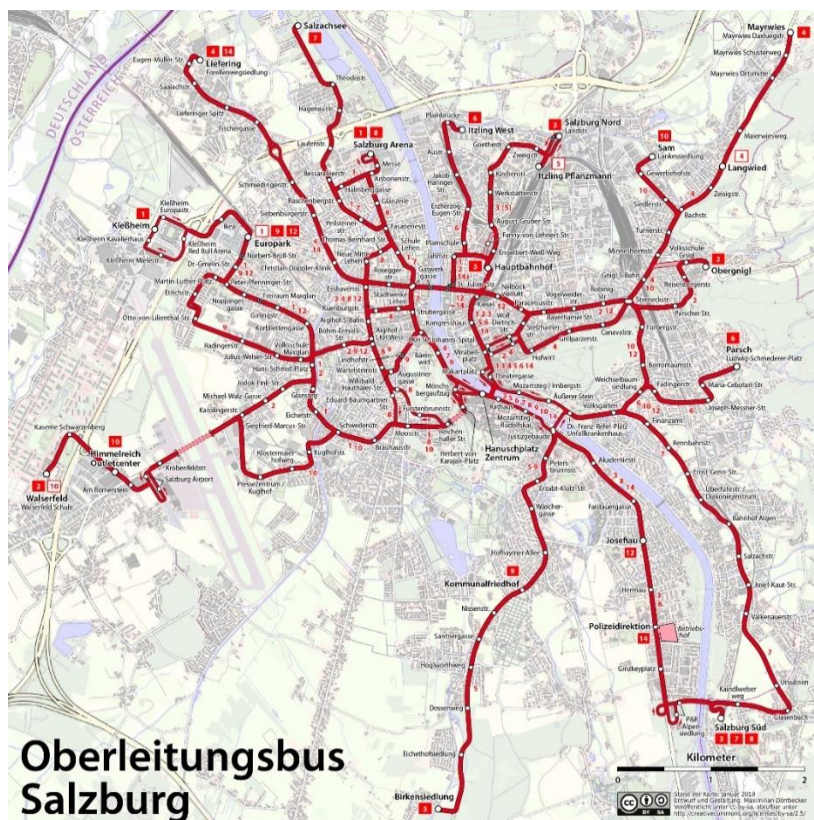


Fig. 29 - Il costo unitario di produzione per posto km filoviario tende ad essere più conveniente degli altri mezzi su gomma a trazione endotermica oppure elettrici a batterie quando aumentano le ore di servizio annuali. Paradigmatico che la rete di Salisburgo, dove la filovia assolve quasi completamente al trasporto pubblico locale incluso il servizio notturno, il costo di produzione sia considerevolmente più basso di tutte le altre città esaminate: 4.947 euro per 1.000 vetture km contro una media del campione di 7.091 euro.



#### 5.1.4. Fonti dei dati utilizzati nell'analisi

Per la presente analisi sono stati richiesti i dati di esercizio e di costo ai gestori dei sistemi analizzati. Possono comunque essere considerati come riferimento i rapporti annuali di gestione ed esercizio. Tutti i dati analizzati fanno riferimento agli anni 2016-2018.

##### 5.1.4.1. Austria

Linz:

[https://www.linzag.at/portal/de/ueber\\_die\\_linzag/medien/infomaterial\\_bestellung/infomaterial/infomaterial\\_detail\\_8834.html](https://www.linzag.at/portal/de/ueber_die_linzag/medien/infomaterial_bestellung/infomaterial/infomaterial_detail_8834.html)

Salzburg: <https://www.salzburg-ag.at/?eID=download&uid=227>

##### 5.1.4.2. Cechia

Brno: <http://www.dpmb.cz/cs/firma-vyrocn-zpravy>

České Budějovice: <https://www.dpmcb.cz/o-nas/vyrocn-zpravy.html>

Hradec Králové: <http://www.dpmhk.cz/53/Vyrocn-zpravy/>

Chomutov-Jirkov: (non disponibile on-line) riferimenti generali su <http://www.dpchj.cz/o-nas/>

Jihlava:

[http://www.dpmj.cz/www/mambo/index.php?option=com\\_content&task=view&id=254&Itemid=65](http://www.dpmj.cz/www/mambo/index.php?option=com_content&task=view&id=254&Itemid=65)

Mariánské Lázně: (non disponibile on-line) riferimenti generali su <http://www.mdml.cz/identifikacni-udaje>

Opava: [www.mdpo.cz/images/zpravy/VZ2016.pdf](http://www.mdpo.cz/images/zpravy/VZ2016.pdf)

Ostrava: <https://www.dpo.cz/o-spolecnosti/vyrocn-zpravy.html>

Pardubice: <http://www.dpmp.cz/vyrocn-zpravy/>

Plzeň: <http://www.pmdp.cz/o-nas/povinne-udaje/vyrocn-zpravy/>

Teplice:

[www.sdp-cr.cz/WD\\_FileDownload.ashx?wd\\_systemtypeid=34&wd\\_pk=WzE0OTEsWzMwXVO=](http://www.sdp-cr.cz/WD_FileDownload.ashx?wd_systemtypeid=34&wd_pk=WzE0OTEsWzMwXVO=)

Ústí nad Labem: <http://www.dpmul.cz/index.php?art=35>

Zlín-Otrokovice: <https://www.kr-zlinsky.cz/vyrocn-zprava-zlinskeho-kraje-cl-3563.html>

##### 5.1.4.3. Francia

Limoges: (non disponibile on-line) riferimenti generali su <http://www.stcl.fr/fr/le-trolleybus/75/le-reseau-trolleybus/46>

Lyon: [www.sytral.fr/uploads/rapport\\_financier/offline/download.pdf](http://www.sytral.fr/uploads/rapport_financier/offline/download.pdf)

Nancy: [http://www.reseau-stan.com/presentation/?rub\\_code=12](http://www.reseau-stan.com/presentation/?rub_code=12)

Saint-Étienne: <https://www.reseau-stas.fr/fr/rapport-dactivite/89>

##### 5.1.4.4. Svizzera

Bern: <https://www.bernmobil.ch/DE/Unternehmen/Portrait/Geschaeftsbericht/?oid=20249&lang=de>

Biel: <https://www.vb-tpb.ch/de/unternehmen/geschaeftsbericht/>



Freiburg: [http://www.tpf.ch/documents/10180/233360/TPF\\_RapportAnnuel\\_2016.pdf/d60243bc-6884-4d29-9af1-e4137cb8d7d5](http://www.tpf.ch/documents/10180/233360/TPF_RapportAnnuel_2016.pdf/d60243bc-6884-4d29-9af1-e4137cb8d7d5)

Géneve: <http://www.tpg.ch/rapport-de-gestion>

Lausanne: [http://www.t-l.ch/images/pdf/tl/ra\\_tl\\_2016\\_web.pdf](http://www.t-l.ch/images/pdf/tl/ra_tl_2016_web.pdf)

Luzern: <https://www.vbl.ch/unternehmen/geschaeftsbericht/>

Neuchâtel: <http://www.transn.ch/entreprise/rapport-de-gestion/>

Schaffhausen: [https://www.vbsh.ch/images/pfd/geshbericht/vbsh\\_geschaeftsbericht\\_2016.pdf](https://www.vbsh.ch/images/pfd/geshbericht/vbsh_geschaeftsbericht_2016.pdf)

Sankt Gallen: <https://www.stadt.sg.ch/home/mobilitaet-verkehr/verkehrspolitik/verkehrsdaten.html>

Vevey–Villeneuve: <https://www.vmcv.ch/N721/rapport-de-gestion.html>

Winterthur: <https://stadt.winterthur.ch/stadtbus/ueber-uns/geschaeftsberichte>

Zürich: [https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die\\_vbz/geschaeftsbericht.html](https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/geschaeftsbericht.html)

## 5.2. Gli elettrobus

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 in tab. 3, 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.**

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.

Esistono vari modelli di bus elettrici che vanno dai 5 a 18 m fino ai 24 m (adottati recentemente per la linea 4 della città francese di Nantes), con grande variabilità di prezzo a seconda della soluzione di ricarica ma anche del costruttore e naturalmente della capacità. Le taglie più diffuse sono quelle relative ai 12 e 18 m. Per un 12 m solitamente se si ritiene sufficiente una percorrenza di circa 190-230 km di autonomia con una sola ricarica e con l'aria condizionata o il riscaldamento interno in funzione. Per quanto riguarda la potenza di ricarica si può scegliere in base a diversi fattori, principalmente il numero di ricariche da effettuare durante l'operatività giornaliera.

Gli elettrobus utilizzano i pacchi batteria per alimentare tutti i sistemi interni. **Si possono distinguere due famiglie di elettrobus:** quella a lungo o esteso raggio e quella a ricarica rapida. Gli elettrobus a lungo o esteso raggio hanno pacchi batteria più grandi per massimizzare l'autonomia tra una ricarica e la successiva e possono utilizzare batterie che favoriscono ricariche a bassa potenza. Questi veicoli vengono generalmente ricaricati una o due volte al giorno (spezzando il turno ordinario di servizio in due). La ricarica completa di una batteria può richiedere tra 8 e 10 ore a seconda delle dimensioni e della potenza erogata dal caricabatterie.

Esempio delle caratteristiche tipo di un **elettrobus a lungo raggio**:

- Capacità della batteria: 250-660 kWh
- Autonomia in servizio: >150 km con una singola carica
- Intensità minima di ricarica richiesta: 50-150 kW (generalmente caricati durante la notte o a metà giornata).

Gli elettrobus a ricarica rapida hanno pacchi batteria più piccoli in grado di ricaricare frequentemente e ad alta potenza. In genere si ricaricano durante il percorso più volte al giorno, e, se l'infrastruttura di ricarica è capillare ed efficace, potrebbero anche funzionare a tempo indeterminato (una ricarica veloce può espletarsi anche in un minuto), senza dover interrompere il servizio per una ricarica completa.

Esempio di caratteristiche **elettrobus a ricarica rapida**:



- Capacità della batteria: 50-250 kWh
- Autonomia in servizio: autonomia indefinita con una rete di ricarica ben ponderata in relazione alle necessità di esercizio
- Intensità minima di ricarica richiesta: 150-600 KW.

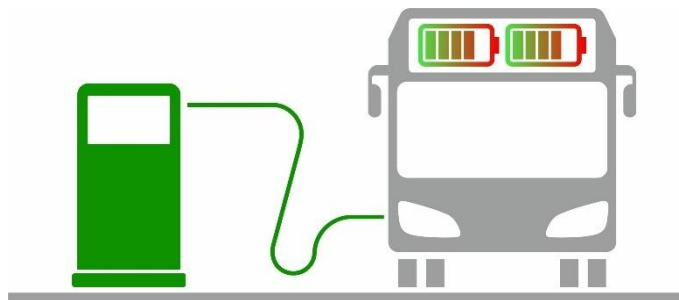
| TIPO DI PROPULSIONE                                                                                                                                                                                                                                                                                       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

Tab. 41 - 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.

Il maggior costo di acquisto<sup>8</sup> di un elettrobus non dovrebbe scoraggiare l'intento ad elettrificare una linea. Va infatti considerato, come si vedrà in dettaglio nei capitoli successivi, che i costi operativi, di manutenzione, uniti alle esternalità ambientali positive, ripagano, in tempi non prolungati, l'investimento effettuato.

### 5.2.1. Tipologie di infrastruttura di ricarica

Gli elettrobus, come i filobus, hanno una manutenzione estremamente ridotta rispetto ai cicli manutentivi richiesti dagli autobus a trazione termica. La parte più complessa da affrontare in sede di progettazione è quindi quella dell'infrastruttura di ricarica. Le tecnologie disponibili sono diverse e la scelta va ponderata sia sullo stato dell'arte che sulle specifiche esigenze di servizio.



#### 5.2.1.1. Ricarica in deposito

- ❖ **Descrizione:** L'autobus viene ricaricato in deposito durante la notte. La ricarica può avvenire sia mediante cavo solidamente collegato all'infrastruttura di ricarica, dotato di connettore plug-in CCS 2, sia per mezzo di braccio telescopico (pantografo) montato sul tetto del veicolo oppure sul fondo. La potenza di ricarica è compresa tra 25 kW e 150 kW.  
Tempo medio di ricarica tra le 5 e le 8 ore.  
Il veicolo è equipaggiato con sistemi di accumulo di grandi dimensioni, idonei ad effettuare l'intero servizio programmato.  
Generalmente si contano da 1 a 3 veicoli per ogni caricatore, con possibilità di ricarica sequenziale e modulabile.  
La ricarica in deposito può essere associata alle ricariche occasionali lungo le fermate o presso i capolinea per aumentare la disponibilità della flotta.
- ❖ **Vantaggi:** Minori costi per unità poiché i caricatori sono tutti concentrati in un'unica area con una manutenzione più semplice.  
Si tratta di una soluzione scalabile per ampi parchi di veicoli, con un design flessibile.  
I veicoli in esercizio non sono limitati a seguire un particolare tragitto.  
I veicoli possono essere ricaricati fuori esercizio.  
Usando tariffe di ricarica notturne, non nelle ore di punta, i risparmi sul costo dell'elettricità possono essere significativi.
- ❖ **Svantaggi:** È richiesto molto spazio al crescere della numerosità della flotta.  
Questa scelta esige del personale fisso per attaccare e staccare i cavi se plug-in.
- ❖ La ricarica concentrata di più mezzi in un singolo punto della rete può costituire un picco eccessivo della domanda per il fornitore dell'energia; quindi, sono richiesti sistemi di gestione e ottimizzazione delle ricariche per garantire che gli elettrobus siano pronti al servizio e per ridurre al minimo i costi dell'elettricità.

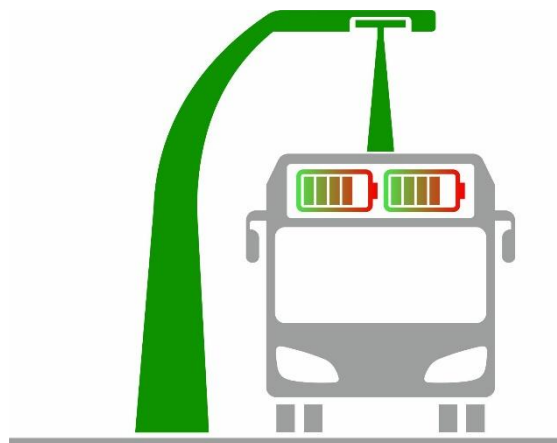
<sup>8</sup> Al 2021 il prezzo di mercato di un elettrobus di 12 metri è del 220% più alto di quello di un bus diesel e di circa il 200% più alto di un bus a metano. Nel caso di articolati da 18 metri, il rapporto si riduce al 200% rispetto alla trazione diesel e al 180% circa rispetto alla trazione a metano.





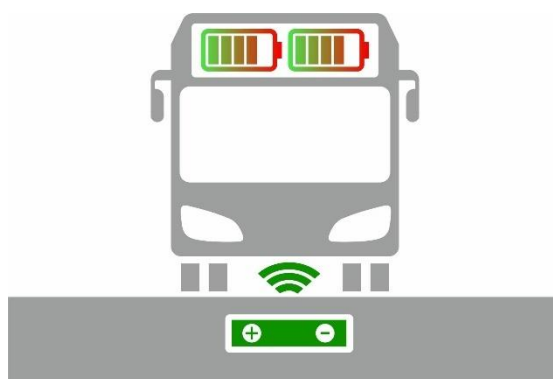
#### 5.2.1.2. Ricarica lenta ai capolinea oppure in alcune fermate

- ❖ **Descrizione:** L'elettrobus è ricaricato ai capolinea e/o ad alcune fermate lungo il percorso. Si tratta di una ricarica ad alta potenza con connessione automatica che può avvenire in due modi
  - dal tetto del veicolo, tramite pantografo telescopico ascendente;
  - dal basso con braccio di captazione discendente; questa opzione è meno diffusa a livello commerciale e prevede delle paratoie scorrevoli di protezione laterale per evitare che qualcuno o qualcosa possa finire tra contattore e presa.
 Uno stesso caricatore può servire più bus alternativamente.  
 Tempo di ricarica tipico tra i 5 e i 6 minuti, compatibile con i tempi di fermo dei bus al capolinea.  
 Potenza di ricarica tra i 150 e i 600 kW.  
 Solitamente il pacco batterie del bus è contenuto e viene generalmente utilizzato il tipo LTO (*Lithium-Titanate Oxide*), in grado di assorbire potenze elevate, al posto di quella NMC, più idonea, quest'ultima, per sistemi di ricarica notturna.  
 Non è necessario dover ricaricare le batterie al 100% ma ad ogni passaggio (ricarica opportunistica) la nuova carica si somma a quella residuale.
- ❖ **Vantaggi:** I costi totali dell'infrastruttura possono incidere meno se pochi caricatori sono utilizzati da molti mezzi.  
 La soluzione è integrabile a linee esistenti senza particolari problematiche e con eventuali modifiche sui percorsi dei bus che si rendono necessarie per questioni di disponibilità di potenza. Nessuna connessione manuale e quindi non è richiesto la presenza di personale dedicato: il procedimento è automatico.  
 Permette una durata del servizio illimitata, senza necessità di interruzione del turno macchina. Il veicolo non deve restare spento per essere ricaricato.  
 Gli standard (in UE, Stati Uniti e Canada) stanno puntando su questa modalità.  
 Questa modalità riduce i costi dei sistemi di accumulo all'interno del veicolo, il peso, la grandezza e la complessità tecnologica dei veicoli.  
 Maggior portata di passeggeri dovuta ad un peso delle batterie più contenuto.
- ❖ **Svantaggi:** le ricariche ad altissima potenza possono creare picchi della domanda di energia elettrica.  
 Il pantografo deve essere correttamente allineato al contattore per iniziare la ricarica.  
 Il pantografo telescopico sul veicolo e i caricatori distribuiti nel territorio possono incrementare i costi di manutenzione sulla rete.



#### 5.2.1.3. Ricarica veloce ai capolinea oppure in alcune fermate

- ❖ **Descrizione:** il veicolo è ricaricato ad alcune fermate e ai capolinea attraverso una ricarica ad alta potenza con connessione automatica al tetto del veicolo, tramite pantografo telescopico. Un caricatore può servire più veicoli in transito sulla linea. Tempo di ricarica tipico tra 5 e 6 minuti ai capolinea e tra 20 e 30 secondi alle fermate attrezzate. Potenza di ricarica tra i 150 e 300 kW ai capolinea e tra 500 e 700 kW alle fermate attrezzate. Solitamente il pacco batterie del veicolo (generalmente composto dalla combinazione di batterie di tipo “tradizionale” e da supercapacitori) è molto più contenuto e non è necessario dover ricaricare al 100% ma ad ogni passaggio, specie alle fermate, la ricarica aggiuntiva si somma a quella residua.
- ❖ **Vantaggi:** con una attenta progettazione, i costi totali dell’infrastruttura possono incidere meno se pochi caricatori sono utilizzati da molti veicoli. Il sistema è facilmente integrabile a linee bus esistenti. Nessuna connessione manuale e quindi non è richiesto la presenza di personale dedicato: il procedimento è automatico. Permette una durata del servizio illimitata, senza necessità di interruzione del turno macchina. Il veicolo non deve restare spento per essere ricaricato. Gli standard (in UE, Stati Uniti e Canada) stanno puntando su questa modalità. La maggior parte degli operatori preferisce questa modalità perché riduce i costi dei sistemi di accumulo all’interno del veicolo, il peso, la grandezza e la complessità tecnologica del veicolo.
- ❖ **Svantaggi:** le ricariche ad altissima potenza possono creare picchi della domanda di energia elettrica. Il pantografo deve essere correttamente allineato al contattore per iniziare la ricarica. Il pantografo telescopico sul veicolo e i caricatori distribuiti nel territorio possono incrementare i costi di manutenzione sulla rete.



#### 5.2.1.4. Ricarica induttiva puntuale o lungo linea

- ❖ **Descrizione:** si tratta di un sistema ad alimentazione discontinua nel quale l'energia, fornita da opportune stazioni fisse (punti di ricarica posizionati lungo le fermate e al capolinea), è trasferita al veicolo mediante accoppiamento induttivo (tramite piastre).  
Un caricatore serve più bus alternativamente.  
Potenza di ricarica compresa tra i 50 e i 250 kW.
- ❖ **Vantaggi:** con una attenta progettazione i costi totali dell'infrastruttura possono incidere meno se pochi caricatori sono utilizzati da molti mezzi.  
Nessuna connessione manuale o parti mobili: il procedimento è automatico  
Miglior impatto visivo ed estetico.  
Permette una durata del servizio illimitato anche in condizioni meteorologiche avverse.  
Il veicolo non deve restare spento per essere ricaricato ma lo fa mentre è in servizio
- ❖ **Svantaggi:** costo di costruzione più alto per ogni caricatore.  
L'efficienza di ricarica può essere differente a seconda di come il veicolo è allineato alla piastra erogante.  
Azioni manutentive ordinarie possono richiedere intervento sul manto stradale.  
Si tratta di una soluzione ad oggi poco utilizzata con rare applicazioni prototipali in Italia.

## 5.2.2. Strategie di ricarica delle batterie

Le attuali strategie di ricarica delle batterie sono influenzate dal tempo necessario per ricaricare il veicolo e dai vincoli imposti dalla tabella oraria.

Nel caso della ricarica a deposito, gli operatori di trasporto pubblico si affidano a batterie con una capacità sufficiente a garantire l'autonomia per completare il servizio. Le dimensioni della batteria, tuttavia, influiscono negativamente sulla capacità di trasporto dei passeggeri, aumentando il costo e il peso del veicolo. La batteria di un autobus elettrico che utilizzi la strategia di ricarica a deposito può costare fino al 45% del costo totale del veicolo.

Nel caso della strategia di ricarica opportunistica, con stazioni di ricarica ai soli capolinea, il veicolo deve caricare in un periodo più breve del tempo di sosta ai capolinea. I tempi di sosta ai capolinea sono programmati per fornire una pausa agli autisti, ma anche per compensare eventuali ritardi nel servizio. Durante i periodi di punta, quando i tempi di sosta sono più brevi, gli operatori di trasporto pubblico si trovano spesso di fronte a un dilemma: ricaricare solo parzialmente la batteria per mantenere la tabella oraria e spingere la batteria verso una scarica profonda, o abbandonare la tabella oraria per consentire una carica completa? In altre parole, se la ricarica non è abbastanza veloce o ne risente il servizio o si incrementano i costi. In diversi casi è utile adottare la seguente strategia: la ricarica presso i capolinea



e a deposito, ma anche lungo il percorso, ad alcune fermate, sfruttando il tempo di salita e discesa dei passeggeri. La ricarica lungo il percorso a fermate selezionate:

- assicura che le batterie siano sempre mantenute ad un elevato stato di carica;
- riduce la necessità di lunghi periodi di ricarica;
- prolunga la durata della batteria evitando scariche profonde.

Nei periodi di punta e/o con traffico congestionato, il veicolo riceve la maggior parte dell'energia necessaria per il servizio alle fermate lungo il percorso, mentre durante il funzionamento nei periodi “di morbida” il veicolo si ricarica soprattutto al capolinea.

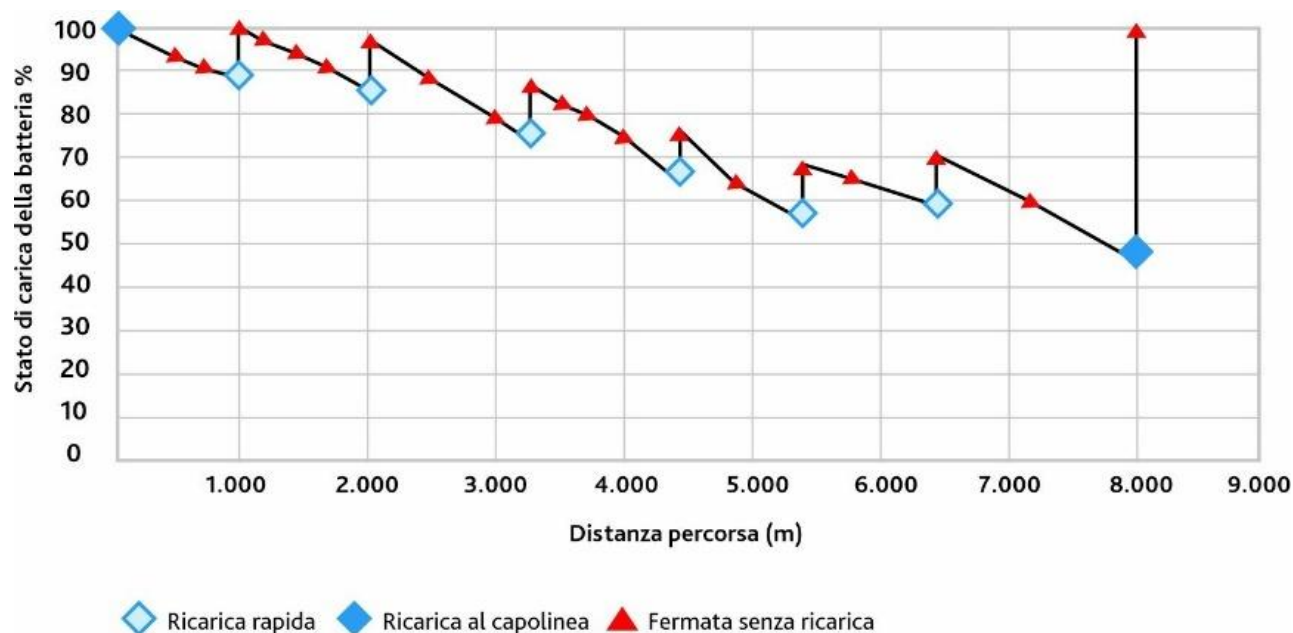


Fig. 30 - La ricarica ultrarapida (spesso menzionata con l'anglicismo “flash”) indica una modalità di ricarica che oltre a presentare ricariche rapide ai capolinea presenta anche ricariche ultrarapide della durata di 20 s ad alcune delle fermate lungo la linea. Con tale tecnologia si riesce a mantenere lo status di carica delle batterie (SOC) costantemente oltre il 50%, permettendo così una ricarica completa ai capolinea in 3-4 minuti. Con questo sistema si ottiene quindi una autonomia virtualmente infinita, senza alcun impatto sul livello di servizio rispetto ad un equivalente bus diesel o a metano. Infatti: 3-4 min di ricarica ai capolinea sono inferiori al tempo di attesa tipico concesso per il riposo dell'autista (in genere 5 minuti); 20 s di ricarica alle fermate sono “in ombra” rispetto al tempo di salita/discesa dei passeggeri. Dato che l'energia elettrica necessaria per l'esercizio è distribuita lungo la linea, la capacità e quindi il peso delle batterie imbarcate sono contenuti, a tutto vantaggio della capacità di trasporto dei passeggeri che è dunque equivalente a quella di un bus a combustione interna della medesima taglia. Si tratta di una ricarica conduttiva che prevede un sistema di connessione ai punti di ricarica tramite pantografo telescopico in grado di connettersi in meno di 1s, in modo totalmente automatico e autonomo, al punto di ricarica.

I punti di ricarica presso i capolinea e lungo i percorsi sono, generalmente, da 400 a 600 kW per massimizzare le opportunità di ricarica. Una tale infrastruttura è efficace solo se combinata con una batteria in grado di assorbire una carica ad alta potenza. Per questo motivo i veicoli sono equipaggiati con batterie al litio-titanato (LTO) che si caricano rapidamente e possono funzionare fino al cosiddetto livello “10C”. 10C si riferisce al C-rate, una misura standard di quanto velocemente una batteria può essere caricata o scaricata. Più alto è il C-rate, più veloce è la carica o la scarica. Quando si tratta di autobus elettrici, quindi, l'attenzione non deve essere rivolta solo al prezzo di acquisto e all'autonomia, ma anche al rispetto della tabella oraria. Se la ricarica viene effettuata in modo attenta, una linea di

elettrobus può essere gestita non solo con un costo operativo contenuto, ma anche assicurando il vantaggio di un sistema di trasporto con un trascurabile impatto ecologico. La scelta corretta del sistema di ricarica della batteria è dunque un elemento fondamentale e da valutare con attenzione.

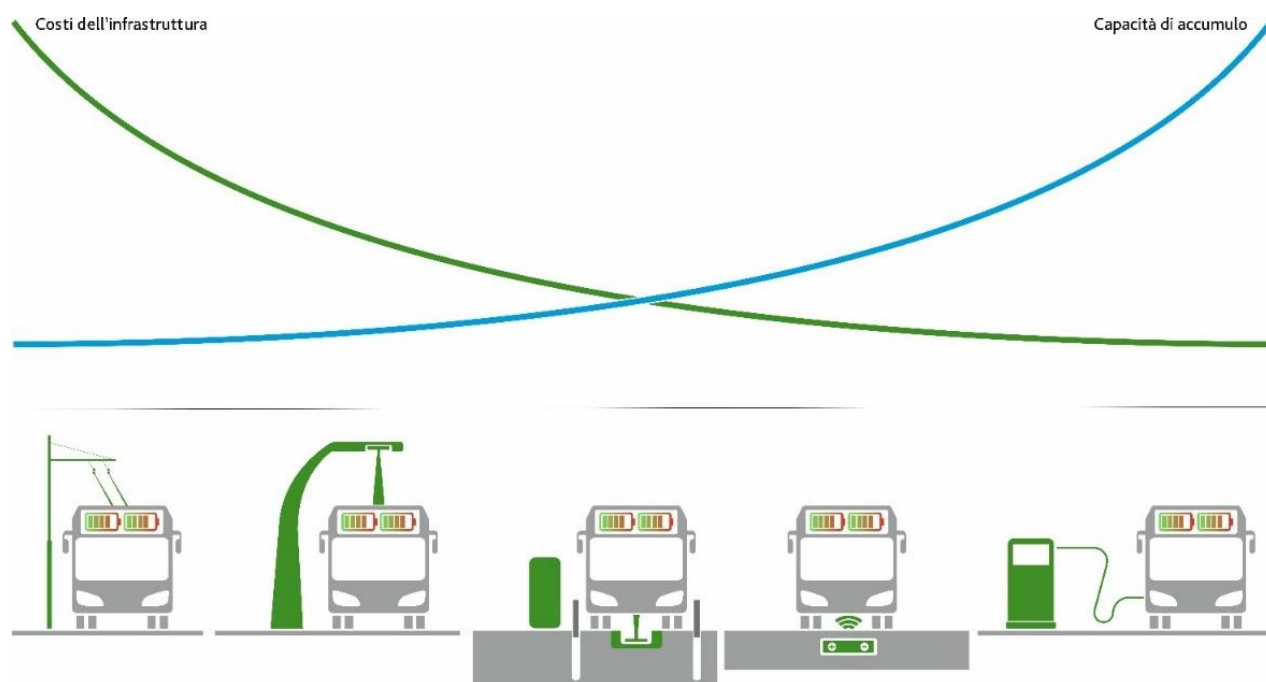


Fig. 31 – I costi dell'infrastruttura di terra e la capacità di accumulo sono inversamente proporzionale. Giocoforza che, relativamente alle peculiarità della trazione elettrica, anche i costi di manutenzione del veicolo e il consumo specifico seguano la stessa crescita della curva della capacità di accumulo di bordo.

### 5.2.3. Esperienze consolidate di busvie elettriche

Sebbene gli elettrobus si stiano rapidamente diffondendo nel mondo, sono ancora limitate le realizzazioni di sistemi tipo BRT/alta capacità. Tra questi, per omogeneità territoriale e modalità di esercizio sono presi in esame dei sistemi realizzati in Europa che sono in esercizio da almeno un anno:

- Amiens (sistema Nemo);
- Ginevra, linea 23;
- Nantes (busvia linea 4).

#### 5.2.3.1. *Amiens*

La città della regione dell'Hauts-de-France (area urbana di 185 km<sup>2</sup> e 182.573 ab.<sup>9</sup>) nel 2012 approva un progetto per una linea tramviaria nord-sud sul modello di quella che in quegli anni stavano realizzando altre città francesi di pari dimensioni come Angers, Le Mans e Reims. L'avvicendamento amministrativo alle elezioni del 2014 porta la Giunta a sospendere l'iter del tram, ritenendo eccessivamente onerose le annesse misure di pedonalizzazione dell'area centrale e in genere di riduzione degli spazi per la circolazione del traffico privato.

Al posto di due linee tranviarie secondo il classico schema cardo-decumano, si propone una rete di 4 linee di BHNS (*bus à haut niveau de service*, nominate *Nemo*) per uno sviluppo di 44 km di cui 22 in sede propria. Il parco rotabile è costituito da 43 elettrobus articolati, ricaricati con biberonaggio al capolinea. Il costo complessivo è di 122 milioni di euro: 7 milioni di progettazione, 56 per la via di corsa, 34 milioni per l'acquisto degli autobus (della spagnola Irizar, 791 mila euro/cad.), 5 milioni per 4 punti di ricarica e 20 milioni per il nuovo deposito dedicato di Rivéry.

Il sistema è stato attivato l'11 maggio 2019, con una settimana di servizio promozionale gratuito. Dopo una prima impasse (nei primi due mesi l'affidabilità dei mezzi è stata inferiore al 65%) l'affidabilità è salita al 98%: nel marzo 2021 a causa di una ondata di gelo (5 giorni di temperature comprese tra 2° e -5°) il sistema è stato fuori servizio per 10 giorni per interventi di manutenzione straordinaria principalmente ai punti di ricarica.



Fig. 32 - Amiens, elettrobus Irizar (foto BB 22385)

<sup>9</sup> Dato 1/1/2021





Fig. 33 – Amiens, punto di ricarica al Pole Jules Verne (foto BB 22385)

Tutte le fermate sono equipaggiate con sistemi di videoinformazione all'utenza, prese USB e possibilità di chiamata d'emergenza al posto centrale.

La produzione annua a regime è di 7 milioni di vetture km anno.

La rete *Nemo* trasporta circa il 65% della domanda complessiva generata dalla città di Amiens: emergenza Covid19 a parte, il sistema ha raggiunto i 15,2 milioni di passeggeri anno nel 2023<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Si veda: <https://france3-regions.francetvinfo.fr/hauts-de-france/somme/amiens/bus-nemo-cinq-ans-apres-la-metropole-d-amiens-affiche-un-bilan-positif-les-usagers-souhaitent-une-frequence-plus-importante-2969138.html>



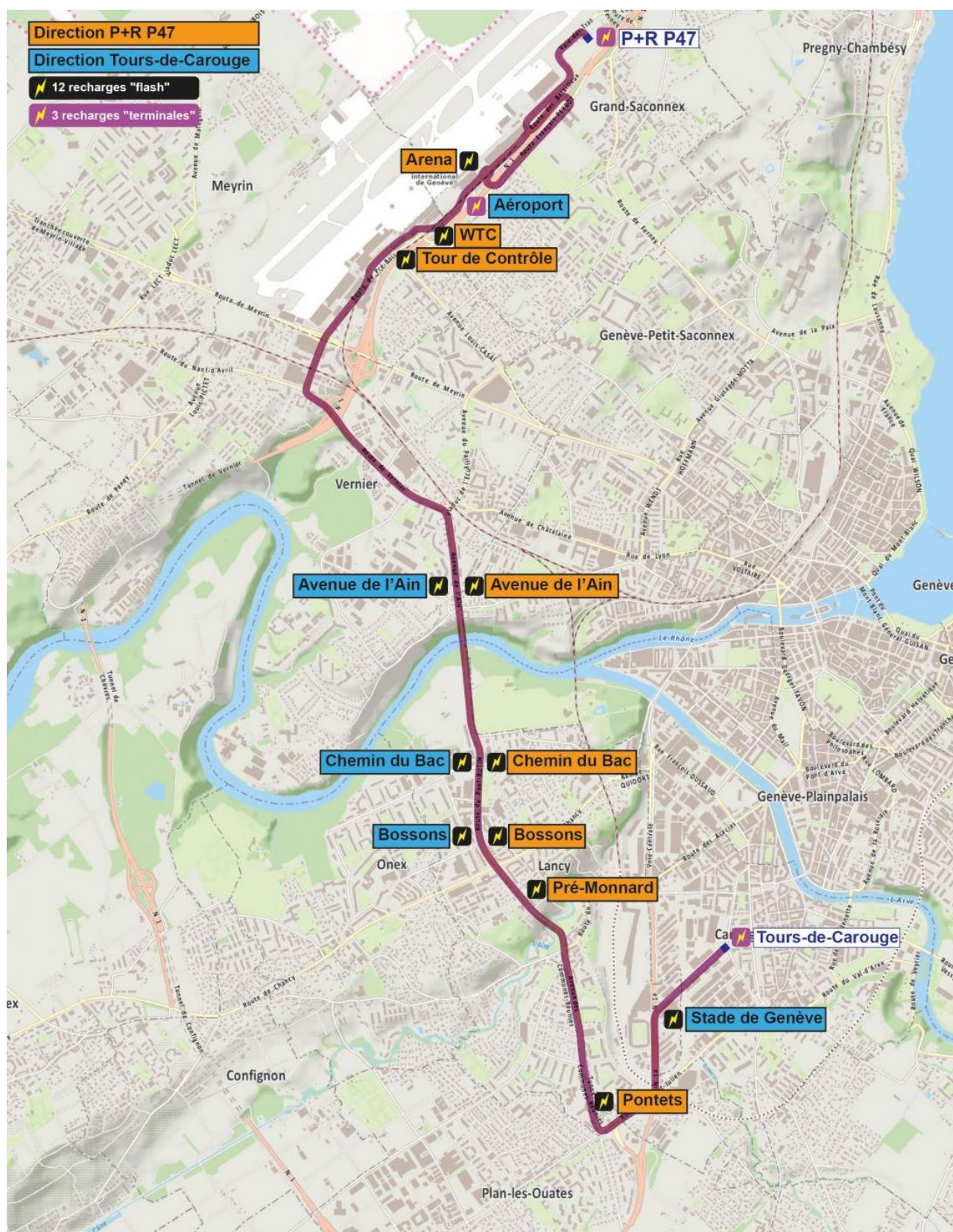


Fig. 34 – Ginevra, linea 23. La linea è equipaggiata con 12 punti di ricarica ultrarapida e 3 punti di ricarica ai capolinea (2 all'Aeroporto e uno a Tours-de-Carouge).



### 5.2.3.2. *Ginevra*

Ginevra è la seconda città della Confederazione elvetica, con una area urbana di 534 km<sup>2</sup> e 806.063<sup>16</sup> ab. La città ha adottato il sistema TOSA<sup>11</sup> di ABB/Hitachi sulla linea 23 (12,2 km di sviluppo) Carouge-Tours – Aeroporto parcheggio P47. L'esercizio è stato avviato nel dicembre 2017 con 12 vetture articolate da 18,75 metri equipaggiate con pacchi batteria da 73 kWh. Il tipo di batterie è ritenuto adatto ai continui cicli di carica e scarica veloce; il minor peso delle batterie si traduce in minore peso del veicolo, minori consumi e minori costi di smaltimento. La riduzione dell'ingombro e del peso delle batterie sulle vetture ha permesso un guadagno di posti (dal 15 al 30 % dei posti in più) e un risparmio di circa il 10 % di energia.



Fig. 35 – Ginevra, linea 23, fermata con punto di ricarica flash

Il Segretariato del consiglio cantonale di Ginevra ha reso noti i costi comparativi del pre-esercizio, riassunti nella seguente tabella:

| Costi (in CHF, 2017)                      | Filobus    | TOSA       |
|-------------------------------------------|------------|------------|
| Costi di investimento                     | 31.730.000 | 28.230.000 |
| Variazione rispetto alla filovia classica | -          | -11%       |
| Costo di esercizio annuale                | 8.729.000  | 8.246.800  |
| Variazione rispetto al bus diesel         | +29%       | +22%       |

Tab. 42 - Costi del progetto TOSA di Ginevra e confronto con il progetto di filoviarizzazione della linea

La durata prevista per i moduli batterie delle stazioni di ricarica è di 10 anni. La potenza massima di ricarica è di 600 kW. Per un ottimale funzionamento della stazione, nel modulo batterie la temperatura deve essere inferiore a 45°. L'armadio è climatizzato in modo da garantire la temperatura ottima,

<sup>11</sup> Trolleybus Optimisation Système Alimentation : <http://www.tpg.ch/it/tosa>



monitorato costantemente per non superare i limiti di esposizione del rumore previsti dalla normativa elvetica. Le stazioni sono situate lungo la linea, (in media ogni 5/6 fermate) ai capolinea e in deposito.

L'affidabilità del sistema nel 2020 è stata del 92%.

#### 5.2.3.3. *Nantes*

Nantes è una area urbana di 721 km<sup>2</sup> e 675.284 ab.<sup>16</sup> ed è stata una delle prime città francesi a dotarsi di una efficiente rete tranviaria moderna: oggi 3 linee su 43,5 km con 259.600 passeggeri per giorno feriale (dato 2019). La quarta direttrice avrebbe dovuto coprire la tratta tra la cattedrale e il comune di Vertou, uno dei più importanti della corona metropolitana. Date le difficoltà incontrate nella realizzazione della linea 3 del tram, Nantes Métropole decise di sostituire la prevista diramazione per Saint-Sébastien-sur-Loire e Vertou con una busvia.

L'infrastruttura, completamente in sede segregata, è stata aperta il 6 novembre 2006: con un percorso di 7 km unisce place Maréchal-Foch alla Porte de Vertou al margine del *boulevard périphérique*, servendo l'isola di Beaulieu, Saint-Sébastien-sur-Loire e il quartiere di Bourdonnières. Si è trattato della prima infrastruttura di questo tipo a essere inaugurata in Francia. Inizialmente il servizio era svolto con autoarticolati a metano, precisamente *Citaro G GNV BHNS*.

Visto il successo di domanda (45 mila passeggeri per giorno feriale), nel 2010 si approva il progetto di elettrificazione della linea. La tecnologia scelta è una evoluzione di quella di Ginevra: sono acquistati 22 bisnodati da 24 metri di Hess (modello *lighTram*, 1,2 milioni cad.). Per quanto riguarda l'infrastruttura è stato realizzato un nuovo deposito presso Vertonne, al capolinea di Vertou, equipaggiato con punti di ricarica lenta notturna e 4 punti di ricarica *flash* presso altrettante fermate per un costo complessivo di 26,6 milioni di euro (al netto del parco rotabile). L'esercizio è passato completamente ai mezzi elettrici Hess nel febbraio 2020 con la fine della fornitura.



Fig. 36 – Bisnodato Hess presso il capolinea di Vertou (foto StBi44)





Fig. 37 – Nantes, dettaglio del punto di ricarica del capolinea di Foch-Cathédrale (foto StBi44)



Fig. 38 - Dettaglio del braccio telescopico di captazione, in posizione di riposo, montato sul tetto della vettura in posizione laterale

### 5.3. Analisi economica per la scelta della tecnologia

#### 5.3.1. Modello di costo operativo

Il riferimento è il 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<sup>12</sup>”. Il DM definisce i costi standard unitari, determinati con il metodo statistico della regressione, mediante il quale è definita, in applicazione dell’articolo 1, comma 84, della legge 27 dicembre 2013, n. 147, la funzione di costo standard unitario.

##### 5.3.1.1. *Autobus ordinari*

Rimandando al citato decreto per i necessari riferimenti, si riporta per comodità la formula di calcolo del costo di riferimento:

Costo standard unitario (per vettura km) =

$$+ 14,07855 - 0,59230 \cdot v + 0,50837 \cdot V_1 \cdot (v - 17) + 0,06827 \cdot V_2 \cdot (v - 32) - 0,18583 \cdot K_1 \cdot \Pi + \\ + 0,01559 \cdot K_2 \cdot \Pi + 1,46083 \cdot \varpi$$

dove:

- $\Pi$ , quantità bus-km di servizio, è espressa in milioni;
- l’ammodernamento è definito all’articolo 3, commi 8 e 9 del DM157 su una vita media di 15 anni;
- $V_1$  è pari a 0 se  $v \leq 17$  km/h ed è pari a 1 se superiore;
- $V_2$  è pari a 0 se  $v \leq 32$  km/h ed è pari a 1 se superiore;
- $K_1$  è pari a 1 se  $\Pi \leq 4$  milioni di km ovvero è pari a 0 se superiore;
- $K_2$  è pari a 1 se  $\Pi > 4$  milioni di km ovvero è pari a 0 se uguale o inferiore;
- $\varpi$  è l’ammodernamento del materiale rotabile per bus-km di servizio che qui si assume pari a:  
 $\varpi = 0,52^{WACC}$  con WACC costo medio ponderato del capitale, assunto pari al 8,47<sup>13</sup>%.

---

<sup>12</sup> Si veda : <http://www.mit.gov.it/normativa/decreto-ministeriale-numero-157-del-28032018>

<sup>13</sup> Valore pretax per i servizi su gomma, Allegato A delibera ART n. 32 2024: [https://www.autorita-trasporti.it/wp-content/uploads/2024/03/All.-A-delibera-n.-32\\_2024\\_signed.pdf](https://www.autorita-trasporti.it/wp-content/uploads/2024/03/All.-A-delibera-n.-32_2024_signed.pdf)



### 5.3.1.2. *Filobus*

La categoria dei filobus non è stata considerata nel DM157 e allegati, pertanto, per il presente modello, è stata calcolata una interpolazione sui costi operativi lordi dei sistemi attualmente in esercizio individuando dei coefficienti di adattamento dello schema di calcolo precedentemente descritto per i tram.

In Italia sono attualmente in esercizio 14 sistemi filoviari in altrettante città:

| Città     | Estensione rete (km) | Posti km offerti per giorno feriale | Posti per vettura (media) | Produzione annua | Costo per vettura km (netto IVA) |
|-----------|----------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------|----------------------------------|
| Milano    | 40,4                 | 2.020.915                           | 140                       | 4.474.800        | 6,48                             |
| Genova    | 14,0                 | 367.074                             | 140                       | 812.800          | 7,91                             |
| Sanremo   | 29,0                 | 386.137                             | 85                        | 1.408.200        | 5,25                             |
| La Spezia | 24,4                 | 122.525                             | 87                        | 439.100          | 4,43                             |
| Parma     | 18,6                 | 401.036                             | 104                       | 1.201.100        | 5,08                             |
| Modena    | 21,0                 | 345.474                             | 122                       | 880.200          | 4,21                             |
| Bologna   | 37,0                 | 1.674.251                           | 135                       | 3.844.500        | 5,79                             |
| Rimini    | 12,2                 | 335.656                             | 140                       | 743.200          | 5,10                             |
| Ancona    | 6,5                  | 211.335                             | 140                       | 189.200          | 4,35                             |
| Roma      | 11,8                 | 529.286                             | 145                       | 1.131.500        | 9,15                             |
| Napoli    | 15,6                 | 246.878                             | 83                        | 919.300          | 5,17                             |
| Chieti    | 9,6                  | 92.058                              | 85                        | 335.700          | 4,22                             |
| Lecce     | 28,0                 | 68.935                              | 85                        | 250.251          | 6,93                             |
| Cagliari  | 56,7                 | 319.460                             | 82                        | 1.305.215        | 4,35                             |

Tab. 43 - Reti filoviarie italiane: estensione, produzione annua e costi operativi lordi per vettura km

I dati di produzione e costo di cui alla tabella precedente sono riferiti all'anno 2017 e sono derivati dall'analisi delle fonti di cui alla nota in calce<sup>14</sup>. Dal grafico in Fig. 39 si notano 3 *outlier* rispetto al

<sup>14</sup> Le fonti dei dati per produzione e costi filoviari al 2017 sono di seguito riportati:

Milano ATM, Bilancio 2017 > <https://www.atm.it/it/IlGruppo/ChiSiamo/Pagine/BilancioEsercizio.aspx>

Genova AMT, Bilancio 2017 > <https://www.amt.genova.it/amt/amministrazione-trasparente/bilanci/>

Riviera Trasporti, Bilancio 2017 >

Sanremo [http://ww2.gazzettaamministrativa.it/opencms/opencms/\\_gazzetta\\_amministrativa/](http://ww2.gazzettaamministrativa.it/opencms/opencms/_gazzetta_amministrativa/)

[ammnistrazione\\_trasparente/\\_liguria/\\_societa\\_\\_\\_riviera\\_trasporti\\_SPA/130\\_bila/010\\_bil\\_pre\\_con/](http://ww2.gazzettaamministrativa.it/opencms/opencms/_gazzetta_amministrativa/)

La Spezia ATC, Bilancio 2017 > <https://amministrazionetrasparente.atcesercizio.it/>

carattere dominante della serie: si tratta del costo operativo di Genova, Roma e Lecce, non a caso i sistemi filoviari di più recente attivazione rispetto agli altri in esercizio. Per Genova e Roma sono stati decurtati dei sovraccosti finanziari legati agli ammortamenti e, nel caso di Roma, a una maggiorazione dei costi di manutenzione<sup>15</sup>; per Lecce, stante alcune difficoltà di esercizio, è stato assunto il nuovo contratto di servizio che prevede un aumento delle percorrenze e una riduzione del costo operativo. Il risultato è in Fig. 40, dove si vede l'esistenza di una robusta correlazione nei valori della serie.

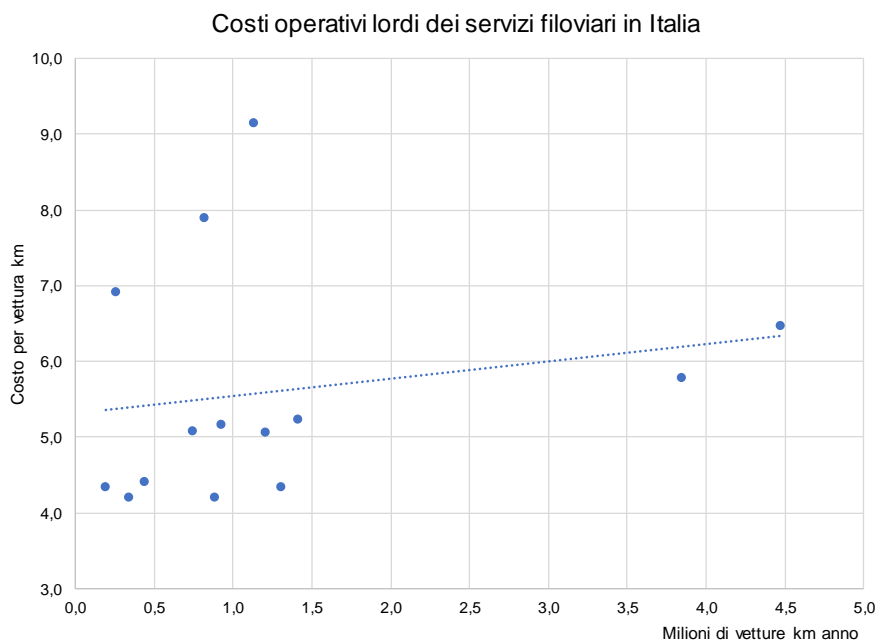


Fig. 39 - Rapporto produzione-costi dei sistemi filoviari italiani

|          |                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Parma    | TEP, Bilancio 2017 > <a href="http://www.tep.pr.it/azienda/amministrazioni_trasparenti/bilanci.aspx">http://www.tep.pr.it/azienda/amministrazioni_trasparenti/bilanci.aspx</a>                                                                         |
| Modena   | Seta, Bilancio 2017 > <a href="http://www.setaweb.it/chi-siamo/20/Societa%C3%A0%20trasparente.html">http://www.setaweb.it/chi-siamo/20/Societa%C3%A0%20trasparente.html</a>                                                                            |
| Bologna  | TPer, Bilancio 2017 e open-data > <a href="https://www.tper.it/azienda/bilanci">https://www.tper.it/azienda/bilanci</a>                                                                                                                                |
| Rimini   | Start Romagna, Bilancio 2017 > <a href="https://www.startromagna.it/societa-trasparente/bilanci/">https://www.startromagna.it/societa-trasparente/bilanci/</a>                                                                                         |
| Ancona   | ConeroBus, Bilancio 2017 > <a href="https://www.conerobus.it/societa-trasparente/bilanci/bilancio-preventivo-e-consuntivo">https://www.conerobus.it/societa-trasparente/bilanci/bilancio-preventivo-e-consuntivo</a>                                   |
| Roma     | Atac, definizione costi standard > <a href="https://www.atac.roma.it/files/doc.asp?r=5879">https://www.atac.roma.it/files/doc.asp?r=5879</a>                                                                                                           |
| Napoli   | ANM, Bilancio 2017 > <a href="http://www.anm.it/index.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=1367&amp;Itemid=358">http://www.anm.it/index.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=1367&amp;Itemid=358</a>                                     |
| Chieti   | Regione Abruzzo, Contratto di servizio "Gruppo La Panoramica"                                                                                                                                                                                          |
| Lecce    | Comune, Contratto di servizio, 2017                                                                                                                                                                                                                    |
| Cagliari | CTM, Bilancio 2017 > <a href="http://trasparenza.ctmcagliari.it/testo/show/id/_49f5c1437ee0f6993dd306c5fd438d7/Bilancio_desercizio.html">http://trasparenza.ctmcagliari.it/testo/show/id/_49f5c1437ee0f6993dd306c5fd438d7/Bilancio_desercizio.html</a> |

<sup>15</sup> A Roma il filobus è in esercizio sulla linea 90, direttrice Termini – Nomentana – Montesacro. 12,2 km fino al capolinea di Largo Fausta Labia: i primi 970 metri fino a Porta Pia sono percorsi in trazione autonoma senza bifilare. A questi più recentemente si è aggiunto il c.d. corridoio Laurentino, linea 74, con un esercizio filoviario affidato a mezzi bimodali (per il 35% circa dell'offerta in marcia con il motore ausiliario diesel).

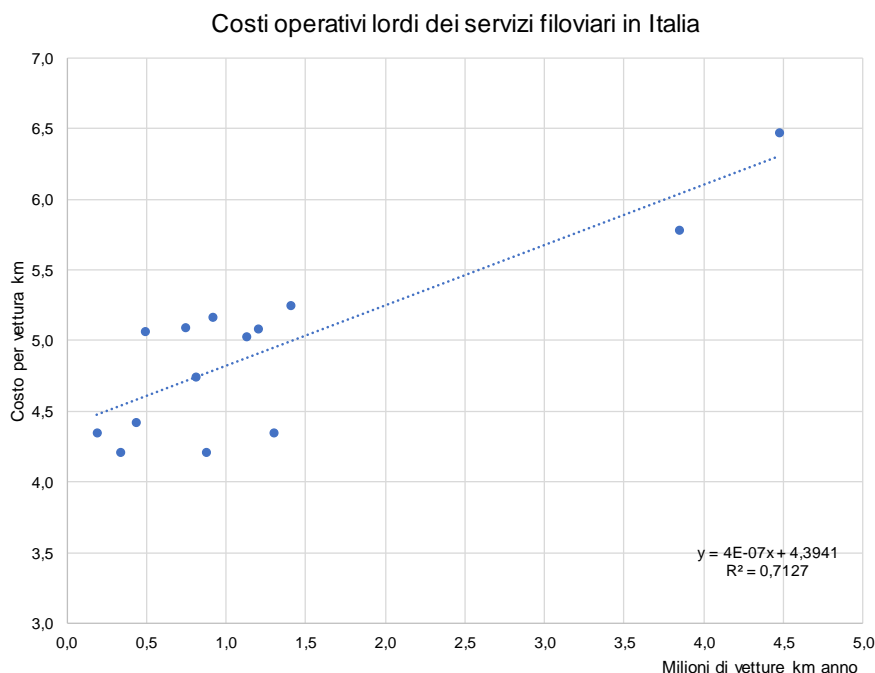


Fig. 40 – Serie della figura precedente con i valori di Genova, Roma e Lecce decurtati dei sovraccosti

Tale correlazione è stata utilizzata per individuare dei coefficienti da utilizzare su un modello simile a quello utilizzato nel DM157 per il calcolo del costo standard dei servizi tranviari. Il costo standard unitario (cioè, per vettura-km offerto al pubblico)  $CS_F$  è dato dal rapporto tra la sommatoria dei costi (annui) delle diverse aree, comprensivo del costo del capitale investito netto, e le percorrenze totali (annue) di servizio:

$$CS_F = \frac{C_E + C_M + C_S + C_G + C_F}{\Pi}$$

Dove:

- $C_E$  è il costo delle principali attività dell'area di esercizio

$$C_E = C_{pg} + C_{pm} + C_w + C_r + C_{ms}$$

$C_{pg}$  è il costo del personale di guida

$$C_{pg} = NPG \cdot 44017 \cdot 0,90 = \frac{\Pi}{1196 \cdot v \cdot 0,90} \cdot 39615$$

$C_{pm}$  è il costo di altro personale di movimento

$$C_{pm} = NPG \cdot 0,0793$$

$C_w$  è il costo di energia di trazione

$$C_w = \Pi \cdot 0,5292$$

$C_r$  è il costo per i rotabili, tra ammortamenti e canoni di affitto/leasing, assumendo una percorrenza massima di 45.000 km/anno:

$$C_r = NT \cdot 140 \cdot AMM = \frac{\Pi}{45.000} \cdot 140 \cdot AMM$$



dove si assume  $AMM = 271$  ammortamento standard per posto, comprensivo del valore attuale della manutenzione programmata capitalizzata (ai sensi dell'allegato 4 al DM157).

- $C_{ms}$  è il costo per la manutenzione di esercizio, pulizia, vigilanza e sicurezza dei rotabili

$$C_{ms} = NT \cdot 25063 = \frac{\Pi}{45.000} \cdot 25063$$

- $C_M$  è il costo delle principali attività di manutenzione di esercizio, pulizia vigilanza e sicurezza dell'area infrastruttura

$$C_M = \Pi \cdot 0,75$$

- $C_S$  è il costo di utilizzazione degli impianti dell'infrastruttura, comprensivo o meno del costo della relativa manutenzione straordinaria

$$C_S = 38059 \cdot \lambda = 38059 \cdot 10$$

- $C_G$  è il costo comprensivo di tutti i costi generali (tra cui le principali attività dell'area amministrativa) e di altri costi industriali non considerati in altre voci di costo

$$C_G = (C_E + C_M) \cdot 0,12$$

- $C_F$  è il costo del capitale investito netto

$$C_F = WACC \cdot \left[ NT \cdot 140 \cdot AMM \cdot \left( \frac{30}{2} + 1 \right) \right]$$

dove si assume  $AMM = 271$  e WACC costo medio ponderato del capitale, assunto pari al 7,03%

- $\Pi$  è il numero di vetture-km di servizio.

### 5.3.1.3. Elettrobus

Anche la categoria dei bus elettrici non è stata considerata nel DM157 e allegati, pertanto si è proceduto analogamente a quanto fatto precedentemente con i filobus. In Italia non ci sono ancora sistemi ad alta capacità svolti con mezzi alimentati a batterie, pertanto, la correlazione tra produzione e costo operativo è stata svolta su dati di letteratura e sistemi esteri, in particolare Amiens, Ginevra e Nantes.

#### 5.3.1.3.1. Amiens

La rete di trasporto pubblico della città francese è regolata da **Ametis**<sup>16</sup>, formalmente agenzia della mobilità della *Communauté d'agglomération Amiens Métropole*. Ametis ha messo a gara in lotto unico il servizio, affidandolo il 1° giugno 2012 a Keolis Amiens, divisione del gruppo Keolis (posseduto al 70% da SNCF, gestore nazionale ferroviario francese). Keolis Amiens gestisce anche la rete di BRT elettrici "Nemo" in quanto il nuovo servizio è stato incluso nella riforma della rete, entrata in servizio l'11 maggio 2019.

La rete di BRT (meglio BHNS - *bus à haut niveau de service*) è composta da quattro linee:

| Linea | Terminali                         | Sviluppo<br>(m) | Fermate | Tempo di<br>percorrenza<br>(minuti) | Velocità<br>commerciale<br>(km/h) |
|-------|-----------------------------------|-----------------|---------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| n1    | Etouvie Quai A - Pôle Jules Verne | 15.753          | 37      | 41,3                                | 22,9                              |
| n2    | La Paix - IUT                     | 12.327          | 26      | 31,9                                | 23,2                              |
| n3    | Promenade - Centre Cial Sud       | 10.833          | 27      | 34,3                                | 18,9                              |
| n4    | Pôle Licorne - Longueau SNCF      | 10.395          | 29      | 31,7                                | 19,7                              |

<sup>16</sup> <https://www.ametis.fr/>

La produzione è la seguente:

| Linea                    | Corse per<br>giorno<br>feriale<br>invernale | Corse per<br>giorno<br>feriale<br>estivo | Corse per<br>il sabato | Corse per<br>domenica<br>e festivi | Corse totali<br>per anno | Vetture<br>km anno |
|--------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------|
| n1                       | 95                                          | 76                                       | 69                     | 20                                 | 55.021                   | 866.746            |
| n2                       | 92                                          | 74                                       | 68                     | 22                                 | 53.781                   | 662.958            |
| n3                       | 93                                          | 74                                       | 68                     | 21                                 | 53.972                   | 584.674            |
| n4                       | 96                                          | 77                                       | 69                     | 20                                 | 55.532                   | 577.251            |
|                          | 376                                         | 302                                      | 274                    | 83                                 | 218.305                  | -                  |
| Produzione BRT           |                                             |                                          |                        |                                    |                          | <b>2.691.630</b>   |
| Produzione bus ordinaria |                                             |                                          |                        |                                    |                          | <b>3.558.710</b>   |

Il costo operativo lordo per tecnologia è il seguente:

|                          | Vetture km<br>anno | Produzione<br>lorda | Costo operativo<br>lordo (EUR) |      |
|--------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|------|
| Produzione BRT           | 2.691.630          | 2.898.885           | 15.520.000                     | 5,77 |
| Produzione bus ordinaria | 3.558.710          | 3.761.557           | 14.580.000                     | 4,10 |

La produzione fa riferimento al periodo 2019-2023. Il costo operativo lordo per le linee *Nemo* è di 5,77 per vettura km contro i 4,10 del resto della rete.

#### 5.3.1.3.2. Ginevra

Il gestore della rete è l'azienda cantonale TPG *Transports publics genevois*, che pubblica nel bilancio annuale<sup>17</sup> dati molto dettagliati, linea per linea. La linea di elettrobus è la 23<sup>18</sup>:

| Linea    | Terminali                    | Sviluppo (m) | Fermate | Tempo di<br>percorrenza<br>(minuti) | Velocità<br>commerciale<br>(km/h) |
|----------|------------------------------|--------------|---------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| ligne 23 | Aéroport P47 - Carouge-Tours | 12.133       | 25      | 37,1                                | 19,6                              |

La produzione è la seguente:

| Linea    | Corse per<br>giorno feriale<br>invernale | Corse per<br>giorno feriale<br>estivo | Corse per<br>il sabato | Corse per<br>domenica<br>e festivi | Corse totali<br>per anno | Vetture km<br>anno (2019) |
|----------|------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| ligne 23 | 75                                       | 61                                    | 59                     | 40                                 | 47.150                   | 572.071                   |

<sup>17</sup> <https://www.tpg.ch/fr/rapports-annuels>

<sup>18</sup> <https://www.tpg.ch/fr/lignes/23>

Il costo operativo lordo per tecnologia è il seguente:

|                                 | Vetture km<br>anno | Produzione<br>lorda | Costo operativo<br>lordo (CHF) |       |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|-------|
| Produzione linea 23             | 572.000            | 583.440             | 9.112.636                      | 15,93 |
| Produzione filoviaria ordinaria | 3.714.000          | 3.973.980           | 73.553.654                     | 19,80 |
| Produzione tramviaria           | 4.924.000          | 5.120.960           | 137.392.888                    | 27,90 |
| Produzione bus ordinaria        | 7.090.000          | 7.728.100           | 109.769.643                    | 15,48 |

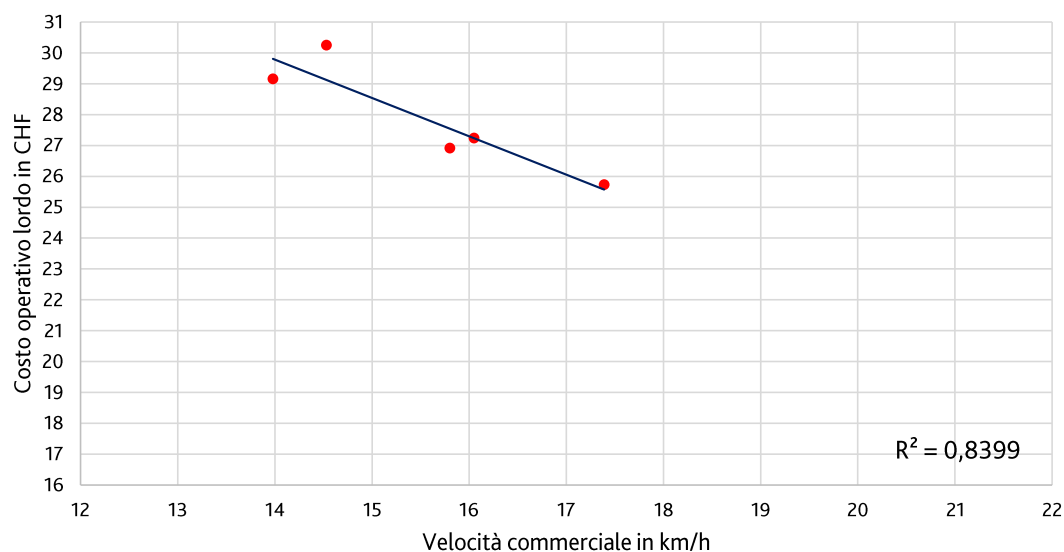
La disponibilità di dati, linea per linea, tecnologia per tecnologia, permette di relazione il costo operativo per vettura km alla velocità commerciale media.

| Réseau urbain      |                                                                                              | Voyages     | Voyages<br>x km | Kilomètres<br>productifs<br>parcourus par<br>les convois |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------------------------------------|
| Lignes principales |                                                                                              | 191.852.000 | 434.039.000     | 16.300.000                                               |
| Tramways           |                                                                                              | 94.416.000  | 209.494.000     | 4.924.000                                                |
| 12                 | Palettes – Bachet-de-Pesay – Carouge – Plainpalais – Bel-Air – Rive – Moillesulaz            | 27.091.000  | 61.418.000      | 1.370.000                                                |
| 14                 | P+R Bernex – Lancy – Jonction – Stand – Bel-Air – Gare Cornavin – Servette – Meyrin-Gravière | 28.670.000  | 69.917.000      | 1.707.000                                                |
| 15                 | Palettes – Grand - Lancy – Acacias – Plainpalais – Stand – Gare Cornavin – Nations           | 20.659.000  | 33.030.000      | 900.000                                                  |
| 17                 | Lancy-Pont-Rouge-Gare – Plainpalais – Bel-Air – Rive – Annemasse-Parc Montessuit             | 486.000     | 1.022.000       | 27.000                                                   |
| 18                 | Bachet-de-Pesay – Carouge – Plainpalais – Bel-Air – Gare Cornavin – Servette – CERN          | 17.510.000  | 44.108.000      | 920.000                                                  |
| Trolleybus         |                                                                                              | 39.178.000  | 81.527.000      | 3.714.000                                                |
| 2                  | Genève-Plage – Place des Eaux-Vives – Bel-Air – Jonction – Onex-Cité                         | 5.552.000   | 10.849.000      | 577.000                                                  |
| 3                  | Gardiol – Servette – Gare Cornavin – Bel-Air – Claparède – Crêts-de-Champel                  | 9.585.000   | 19.092.000      | 740.000                                                  |
| 6                  | Vernier-Village – Charmilles – Gare Cornavin – Rive – Genève-Plage                           | 5.593.000   | 11.471.000      | 582.000                                                  |
| 7                  | Hôpital – Rive – Bel-Air – St-Jean – Lignon                                                  | 4.222.000   | 8.732.000       | 478.000                                                  |
| 10                 | Aéroport – Charmilles – Gare Cornavin – Bel-Air – Rive                                       | 7.013.000   | 15.101.000      | 504.000                                                  |
| 19                 | Vernier – Charmilles – Gare Cornavin – Bel-Air – Jonction – Onex-Cité                        | 7.214.000   | 16.282.000      | 833.000                                                  |
| Autobus            |                                                                                              | 58.258.000  | 143.017.000     | 7.662.000                                                |
| 1                  | Hôpital Trois-Chêne – Gradelle – Hôpital – Plainpalais – Gare Cornavin – Jardin Botanique    | 7.043.000   | 14.410.000      | 739.000                                                  |
| 5                  | Thônex-Vallard – Muséum – Hôpital – Bel-Air – Gare Cornavin – Nations – Palexpo – Aéroport   | 7.072.000   | 20.429.000      | 879.000                                                  |
| 8                  | OMS – Appia – Nations – Gare Cornavin – Rive – Veyrier-Douane / Veyrier-Tournettes           | 9.215.000   | 23.178.000      | 1.002.000                                                |
| 9                  | Petit-Bel-Air – Gradelle – Place des Eaux-Vives – Gare Cornavin – Lignon                     | 7.071.000   | 17.345.000      | 726.000                                                  |
| 11                 | Jardin Botanique – Nations – Jonction – Carouge – Bout-du-Monde                              | 6.243.000   | 12.258.000      | 595.000                                                  |
| 20                 | Place de Neuve – Bel-Air – Gare Cornavin – Nations – Pregny – Chambésy – Colovrex            | 1.222.000   | 3.883.000       | 320.000                                                  |
| 21                 | Cressy – Onex – Lancy-Pont-Rouge – Carouge – Crêts-de-Champel – Gare des Eaux-Vives          | 5.175.000   | 12.898.000      | 718.000                                                  |
| 22                 | Nations – OMS – Petit-Saconnex – Bouchet – Châtelaïne – Lancy – ZIPLO                        | 3.870.000   | 11.366.000      | 645.000                                                  |
| 23                 | Aéroport-P47 – Aéroport – Blandonnet – Lancy – Palettes – Bachet-de-Pesay – Carouge-Tours    | 3.153.000   | 9.684.000       | 572.000                                                  |
| 25                 | Thônex-Vallard – Malagnou – Place des Eaux-Vives – Gare Cornavin – Jardin Botanique          | 5.408.000   | 10.340.000      | 522.000                                                  |
| 28                 | Jardin Botanique – Nations – Aéroport – Blandonnet – Lignon – Les Esserts                    | 1.217.000   | 3.981.000       | 489.000                                                  |
| 47                 | P+R Bernex – Bernex-Vailly – Sézenove – Lully                                                | 547.000     | 906.000         | 144.000                                                  |
| 57                 | Aéroport – Blandonnet – Vernier – Meyrin – Hôpital de La Tour / ZIMEYSA Gare                 | 1.023.000   | 2.339.000       | 311.000                                                  |

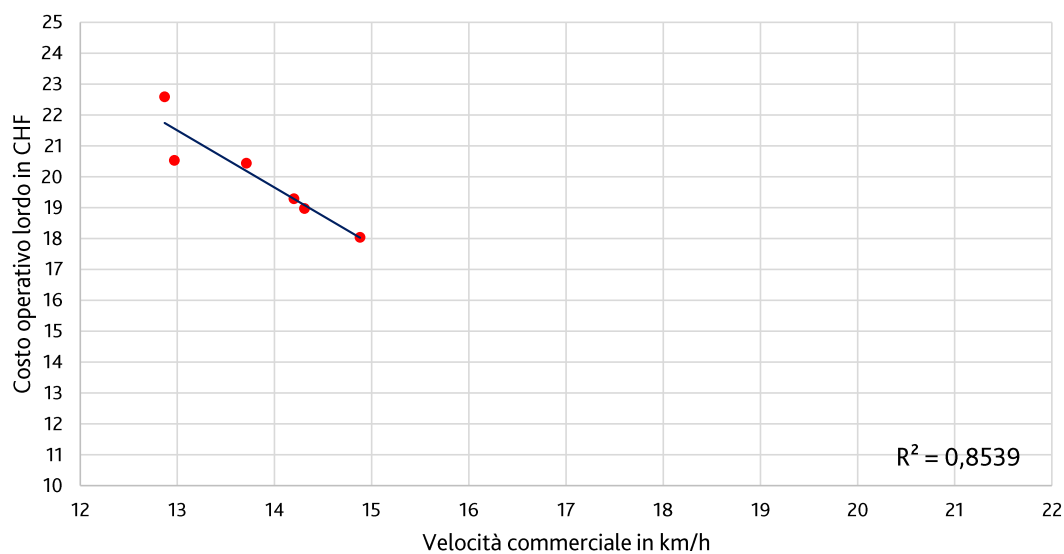


| Réseau urbain             |                                                                                              | Charges<br>(CHF)   | Charges<br>(CHF) voy km | Vitesse<br>commerciale<br>(km/h) |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------------|
| <b>Lignes principales</b> |                                                                                              | <b>329.828.820</b> | <b>20,23</b>            |                                  |
| <b>Tramways</b>           |                                                                                              | <b>137.392.888</b> | <b>27,90</b>            |                                  |
| <b>12</b>                 | Palettes – Bachet-de-Pesay – Carouge – Plainpalais – Bel-Air – Rive – Moillesulaz            | 41.440.417         | 30,25                   | 14,53                            |
| <b>14</b>                 | P+R Bernex – Lancy – Jonction – Stand – Bel-Air – Gare Cornavin – Servette – Meyrin-Gravière | 43.924.731         | 25,73                   | 17,39                            |
| <b>15</b>                 | Palettes – Grand - Lancy – Acacias – Plainpalais – Stand – Gare Cornavin – Nations           | 26.242.329         | 29,16                   | 13,98                            |
| <b>17</b>                 | Lancy-Pont-Rouge-Gare – Plainpalais – Bel-Air – Rive – Annemasse-Parc Montessuit             | 726.637            | 26,91                   | 15,80                            |
| <b>18</b>                 | Bachet-de-Pesay – Carouge – Plainpalais – Bel-Air – Gare Cornavin – Servette – CERN          | 25.058.774         | 27,24                   | 16,05                            |
| <b>Trolleybus</b>         |                                                                                              | <b>73.553.654</b>  | <b>19,80</b>            |                                  |
| <b>2</b>                  | Genève-Plage – Place des Eaux-Vives – Bel-Air – Jonction – Onex-Cité                         | 11.129.496         | 19,29                   | 14,20                            |
| <b>3</b>                  | Gardiol – Servette – Gare Cornavin – Bel-Air – Claparède – Crêts-de-Champel                  | 15.196.061         | 20,54                   | 12,97                            |
| <b>6</b>                  | Vernier-Village – Charmilles – Gare Cornavin – Rive – Genève-Plage                           | 11.044.715         | 18,98                   | 14,31                            |
| <b>7</b>                  | Hôpital – Rive – Bel-Air – St-Jean – Lignon                                                  | 9.771.110          | 20,44                   | 13,71                            |
| <b>10</b>                 | Aéroport – Charmilles – Gare Cornavin – Bel-Air – Rive                                       | 11.386.038         | 22,59                   | 12,87                            |
| <b>19</b>                 | Vernier – Charmilles – Gare Cornavin – Bel-Air – Jonction – Onex-Cité                        | 15.026.234         | 18,04                   | 14,88                            |
| <b>Autobus</b>            |                                                                                              | <b>118.882.279</b> | <b>15,52</b>            |                                  |
| <b>1</b>                  | Hôpital Trois-Chêne – Gradelle – Hôpital – Plainpalais – Gare Cornavin – Jardin Botanique    | 13.006.146         | 17,60                   | 13,82                            |
| <b>5</b>                  | Thônex-Vallard – Muséum – Hôpital – Bel-Air – Gare Cornavin – Nations – Palexpo – Aéroport   | 14.434.349         | 16,42                   | 15,69                            |
| <b>8</b>                  | OMS – Appia – Nations – Gare Cornavin – Rive – Veyrier-Douane / Veyrier-Tournettes           | 16.483.946         | 16,45                   | 16,46                            |
| <b>9</b>                  | Petit-Bel-Air – Gradelle – Place des Eaux-Vives – Gare Cornavin – Lignon                     | 12.286.060         | 16,92                   | 15,47                            |
| <b>11</b>                 | Jardin Botanique – Nations – Jonction – Carouge – Bout-du-Monde                              | 10.469.812         | 17,60                   | 14,16                            |
| <b>20</b>                 | Place de Neuve – Bel-Air – Gare Cornavin – Nations – Pregny – Chambésy – Colovrex            | 4.857.890          | 15,18                   | 18,01                            |
| <b>21</b>                 | Cressy – Onex – Lancy-Pont-Rouge – Carouge – Crêts-de-Champel – Gare des Eaux-Vives          | 11.299.499         | 15,74                   | 15,83                            |
| <b>22</b>                 | Nations – OMS – Petit-Saconnex – Bouchet – Châtelaïne – Lancy – ZIPLO                        | 9.350.601          | 14,50                   | 18,34                            |
| <b>23</b>                 | Aéroport-P47 – Aéroport – Blandonnet – Lancy – Palettes – Bachet-de-Pesay – Carouge-Tours    | 9.112.636          | 15,93                   | 19,63                            |
| <b>25</b>                 | Thônex-Vallard – Malagnou – Place des Eaux-Vives – Gare Cornavin – Jardin Botanique          | 9.189.971          | 17,61                   | 14,89                            |
| <b>28</b>                 | Jardin Botanique – Nations – Aéroport – Blandonnet – Lignon – Les Esserts                    | 3.908.175          | 7,99                    | 19,79                            |
| <b>47</b>                 | P+R Bernex – Bernex-Vailly – Sézenove – Lully                                                | 1.439.935          | 10,00                   | 21,13                            |
| <b>57</b>                 | Aéroport – Blandonnet – Vernier – Meyrin – Hôpital de La Tour / ZIMEYSA Gare                 | 3.043.260          | 9,79                    | 17,79                            |

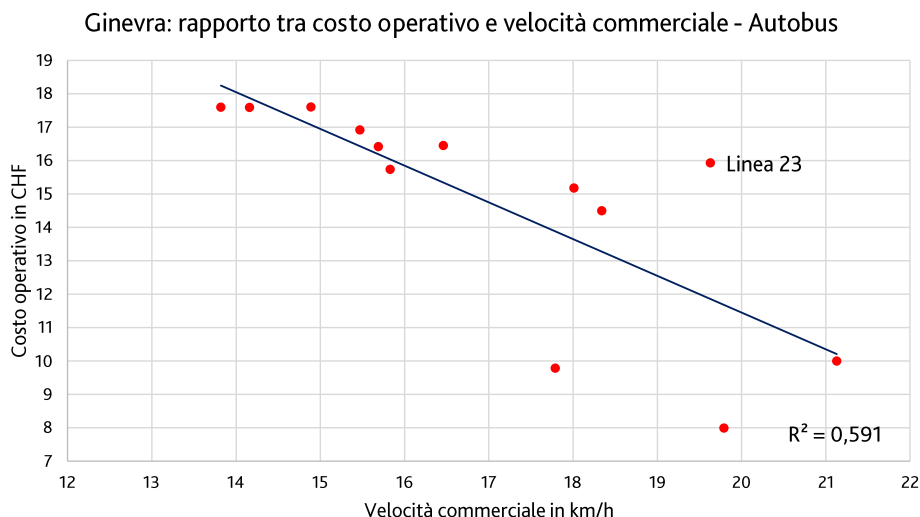
Ginevra: rapporto tra costo operativo e velocità commerciale - Tram



Ginevra: rapporto tra costo operativo e velocità commerciale - Filobus



Per tram e filobus la relazione tra costo operativo lordo e velocità commerciale è relativamente robusta ( $R^2$  maggiore di 0,80). Per gli autobus invece il set ha una maggiore volatilità in relazione alle differenti condizioni operative e alla minore protezione della sede.



Per un servizio con velocità commerciale media di 19,63 km/h il costo ponderato medio sarebbe di 11,92 CHF per vettura km. Quello effettivo della linea 23 risulta di 15,93 con una maggiorazione di 4,01 CHF per vettura km pari al 25,2%.

#### 5.3.1.3.3. Nantes

Gestore della rete è la *Société d'économie mixte des transports en commun de l'agglomération nantaise* (SEMITAN). La linea di elettrobus è la 4<sup>19</sup> (BHNS):

| Linea  | Terminali                         | Sviluppo (m) | Fermate | Tempo di percorrenza (minuti) | Velocità commerciale (km/h) |
|--------|-----------------------------------|--------------|---------|-------------------------------|-----------------------------|
| BHNS 4 | Foch Cathédrale - Porte de Vertou | 7.120        | 16      | 19,5                          | 21,9                        |

La produzione è la seguente:

| Linea  | Corse per giorno feriale invernale | Corse per giorno feriale estivo | Corse per il sabato | Corse per domenica e festivi | Corse totali per anno | Vetture km anno (2019) |
|--------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| BHNS 4 | 203                                | 167                             | 126                 | 73                           | 119.570               | 851.338                |

Il costo operativo lordo per tecnologia è il seguente:

|                          | Vetture km anno | Produzione lorda | Costo operativo lordo (EUR) |      |
|--------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|------|
| Produzione linea BHNS 4  | 851.338         | 996.066          | 5.661.400                   | 6,65 |
| Produzione tramviaria    | 5.351.119       | 5.565.164        | 47.357.402                  | 8,85 |
| Produzione bus ordinaria | 24.217.543      | 26.518.209       | 117.635.997                 | 4,86 |

<sup>19</sup> <https://www.tan.fr/fr/la-ligne-4-se-met-en-4>



#### 5.3.1.3.4. Modello di costo standard per le busvie elettriche

Nel modello il costo standard unitario (cioè, per vettura-km offerto al pubblico)  $CS_E$  è dato dal rapporto tra la sommatoria dei costi (annui) delle diverse aree, comprensivo del costo del capitale investito netto, e le percorrenze totali (annue) di servizio:

$$CS_E = \frac{C_E + C_M + C_S + C_G + C_F}{\Pi}$$

Dove:

- $C_E$  è il costo delle principali attività dell'area di esercizio

$$C_E = C_{pg} + C_{pm} + C_w + C_r + C_{ms}$$

$C_{pg}$  è il costo del personale di guida

$$C_{pg} = NPG \cdot 44017 \cdot 0,90 = \frac{\Pi}{1196 \cdot v \cdot 0,90} \cdot 39615$$

$C_{pm}$  è il costo di altro personale di movimento

$$C_{pm} = NPG \cdot 0,0793$$

$C_w$  è il costo di energia di trazione

$$C_w = \Pi \cdot 0,6456$$

$C_r$  è il costo per i rotabili, tra ammortamenti e canoni di affitto/leasing, assumendo una percorrenza massima di 45.000 km/anno:

$$C_r = NT \cdot 135 \cdot AMM = \frac{\Pi}{45.000} \cdot 135 \cdot AMM$$

dove si assume  $AMM = 230$  ammortamento standard per posto, comprensivo del valore attuale della manutenzione programmata capitalizzata (ai sensi dell'allegato 4 al DM157).

$C_{ms}$  è il costo per la manutenzione di esercizio, pulizia, vigilanza e sicurezza dei rotabili

$$C_{ms} = NT \cdot 28820 = \frac{\Pi}{45.000} \cdot 28820$$

- $C_M$  è il costo delle principali attività di manutenzione di esercizio, pulizia vigilanza e sicurezza dell'area infrastruttura

$$C_M = \Pi \cdot 0,47$$

- $C_S$  è il costo di utilizzazione degli impianti dell'infrastruttura, comprensivo o meno del costo della relativa manutenzione straordinaria

$$C_S = 23976 \cdot \lambda = 23976 \cdot 10$$

- $C_G$  è il costo comprensivo di tutti i costi generali (tra cui le principali attività dell'area amministrativa) e di altri costi industriali non considerati in altre voci di costo

$$C_G = (C_E + C_M) \cdot 0,12$$

- $C_F$  è il costo del capitale investito netto

$$C_F = WACC \cdot \left[ NT \cdot 135 \cdot AMM \cdot \left( \frac{30}{2} + 1 \right) \right]$$

dove si assume  $AMM = 230$  e WACC costo medio ponderato del capitale, assunto pari a quanto indicato dalla delibera ART 32/2024, 8,47% (pretax). La minore capacità delle vetture – 135 anziché i 140 posti delle altre tecnologie - tiene conto dei modelli attualmente disponibili sul mercato.

- $\Pi$  è il numero di vetture-km di servizio.

### 5.3.2. Modello di comparazione economica

Le tecnologie analizzate sono le seguenti:

- Autosnodato da 18 metri con trazione diesel Euro6;
- Autosnodato da 18 metri con trazione a gas naturale;
- Filosnodato da 18 metri;
- Elettrosnodato da 18 metri;
- Tram da 30-35 metri.

Il riferimento è il 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<sup>20</sup>”. Il DM definisce i costi standard unitari, determinati con il metodo statistico della regressione, mediante il quale è definita, in applicazione dell’articolo 1, comma 84, della legge 27 dicembre 2013, n. 147, la funzione di costo standard unitario.

La vita media di riferimento per il parco rotabile è di 15 anni per gli autosnodati; 20 anni per filo- ed elettrosnodati; 25 anni per il tram.

#### 5.3.2.1. Costi di realizzazione e acquisto del parco rotabile

Nel confronto si assumono i seguenti costi lineari, a raso, al netto di eventuali opere d’arte:

- Busvia: 2.500 euro per metro; 550.000 euro per autosnodato da 18 metri
- Filovia: 5.500 euro per metro; 1.000.000 euro per filiosnodato da 18 metri
- Elettrovia: 3.500 euro per metro; 1.200.000 euro per elettrosnodato da 18 metri
- Tranvia: 14.500 euro per metro; 3.200.000 euro per tram da 30-35 metri

Tali costi sono da considerarsi al lordo delle spese tecniche e di tutte le spese amministrative (cosiddette “*somme a disposizione*” dell’Amministrazione).

#### 5.3.2.2. Confronto dei costi finanziari

Nei grafici seguenti i risultati del modello per i soli costi finanziari di realizzazione ed esercizio per anno di vita utile del sistema:

---

<sup>20</sup> Si veda: <http://www.mit.gov.it/normativa/decreto-ministeriale-numero-157-del-28032018>

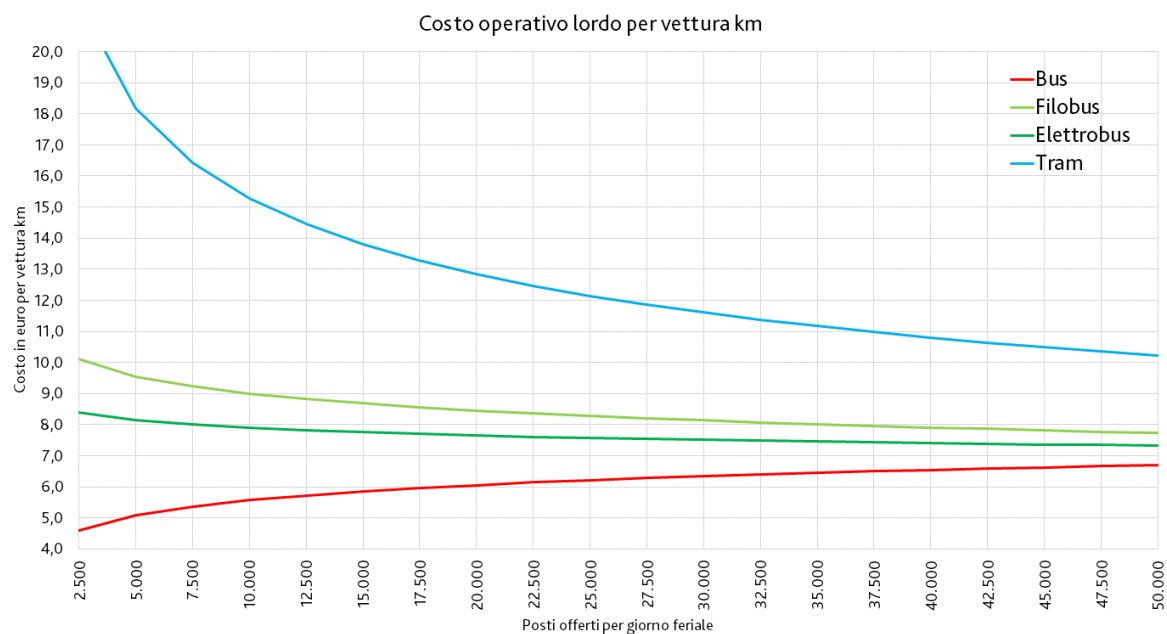


Fig. 41 - Costo operativo lordo per vettura km (o tram km) offerti su un corridoio di 10 km di lunghezza

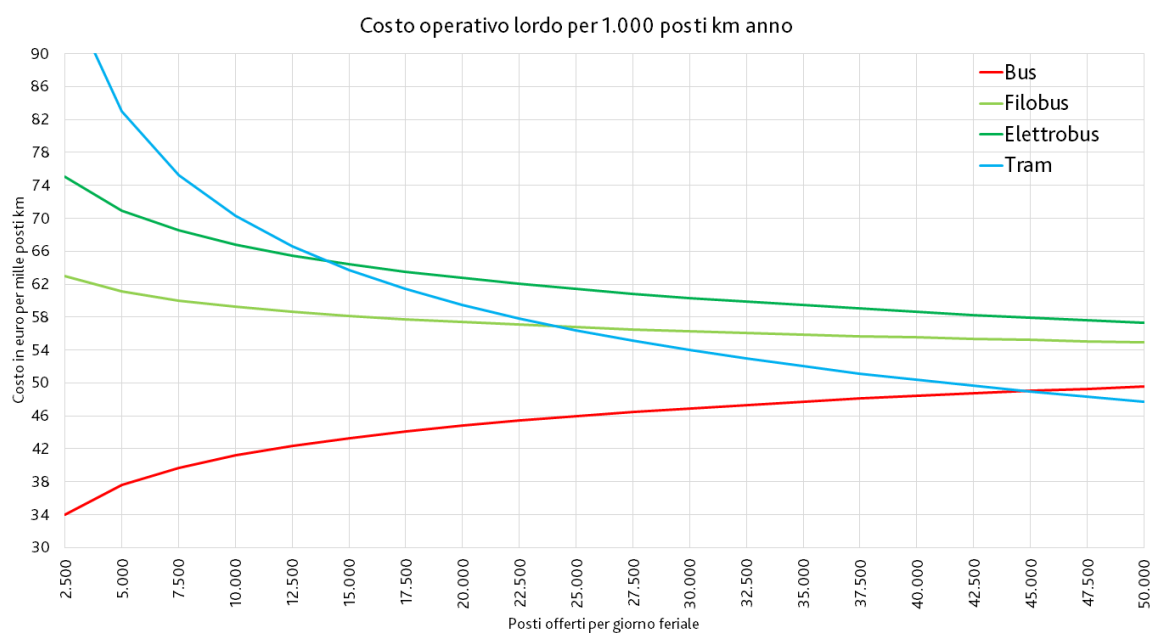


Fig. 42 – Costo operativo lordo per 1.000 posti km anno offerti su un corridoio di 10 km di lunghezza

Il costo finanziario complessivo, per anno di vita utile del sistema è costituito dalla somma dei costi di realizzazione del corridoio, acquisto del parco rotabile, esercizio e manutenzione ordinaria ed è esemplificato nel grafico seguente.



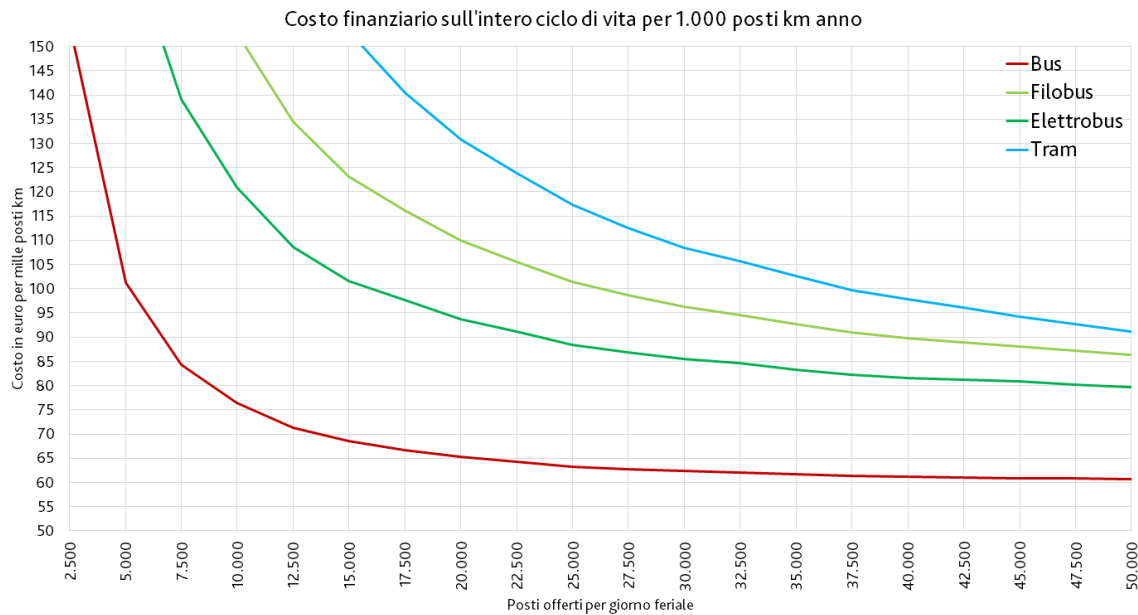


Fig. 43 - Costo finanziario sull'intero ciclo di vita per 1.000 posti km anno offerti su un corridoio di 10 km di lunghezza

### 5.3.2.3. Costi economici

Ricordano che il corridoio ha lunghezza  $\lambda$  pari a 10 km e data la velocità commerciale  $v$  [km/h] il tempo di giro di una vettura è:

$$\tau = \frac{10}{v} \cdot 60 \cdot 2 + 5 \text{ [minuti]}$$

Come nel caso della comparazione finanziaria, la domanda giornaliera è definita come  $\Phi$  ed equivalente alla domanda stimata per un giorno feriale. La domanda oraria massima per senso di marcia, ovvero quella in ora di punta, è definita come:

$$\varphi = 0,85 \cdot 0,15 \cdot \Phi$$

Il numero orario di passaggi  $\eta$  è calcolato sulla capacità  $\chi$  definita dalla densità massima di 4 persone al m<sup>2</sup>, ovvero: 110 posti per gli snodati da 18 metri; 210 passeggeri per il tram con lunghezza compresa tra 30 e 35 metri; 980 posti per la metropolitana con treni da 120 metri.

$$\eta = \frac{\varphi}{\chi}$$

Dove si assume la condizione di realismo, ovvero la possibilità che la frequenza di servizio calcolata sia effettivamente realizzabile:

$$\eta \geq 1,50 \text{ minuti}$$

Tale condizione non vale per la metropolitana che ha invece un limite inferiore di 1,0 minuto (condizione comunque non toccata dal presente modello). Qualora la suddetta condizione sia limitante ovvero la domanda sia superiore a quella offerta dal corridoio di progetto il modello considera una ripartizione *business-as-usual* ovvero la domanda in esubero è assorbita dal servizio di trasporto ordinario calcolato come spostamenti su una lunghezza  $k \cdot \lambda$  (dove  $k$  è una maggiorazione della percorrenza assunta pari al 20%) in autobus a trazione diesel.

Il parco rotabile di progetto risulterà

$$P = \frac{\tau}{\eta} \cdot 2$$

La domanda eventualmente in esubero è servita da un parco integrativo di ampiezza stimata nello stesso modo di quello di progetto.

#### 5.3.2.4. Emissioni climalteranti

Il descrittore è rappresentato dalle emissioni di CO2 equivalente. I fattori emissivi sono:

- Autosnodato diesel: 1.225 g per vettura km (Euro VI)
- Autosnodato a metano: 1.820 g per vettura km (Euro VI)
- Elettricità da rete: 437<sup>21</sup> g per kWh

Per quanto concerne gli assorbimenti specifici:

- Elettrosnodato (autosnodato elettrico): 2,80 kWh per vettura km
- Filosnodato: 2,50 kWh per vettura km
- Tram da 30-35 metri: 3,30 kWh per vettura km

Il costo sociale di riferimento delle emissioni climalteranti è quello MIT<sup>22</sup> di 95,323 euro per tonnellata.

#### 5.3.2.5. Incidentalità

Da una disamina a livello nazionale<sup>23, 24</sup>, si assumono i seguenti coefficienti di lesività:

- sistemi su gomma in sede riservata e protetta: 30 per milione di posti km
- tram in sede riservata e protetta: 25 per milione di posti km

Il costo di riferimento è di euro 54.842 euro (2020<sup>25</sup>).

#### 5.3.2.6. Emissioni aerodisperse dei prodotti della combustione

Come descrittori si assumono gli ossidi di azoto e il particolato sottile. Si assumono i seguenti coefficienti emissivi:

- Ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>)
  - Autosnodato diesel: 0,4216 g per vettura km (Euro VI)
  - Autosnodato a metano: 3,3215 g per vettura km (Euro VI)
  - Elettricità da rete: 0,2274 g per kWh equivalente
- Particolato sottile (PM10)
  - Autosnodato diesel: 0,1275 g per vettura km (Euro VI)
  - Autosnodato a metano: 0,1426 g per vettura km (Euro VI)
  - Elettricità da rete: 0,0540 g per kWh equivalente

La lesività delle emissioni è stimata come costo attribuito all'aumento di 1 µg/m<sup>3</sup> delle concentrazioni equivalenti E di PM10 in un volume atmosferico di riferimento di 25 metri per lato dal corridoio e 10 metri di altezza. Le emissioni equivalenti  $\varepsilon_{EQ}$  sono:

$$\varepsilon_{EQ} = (10 \cdot \varepsilon_{NOX} + \varepsilon_{PM10}) \cdot \theta \cdot \delta$$

<sup>21</sup> Si veda anche Sinanet, Fattori di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica in Italia: <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-la-produzione-ed-il-consumo-di-energia-elettrica-in-italia/view>

<sup>22</sup> Tale valore è assunto per il calcolo benefici-costi per l'Avviso presentazione istanze per accesso risorse trasporto rapido di massa: <http://www.mit.gov.it/documentazione/addendum-all-avviso-presentazione-istanze-per-accesso-risorse-trasporto-rapido-di>

<sup>23</sup> Si vedano i rapporti annuali MIT: <http://www.mit.gov.it/index.php/node/9443>

<sup>24</sup> Si vedano i rapporti annuali Istat: <https://www.istat.it/it/archivio/4609>

<sup>25</sup> MIT 2020, Costi sociali dell'incidentalità stradale:

[https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/documentazione/2022-05/Costo%2BSociale\\_2020\\_fin.pdf](https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/documentazione/2022-05/Costo%2BSociale_2020_fin.pdf)

Dove:

- $\varepsilon_{NOX}$  è il coefficiente emissivo degli ossidi di azoto
- $\varepsilon_{PM10}$  è il coefficiente emissivo del particolato sottile
- Il fattore moltiplicativo 10 tiene conto della maggiore patogenicità degli ossidi di azoto rispetto al particolato sottile
- $\theta$  è il fattore legato all'altezza di emissione

$$\theta_0 = 1 - \log(0,20 \cdot h)$$

$\theta = \theta_0$  se  $\theta_0 > 1$  altrimenti vale 1;  $h$  è assunto pari a 3,20 metri da terra per la trazione termica, 15 metri per la produzione in centrale (camino di rilascio)

- $\delta$  è il fattore legato alla densità territoriale nella zona di rilascio delle emissioni stesse rispetto alla soglia di 1.000 ab/km<sup>2</sup> assunta nel calcolo dei costi sociali dell'inquinamento

$$\delta = \frac{\delta_{REF}}{1.000}$$

Dove  $\delta_{REF}$  è assunta pari a 2.000 ab/km<sup>2</sup> per il corridoio di studio e 350 ab/km<sup>2</sup> per la zona di produzione dell'energia elettrica.

Le concentrazioni equivalenti sono determinate per milione di posti km offerti:

$$E = \frac{\varepsilon_{EQ} \cdot 10^6}{1000 \cdot 25 \cdot 10}$$

Assumendo un costo sanitario annuo (media attesa sul periodo di studio ripartita per anno di servizio) di 1.500 euro per incremento di 1,0 µg/m<sup>3</sup> delle concentrazioni equivalenti  $E$  di PM10. Il costo sanitario annuo [sulle patologie di asma, BCO<sup>26</sup> e neoplasie come in (s)] per incremento di 1,0 µg/m<sup>3</sup> è:

$$\text{Danno sanitario inquinamento} = E \cdot 1.500 \text{ [euro]}$$

Si trovano i seguenti valori di riferimento [euro per posto km offerto] per il campo trasportistico di studio:

- Autosnodato diesel: 0,49774
- Autosnodato a metano: 3,82298
- Elettrosnodato: 0,11407
- Filosnodato: 0,0977
- Tramvia: 0,0806

### 5.3.2.7. Impatto acustico

Si assume un livello acustico di riferimento (giornaliero, come indicato nelle strategie europee e nei piani di risanamento acustico) pari a 60 dB(A). I fattori di emissività specifica  $r$  [ad 1 metro di distanza dal margine esterno della vettura] sono i seguenti:

- Autosnodato diesel: 87,5
- Autosnodato a metano: 87,5
- Elettrosnodato: 69,0
- Filosnodato: 69,0
- Tramvia: 64,0

Il delta emissivo  $\Delta_p$  per posto km è così calcolato:

$$\Delta_p = 10 \cdot \log\left(\frac{r^2}{60^2}\right) \cdot \frac{1}{p} \cdot V$$

<sup>26</sup> Bronchite cronica-ostruttiva

Dove

- $p$  è il numero di posti totali della vettura o treno
- $V$  è il volume di riferimento per l'impatto pari a una sezione di 5 metri di altezza e 12,5 metri di larghezza per lato dal margine più esterno della via di corsa

Il delta emissivo  $\Delta_p^G$  per milione di posti km è calcolato come:

$$\Delta_p^G = \Delta_p \cdot \frac{10^6}{365}$$

Il costo annuo [*annoyance* e ipertensione arteriosa, come in (s)] è stimato in 350.000 per incremento di dB(A) per milione di posti km:

$$\text{Danno sanitario rumore} = \Delta_p^G \cdot 350.000 \quad [\text{euro}]$$

Si trovano i seguenti valori di riferimento [euro per posto km offerto] per il campo trasportistico di studio:

- Autosnodato diesel: 0,05237
- Autosnodato a metano: 0,05237
- Elettrosnodato: 0,02021
- Filosnodato: 0,01940
- Tramvia: 0,00562

#### 5.3.2.8. Energia grigia di realizzazione

Per quanto concerne gli impianti elettrici, dall'esame della letteratura indica in bibliografia ovvero dalle verifiche condotte a Ginevra per il TOSA e a Zurigo, nell'ambito del progetto<sup>27</sup> di VBZ "SwissTrolley plus" sono stati assunti i seguenti fattori emissivi (kg CO<sub>2EQ</sub>/kg):

- Rame: 4,80
- Acciaio: 6,15
- Alluminio: 11,89
- Fibra di vetro: 2,60
- Calcestruzzo: 0,75
- Litio: 19,50
- Cobalto: 27,00
- Nickel: 12,00
- Grafite: 5,00

Per il dimensionamento dei pacchi batteria per trazione autonoma nel modello sono stati assunti i seguenti fattori basati sulla tipologia litio-ossidi di cobalto (LCO):

|                         |         |            |
|-------------------------|---------|------------|
| Tipo LiCoO <sub>2</sub> | 5,00    | kg per kWh |
| Litio                   | 2,25    | kg per kWh |
| Cobalto                 | 2,75    | kg per kWh |
| Grafite                 | 1,10    | kg per kWh |
| Costo                   | 130-145 | \$/kWh     |
| Vita media              | 5,0-7,0 | mila cicli |

Nel confronto trazione a filo/trazione autonoma le considerazioni di letteratura (g) impongono estrema cautela nell'estendere tal quale il costo attribuito alle emissioni climalteranti prodotte nei cicli di combustione (locale o differita). L'impatto delle attività minerarie, per esempio, sulle popolazioni

<sup>27</sup> Verkehrsbetriebe Zürich: [www.swisstrolleyplus.ch](http://www.swisstrolleyplus.ch) ; <https://vbzonline.ch/2017/01/17/hier-fahrt-die-zukunft/>



povere in termini di perdita di terreni arabili oltre che abbassamento della aspettativa di vita dei capifamiglia portano a stime di costo comprese tra 1,2 e 2,0 volte quelle assunte per le emissioni direttamente aerodisperse. In questa sede si assumono i seguenti parametri:

- valore economico della CO<sub>2EQ</sub> prodotta: 120 euro per tonnellata (fattore incrementale 1,26)
- quantità di materia recuperabile a fine vita: 67% (85% terre rare, 25% materiali ordinari)

Il modello stima anche la quota di energia grigia necessaria alla realizzazione delle opere civili, degli impianti e del parco rotabile. Per la via di corsa l'energia grigia necessaria è stimata sulla quantità di calcestruzzo impiegata sulla sezione corrente della via di corsa:

|                    | <b>Sezione netta<br/>della via di<br/>corsa (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Sezione corrente</b>                                                      |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Autosnodato diesel | 2,80                                                            | Sezione a doppia corsia. Corsia da 350 cm più 50 di banchina. Spessore 35 cm |
| Autosnodato metano | 2,80                                                            | Sezione a doppia corsia. Corsia da 350 cm più 50 di banchina. Spessore 35 cm |
| Elettrosnodato     | 2,80                                                            | Sezione a doppia corsia. Corsia da 350 cm più 50 di banchina. Spessore 35 cm |
| Filobus            | 2,80                                                            | Sezione a doppia corsia. Corsia da 350 cm più 50 di banchina. Spessore 35 cm |
| Tram               | 5,25                                                            | Sezione a doppia via da 650 cm più franco laterale da 50. Spessore 70 cm     |

Tab. 44 - Via di corsa: descrizione della sezione corrente

Per quanto riguarda il parco rotabile si considera il contributo emissivo per tipo di materiale (o equivalenti in termini di energia grigia richiesta):

|                    | <b>Lunghezza<br/>vettura o<br/>treno (mm)</b> | <b>Tara (kg)</b> | <b>Materiali principali costituenti le vetture</b> |                  |             |                           |                 | <b>Totale</b> |
|--------------------|-----------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------------|-----------------|---------------|
|                    |                                               |                  | <b>Acciaio</b>                                     | <b>Alluminio</b> | <b>Rame</b> | <b>Fibra di<br/>vetro</b> | <b>Plastica</b> |               |
| Autosnodato diesel | 18.000                                        | 27.000           | 37%                                                | 25%              | 7%          | 8%                        | 17%             | 94%           |
| Autosnodato metano | 18.000                                        | 27.000           | 35%                                                | 27%              | 8%          | 9%                        | 15%             | 94%           |
| Elettrosnodato     | 18.000                                        | 25.200           | 30%                                                | 29%              | 14%         | 7%                        | 14%             | 94%           |
| Filobus            | 18.000                                        | 22.500           | 31%                                                | 29%              | 13%         | 7%                        | 14%             | 94%           |
| Tram               | 32.500                                        | 43.875           | 29%                                                | 33%              | 15%         | 9%                        | 8%              | 94%           |

Tab. 45 - Parco rotabile: dimensioni, peso e materiali caratteristici

Per la linea di contatto e i relativi sostegni la caratterizzazione è riportata nella tabella seguente:

|                    | <b>Materiali e pesi della linea di contatto<br/>e relativi supporti (kg/km)</b> |             |                       |                |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|----------------|
|                    | <b>Acciaio</b>                                                                  | <b>Rame</b> | <b>Fibra di vetro</b> | <b>Cemento</b> |
| Autosnodato diesel | 0                                                                               | 0           | 0                     | 0              |
| Autosnodato metano | 0                                                                               | 0           | 0                     | 0              |
| Elettrosnodato     | 0                                                                               | 0           | 0                     | 0              |
| Filobus            | 13.680                                                                          | 423.968     | 2.000                 | 221.760        |
| Tram               | 12.730                                                                          | 106.027     | 2.000                 | 133.100        |

Tab. 46 - Linea di contatto e supporti: per la metropolitana la parte di supporto è inglobata nella sezione corrente

### 5.3.2.9. *Bibliografia di riferimento*

#### 5.3.2.9.1. Determinazione dei costi del trasporto urbano di massa

- a) 2004, ITA Working Group Number 13, **Underground or aboveground? Making the choice for urban mass transit systems - A report by the International Tunnelling Association (ITA). Prepared by Working Group Number 13 (WG13). 'Direct and indirect advantages of underground structures'**, Tunnelling and Underground Space Technology 19 (2004) 3–28
- b) 2008, Bent Flyvbjerg, Nils Bruzelius, Bert van Wee, **Comparison of Capital Costs per Route-Kilometre in Urban Rail**, EJTIR, 8, no. 1 (2008), pp. 17-30
- c) 2018, Peter E.D. Lovea, Dominic D. Ahiaga-Dagbui, **Debunking fake news in a post-truth era: The plausible untruths of cost underestimation in transport infrastructure projects**, Transportation Research Part A 113 (2018) 357–368
- d) 2018, Bent Flyvbjerg, Atif Ansara, Alexander Budziera, Søren Buhl, Chantal Cantarellic, Massimo Garbuio, Carsten Glentinge, Mette Skamris Holmf, Dan Lovallod, Daniel Lunng, Eric Molinh, Arne Rønnessi, Allison Stewartj, Bert van Wee, **Five things you should know about cost overrun**, Transportation Research Part A 118 (2018) 174–190
- e) 2019, Peter E.D. Lovea, Michael C.P. Singb, Lavagnon A. Ikac, Sidney Newton, **The cost performance of transportation projects: The fallacy of the Planning Fallacy account**, Transportation Research Part A 122 (2019) 1–20

#### 5.3.2.9.2. Analisi dei costi del trasporto elettrico di massa

- f) 2013, AA.VV., **Etude comparative trolleybus-bus hybrids**, Transitec Ingénieurs-Conseils SA per il Service de l'urbanisme et de l'environnement Ville de La Chaux-de-Fonds, Novembre 2013
- g) 2016, Moataz Mahmoud, Ryan Garnett, Mark Ferguson, Pavlos Kanaroglou, **Electric buses: A review of alternative powertrains**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 62 (2016) 673–684
- h) 2016, A. Ritter, P. Elbert, C. Onder, **Energy Saving Potential of a Battery-Assisted Fleet of Trolley Buses**, IFAC-PapersOnLine 49-11 (2016) 377–384
- i) 2016, Patrick Jochem, Claus Doll, Wolf Fichtner, **External costs of electric vehicles**, Transportation Research Part D 42 (2016) 60–76
- j) 2016, Nam P. Suh, Dong Ho Cho, **Wireless Electric Ground Transportation Systems**, Springer - The On-line Electric Vehicle
- k) 2016, Young Jae Jang, Eun Suk Suh, Jong Woo Kim, **System Architecture and Mathematical Models of Electric Transit Bus System Utilizing Wireless Power Transfer Technology**, IEEE Systems Journal, vol. 10, n. 2, Giugno 2016
- l) 2017, Gert Berckmans, Maarten Messagie, Jelle Smekens, Noshin Omar, Lieselot Vanhaverbeke, Joeri Van Mierlo, **Cost Projection of state-of-the-art Lithium-Ion Batteries for electric vehicles up to 2030**, Energies 2017, 10, 1314; doi:10.3390/en10091314
- m) 2017, D. Connolly, **Economic viability of electric roads compared to oil and batteries for all forms of road transport**, Energy Strategy Reviews 18 (2017) 235e249
- n) 2017, Zicheng Bi, Robert De Kleine, Gregory A. Keoleian, **Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Model for Comparing Plug-in versus Wireless Charging for an Electric Bus System**, Yale University, Journal of Industrial Ecology, DOI: 10.1111/jiec.12419
- o) 2017, Fan Tonga, Chris Hendricksonb, Allen Biehlerd, Paulina Jaramillo, Stephanie Seki, **Life cycle ownership cost and environmental externality of alternative fuel options for transit buses**, Transportation Research Part D 57 (2017) 287–302
- p) 2017, Mia Romare, Lisbeth Dahllöf, **The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries**, IVL Swedish Environmental Research Institute 2017, ISBN 978-91-88319-60-9
- q) 2017, **Roadmap to climate-friendly land freight and buses in Europe**, European Federation for Transport and Environment AISBL, Transport & Environment, Giugno 2017
- r) 2017, A. Spinosa, **Enhanced financial analysis to evaluate mass transit proposals in terms of contribution on resilience increasing of urban systems**, in Dell'Acqua G., Wegman F. (2017, a cura di), Transport Infrastructure and Systems: Proceedings of the AIIT International Congress on

Transport Infrastructure and Systems (Rome, Italy, 10-12 April 2017), CRC Press, Taylor & Francis Group

- s) 2018, AA.VV., **Electric Buses in Cities**, Bloomberg Finance L.P. 2018
- t) 2018, Maria Xylia, Sylvain Leduc, Achille-B. Laurent, Piera Patrizio, Yvonne van der Meer, Florian Kraxner, Semida Silveira, **Impact of bus electrification on carbon emissions: the case of Stockholm**, Journal of Cleaner Production, 10.1016/j.jclepro.2018.10.085
- u) 2018, Matthias Roggea, Evelien van der Hurkc, Allan Larsenc, Dirk Uwe Sauer, **Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure**, Applied Energy 211 (2018) 282–295
- v) 2018, Antti Lajunen, **Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods**, Journal of Cleaner Production 172 (2018) 56e67

#### 5.3.2.9.3. Morbilità degli inquinanti urbani

- w) 2006, E. Samoli, E. Aga, G. Touloumi, K. Nisiotis, B. Forsberg, A. Lefranc, J. Pekkanen, B. Wojtyniak, C. Schindler, E. Niciu, R. Brunstein, M. Dodič Fikfak, J. Schwartz, K. Katsouyanni, **Short-term effects of nitrogen dioxide on mortality: an analysis within the APHEA project**, European Respiratory Journal 2006 27: 1129-1138; DOI: 10.1183/09031936.06.00143905
- x) 2018, Richard. W. Atkinson, Barbara. K. Butland, H. Ross. Anderson, Robert. L. Maynardc, **Long-term Concentrations of Nitrogen Dioxide and Mortality - A Meta-analysis of Cohort Studies**, Epidemiology. 2018 Jul; 29(4): 460–472
- y) 2018, Miri M., Alahabadi A., Ehrampush MH., Rad A., Lotfi MH., Sheikha MH., Sakhvidi MJZ., **Mortality and morbidity due to exposure to ambient particulate matter**, Ecotoxicol Environ Saf. 2018 Dec 15; 165:307-313. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.012. Epub 2018 Sep 8.

### 5.3.3. Risultati sull'impianto di progetto

I risultati sono espressi in **costo annuo per milione di posti km sull'intero ciclo di vita dell'opera**. Le tecnologie sono suddivise tra due famiglie:

- TCSP: Trasporto collettivo in sede propria;
- TC: Trasporto collettivo in sede promiscua.

Di seguito il quadro finale dell'analisi comparativa, sul costo annuo complessivo per milione di posti km sull'intero ciclo di vita dell'opera.

|      |                                           | Costo<br>totale per<br>milione di<br>posti km | Δ rispetto<br>all'opzione<br>più efficace |
|------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| TCSP | Autosnodato diesel Euro6                  | 1.514.824                                     | 278%                                      |
|      | Autosnodato metano                        | 1.701.740                                     | 324%                                      |
|      | Autosnodato elettrico                     | 462.650                                       | 15,4%                                     |
|      | Filobus                                   | 424.478                                       | 5,8%                                      |
|      | Tram                                      | 401.058                                       | ---                                       |
|      | Metropolitana prevalentemente in galleria | 1.241.835                                     | 210%                                      |
| TC   | Autosnodato diesel Euro6 su strada        | 2.055.064                                     | 412%                                      |

Fig. 44 - Sintesi dell'analisi comparativa sul costo annuo complessivo per milione di posti km sull'intero ciclo di vita dell'opera

La tramvia è l'alternativa tecnologica con i migliori parametri economici complessivi valutati *dalla culla alla tomba*. Lo scarto con il la filovia è del +5,8%; con il BRT elettrico è del +15,4%. Il distacco con la trazione a metano è dovuto alla maggiore emissività di NOX rispetto al diesel a parità di kWh prodotti ovvero alla correlazione tra cancro al polmone, leucemie, mielomi e concentrazione degli ossidi di azoto.








**La scelta tramviaria non è legata alla sola applicazione di medio termine alla città di Pisa ma alle possibili estensioni, anche come servizio ferroviario leggero, all'area vasta:** per approfondimenti si veda il successivo capitolo 6.

Di seguito sono riportate le tabelle per ciascuna delle voci di costo considerate.










### 5.3.3.1. Costo operativo

Di seguito i costi operativi e il costo di acquisto del parco rotabile espressi in costo annuo per milione di posti km sull'intero ciclo di vita dell'opera.

|                                           |        |                                                                                    |
|-------------------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Autosnodato diesel Euro 6                 | 27.312 |  |
| Autosnodato metano                        | 27.312 |  |
| Autosnodato elettrico                     | 50.013 |  |
| Filobus                                   | 51.603 |  |
| Tram                                      | 53.603 |  |
| Metropolitana prevalentemente in galleria | 27.041 |  |
| Autosnodato diesel Euro 6 su strada       | 27.312 |  |








### 5.3.3.2. Costo capitale

Di seguito i costi di realizzazione e il costo capitale totale (con i costi operativi e di acquisto del parco rotabile) espressi in costo annuo per milione di posti km sull'intero ciclo di vita dell'opera.








|                                           |        |                                                                                      |
|-------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Autosnodato diesel Euro 6                 | 7.143  |    |
| Autosnodato metano                        | 7.778  |    |
| Autosnodato elettrico                     | 11.111 |   |
| Filobus                                   | 8.036  |  |
| Tram                                      | 11.636 |  |
| Metropolitana prevalentemente in galleria | 680    |   |
| Autosnodato diesel Euro 6 su strada       | 7.143  |  |

### 5.3.3.3. Costo economico








Di seguito i costi per ciascuna voce ambientale e sociale. Si inizia con le emissioni climalteranti indotte in fase di costruzione ed esercizio.

|                                           |       |                                                                                      |
|-------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Autosnodato diesel Euro 6                 | 834   |  |
| Autosnodato metano                        | 1.239 |  |
| Autosnodato elettrico                     | 1.080 |  |
| Filobus                                   | 744   |  |
| Tram                                      | 625   |  |
| Metropolitana prevalentemente in galleria | 742   |  |
| Autosnodato diesel Euro 6 su strada       | 834   |  |







Di seguito i costi legati all'incidentalità.

|                                           |         |                                                                                    |
|-------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Autosnodato diesel Euro 6                 | 187.611 |  |
| Autosnodato metano                        | 187.611 |  |
| Autosnodato elettrico                     | 187.611 |  |
| Filobus                                   | 187.611 |  |
| Tram                                      | 156.342 |   |
| Metropolitana prevalentemente in galleria | 145.919 |   |
| Autosnodato diesel Euro 6 su strada       | 750.443 |  |







Di seguito i costi legati al rilascio di inquinanti aerodispersi (in loco e in remoto, alla centrale di produzione dell'energia elettrica).

|                                           |           |                                                                                      |
|-------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Autosnodato diesel Euro 6                 | 1.222.147 |    |
| Autosnodato metano                        | 1.408.021 |    |
| Autosnodato elettrico                     | 115.883   |     |
| Filobus                                   | 99.771    |     |
| Tram                                      | 83.808    |     |
| Metropolitana prevalentemente in galleria | 99.530    |     |
| Autosnodato diesel Euro 6 su strada       | 1.222.147 |  |

Di seguito i costi legati alle emissioni acustiche prodotte durante la costruzione e l'esercizio.

|                                           |        |                                                                                      |
|-------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Autosnodato diesel Euro 6                 | 46.763 |  |
| Autosnodato metano                        | 46.763 |  |
| Autosnodato elettrico                     | 17.964 |  |
| Filobus                                   | 17.322 |  |
| Tram                                      | 5.090  |   |
| Metropolitana prevalentemente in galleria | 0      |                                                                                      |
| Autosnodato diesel Euro 6 su strada       | 46.763 |  |

Di seguito i costi legati all'energia grigia assorbita per la produzione dei materiali legati alla realizzazione dell'opera, dei veicoli e delle parti di ricambio durante la vita utile.

|                                           |        |                                                                                      |
|-------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Autosnodato diesel Euro 6                 | 4.814  |   |
| Autosnodato metano                        | 4.816  |   |
| Autosnodato elettrico                     | 53.588 |  |
| Filobus                                   | 4.791  |   |
| Tram                                      | 5.473  |   |
| Metropolitana prevalentemente in galleria | 93.823 |  |
| Autosnodato diesel Euro 6 su strada       | 423    |   |

## 6. Possibili scenari d'Area vasta

La scelta di un impianto tramviario per la città di Pisa, si presta, nelle more dell'Accordo di Area Vasta della piana costiera dell'Arno si presta alla pianificazione di una articolata rete integrata tra le province di Pisa, Lucca e Livorno sfruttando rami ferroviari secondari anche alla luce della nuova norma ANSFISA<sup>28</sup> sui servizi ferroviari leggeri.

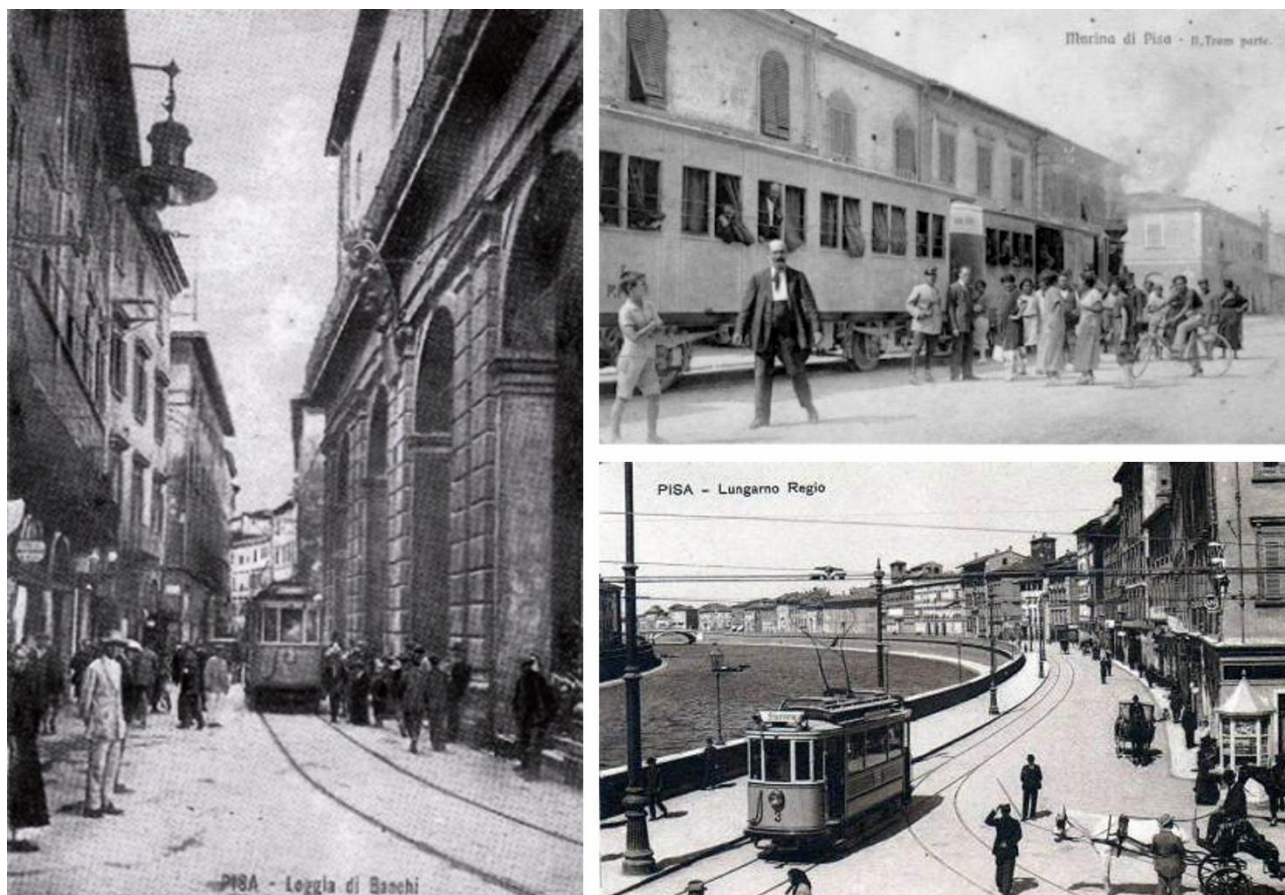


Fig. 45 – Foto storiche delle tramvie pisane (cartoline da collezioni private)

### 6.1. Cenni storici

#### 6.1.1. Pisa

Con sedute del consiglio comunale di Pisa del 12 e 18 agosto 1909, l'amministrazione cittadina decise di avviare le trattative per la concessione di un servizio di tram elettrici. Dopo una serie di consultazioni fu accordata alla Società Anonima Elettrocità Toscana (SAET), filiale della tedesca Siemens-Halske che gestiva la distribuzione di energia elettrica in città.

La provincia approvò una integrazione alla convenzione in essere e il relativo capitolato tecnico e il giorno 11 giugno 1910 la stessa venne sottoscritta. L'accordo prevedeva che alla scadenza della concessione con la SAET per la distribuzione di energia elettrica questa venisse unificata a quella per il servizio tramviario e prorogata fino al 1941. In cambio il concessionario si impegnavano alla realizzazione della nuova rete.

<sup>28</sup> Norme per l'autorizzazione e per l'esercizio dei veicoli tram-treno, [https://www.ansfisa.gov.it/infopoint/-/asset\\_publisher/g3JwulyjTNku/content/consultazione-pubblica-su-norme-per-l-autorizzazione-e-per-l-esercizio-dei-veicoli-tram-treno](https://www.ansfisa.gov.it/infopoint/-/asset_publisher/g3JwulyjTNku/content/consultazione-pubblica-su-norme-per-l-autorizzazione-e-per-l-esercizio-dei-veicoli-tram-treno)

L'autorizzazione alla costruzione ed esercizio di due linee destinate a congiungere la stazione ferroviaria principale con il Duomo e Porta a Piagge, fu sancita con Regio decreto n.1284 del 12 novembre 1911. I lavori erano iniziati il 6 maggio dello stesso anno e già il 19 gennaio 1912 si poté attuare il collaudo degli impianti.

Il servizio fu avviato il 25 gennaio: alle 12 in punto il sindaco Francesco Buonamici montò sulla prima carrozza del tramvai elettrico, inaugurando ufficialmente un servizio che riscosse unanime successo e stimolando la definizione di piani di potenziamento che a causa della parentesi bellica furono momentaneamente accantonati. Con Deliberazione podestarile del 16 febbraio 1928 venne infine autorizzato l'ampliamento della rete, che vide dunque l'estensione delle linee 1 e 2 e la costruzione della nuova linea 3 La Cella-Porta a Lucca. Nel 1930 la separazione del servizio tranviario da quello elettrico, nel frattempo passato alla SELT-Valdarno, portò allo scorporo della SAET che, con il nuovo nome di Società Tramvie Elettriche di Toscana (STET), divenne una controllata della SITA. Nel 1933 una variante della linea 3 portò all'eliminazione della tratta piazza Ceci-San Bernardino. Stessa sorte per il prolungamento a nord di San Bernardino.

Il decennio 1933-1943 proseguì senza eventi di rilievo fino alle pesanti distruzioni indotte dai bombardamenti alleati durante la Seconda guerra mondiale, che causarono gravissimi danni agli impianti e al materiale rotabile. Nonostante le sovvenzioni accordate alla STET la ricostruzione progredì lentamente finché con atto del 31 gennaio 1948 fu rescissa anticipatamente la convenzione con la stessa portando all'esercizio diretto da parte del Comune di Pisa attraverso la neocostituita Azienda Tranviaria Urbana Municipale (ATUM). ATUM che concluse la ricostruzione delle linee 1 e 2 così com'erano, fatto salvo un by pass realizzato lungo via Crispi che accorciava la lunghezza della seconda linea. L'obsolescenza degli impianti e la volontà di attuare velocemente modifiche di tracciato, unita ad un orientamento prevalente non favorevole ai sistemi su rotaia portò alla decisione di sostituire la tranvia con una nuova rete filoviaria. Nel 1950 iniziavano così le prime corse filoviarie mentre si procedeva alla graduale chiusura della rete tranviaria. Nel luglio 1952, con la soppressione dell'ultimo tratto della linea 3, finiva la stagione tranviaria di Pisa.

### 6.1.2. Livorno

Dopo anni di accese discussioni e innumerevoli proposte, nel 1879 Auguste Charles, un imprenditore belga domiciliato a Parigi avanzò la proposta di costruire una linea tranviaria ippotrainata. Il comune approntò l'anno successivo un capitolato di gara che, dopo l'approvazione provinciale, portò all'aggiudicazione allo stesso Charles della relativa concessione; questa, relativa ad una alla costruzione ed esercizio di una tranvia a cavalli dalla porta di San Marco all'Ardenza. I lavori di costruzione della linea iniziarono nel novembre 1880 sulla direttrice via Palestro-via Garibaldi-piazza Grande-via Grande-lungomare e il 22 maggio 1881 il servizio poté già essere inaugurato a cura della Société Anonyme des Tramways de Livourne (SATL).

Il servizio proseguì non senza problemi, a causa della forte contrarietà manifestata dai vetturini da piazza nei confronti del nuovo mezzo di trasporto che rompeva il loro monopolio e che sfociò talora in attentati e manifestazioni di violenza. La prima linea a trazione elettrica, la San Marco-Antignano con diramazione per Ardenza Mare che misurava in totale 8,64 km fu solennemente inaugurata il 14 ottobre 1897. Fece seguito l'attivazione della San Marco-San Jacopo, di 4,65 km, il 6 novembre successivo. Il 3 luglio 1901 sia aggiunse, sempre a trazione elettrica, il collegamento con Montenero e tre anni dopo, nel 1904 venne aggiunta la linea da piazza Grande per Acque della Salute. Inoltre, all'inizio del 1905 la SATL fu autorizzata ad esercitare la linea che dalla via Palestro raggiungeva il termine della via Erbosa, passando per Barriera Garibaldi.

Il 15 maggio 1908 si aggiunse alla rete la linea delle Pianacce Antignano-Montenero, realizzata ed esercita dalla Società Livornese di Trazione Elettrica (SLTE). La SLTE era stata fondata nel 1906 allo



scopo di collegare Montenero con tranvia e una funicolare. Nel il 9 marzo 1909 venne attivata la nuova linea piazza Grande-Colline, autorizzata con Regio decreto n. CCCXXII del 28 agosto. L'anno successivo il capolinea di Acque della Salute fu spostato fino all'anello costruito sul piazzale della nuova stazione di Livorno Centrale, inaugurata il 3 luglio 1910. La massima estensione della rete, pari a 28,88 km di binari (lunghezza di esercizio pari a 35,81 km) fu raggiunta nel 1917. Nel 1930 la rete tranviaria arrivò a comprendere 7 linee.

Il servizio iniziò un periodo di rapido declino, tanto che nel 1935, mentre avanzavano i lavori di realizzazione della rete filoviaria, restavano in esercizio le due sole linee P (piazza orlando-Cimiteri Comunali) e G (piazza Orlando-via Pisana). Tali cambiamenti rientravano in una strategia complessiva messa in atto dal Comune che trovava peraltro resistenze da parte della SATL: per questo motivo in quello stesso anno la SATL fu posta in liquidazione e il comune, acquisiti i beni di tale azienda, affidò il servizio alla Società Trasporti Urbani (STU) di Milano, legata al gruppo Fiat, in qualità di società delegataria del riordino e della completa trasformazione del trasporto urbano di Livorno; quest'ultima subentrò alla SATL il 3 gennaio 1935. Il colpo di grazia per la rete tranviaria arrivò con i bombardamenti del 1943: gravemente danneggiate, le due linee non furono mai più ripristinate.



Fig. 46 – Livorno e il tram (cartoline da collezioni private)

### 6.1.3. Le tramvie extraurbane

Il tram storicamente non era limitato ai soli centri urbani ma sovente era scelto per la realizzazione di linee vicinali. La **tranvia Pisa-Pontedera/Calci**, inaugurata nel 1884 (la diramazione per Calci risaliva al 1887), rappresentò per decenni il principale strumento di collegamento e sviluppo economico della piana pisana. Il traffico passeggeri sull'impianto si attestò subito su buoni livelli, grazie alla frequenza delle fermate in grado di servire il territorio in maniera più capillare rispetto alle 3 stazioni presenti sulla parallela ferrovia Leopolda. Ugualmente intenso era il traffico delle merci, originato prevalentemente

dagli opifici presenti nella zona di Pontedera e dalle cave di Caprona. I materiali erano per lo più destinati a Navacchio, dove era presente un raccordo con lo scalo merci ferroviario, e a Pisa, dove era presente un nodo di interscambio con il canale dei Navicelli per le merci dirette a Livorno.

Abbandonati i progetti di elettrificazione a causa degli elevati costi che questa avrebbero comportato e delle condizioni economiche peggiorate dopo la Prima guerra mondiale, fra il 1924 ed il 1925 fu sperimentata sulla Pisa-Pontedera una locomotiva Diesel elettrica dotata di motore Daimler-Benz, progettata appositamente per le linee secondarie dimostrò tuttavia scarsi risultati a causa della tecnologia ancora arretrata dell'epoca.

Le devastazioni della Seconda guerra mondiale non risparmiarono la tranvia. Il 15 settembre 1949 l'amministrazione provinciale comunicò alla SAIET l'intenzione di riscattare linea ed impianti: l'anno successivo la stessa, attraverso la propria Azienda Trasporti Interprovinciali Pisa (ATIP), subentrò dunque nell'esercizio della Pisa - Pontedera, che venne gradualmente ridotto in favore dei servizi di autocorse nel frattempo istituiti e cessò definitivamente nel 1953.



Fig. 47 – Ingresso del trammino a Pisa

La **tranvia Pisa-Marina di Pisa**, inaugurata nel 1892, rappresentò il principale strumento di sviluppo dell'abitato delle frazioni costiere. Il 12 gennaio 1891 la Società Italiana per le Ferrovie Economiche e Tramvie a Vapore della Provincia di Pisa (PPC) presentò domanda al comune di Pisa per la costruzione e l'esercizio di una linea tranviaria che, come prolungamento della Pisa-Pontedera/Calci già in esercizio, avrebbe consentito un collegamento veloce con la frazione di Marina di Pisa. L'avvio dell'esercizio sul nuovo impianto, costruito in tempi molto brevi, avvenne il 18 giugno 1892, in tempo per l'avvio della stagione balneare. La linea facilitò una significativa espansione dell'abitato di Marina. Il traffico si attestò ben presto su livelli molto elevati, tanto da suscitare sulla stampa locale critiche all'indirizzo della PPC, il cui parco trazione era costituito solo da 6 locomotive impiegate anche sulla linea per

Pontedera/Calci suscitando qualche problema di disponibilità. Il 5 maggio 1922 la tranvia finì tristemente sui giornali: una travata del ponte metallico sul canale di Navicelli crollò durante il passaggio di un treno misto causando una vittima. Attivata ormai la parallela ferrovia elettrica per Tirrenia e Livorno, l'esercizio sulla tranvia cessò nel novembre 1932.



Fig. 48 – Livorno, stazione di capolinea della ferrovia costiera

#### 6.1.4. La ferrovia costiera Pisa – Tirrenia – Livorno

A partire dal settembre del 1892, prese servizio una tranvia a vapore che collegava Pisa con il suo Litorale pisano: la Pisa-Marina di Pisa, affettuosamente chiamata **trammino**. Intorno al 1920, sulla spinta data dal repentino sviluppo turistico del litorale pisano, si iniziò a discutere di smantellare la linea tranviaria esistente per sostituirla con una moderna linea elettrificata, che avrebbe costituito il naturale prolungamento della tranvia Pisa-Pontedera, anch'essa interessata da un progetto di elettrificazione. La società PPC (Società Italiana per le Ferrovie Economiche e Tramvie a Vapore della Provincia di Pisa) propose quindi un progetto che prevedeva anche il proseguimento della linea fino a Tirrenia, Calambrone e Livorno. Iniziati i lavori, il 21 settembre 1932 venne inaugurato il primo tratto della nuova linea che andava da Pisa a Marina. Il 16 novembre dello stesso anno, la linea fu estesa fino a Calambrone. Grazie all'intervento dell'allora ministro Costanzo Ciano, i problemi finanziari nei quali si era trovata la società costruttrice, nel frattempo divenuta STEFET, vennero risolti e la linea fu completata il 26 agosto 1935 con l'arrivo dei binari al capolinea di Livorno Barriera Margherita, di fronte all'Accademia Navale. Completata la linea, le finanze della STEFET rimasero tuttavia alquanto dissestate anche a causa della necessità, non prevista, di effettuare diversi interventi necessari al transito della linea dentro l'abitato di Livorno. Grazie all'intervento delle Ferrovie Torino Nord (FTN), alle quali la STEFET era associata, l'esercizio della linea poté proseguire. L'importanza della ferrovia divenne



rapidamente evidente: ed essendo stata costruita con criteri, per l'epoca, d'avanguardia, avrebbe potuto permettere un servizio cumulativo con le Ferrovie dello Stato, ma la cosa non ebbe seguito.

Al termine della guerra, la linea risultava estremamente danneggiata. Ad aggravare la situazione vi furono nuovi problemi finanziari a ritardare la ricostruzione: la SAJET, nuova denominazione della STEFET, si era infatti separata dalla FTN e rimase quindi praticamente priva di fondi. A causa di ciò, il primo tratto di linea, da Pisa a Marina, poté essere riattivato solo l'11 luglio del 1946, ma esclusivamente con trazione a vapore o diesel. Gli USA, intanto, si appropriarono del tratto di ferrovia tra Marina e Calambrone per utilizzarlo durante l'allestimento di quella che sarebbe diventata in seguito la base NATO di Camp Darby. Solo quando i militari liberarono la linea, nell'autunno del 1947, la ricostruzione poté ripartire permettendo così alla ferrovia di raggiungere di nuovo Calambrone.

Nel frattempo, la ricostruzione dell'ultimo tratto di linea fino al capolinea di Livorno Barriera Margherita, molto osteggiata dai cittadini, incontrava non poche difficoltà, tant'è vero che fino al 1951 vi fu un servizio di automotrici fino alla stazione FS di Livorno Centrale, trasformato in seguito in una linea di autobus che da Calambrone raggiungevano il centro cittadino e non la stazione di Barriera Margherita. Ma il destino della linea era ormai segnato. Dopo alterne vicende, il Ministero dei Trasporti revocò l'autorizzazione al piano di ammodernamento e impose la sostituzione del servizio su rotaia con uno su gomma. Il 15 settembre 1960, il treno percorse per l'ultima volta la ferrovia.

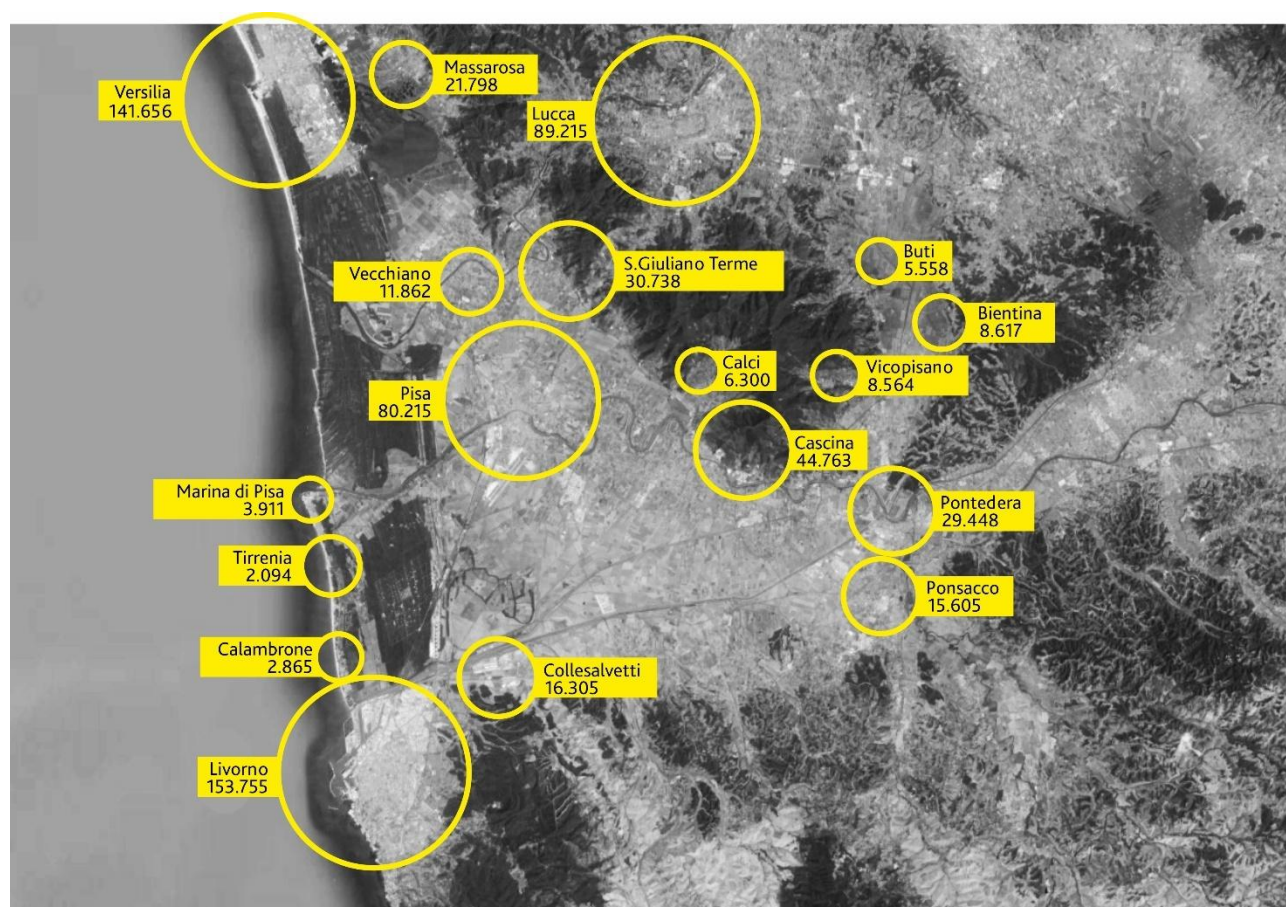


Fig. 49 – L'area costiera compresa tra Livorno, Pisa e Lucca ospita un'area metropolitana policentrica di circa 650 mila abitanti (Istat, popolazione al 1° gennaio 2024)

## 6.2. Prospettive di sviluppo d'Area vasta

Il tram è stato una presenza importante sia a Pisa che a Livorno. Soprattutto ha svolto una indiscussa azione strutturante dello sviluppo urbano dalla piana dell'Arno alla costa livornese. Un assetto



demografico che si è consolidato intorno a linee di trasporto su ferro per poi, una volta assunto un carattere urbano, restare privo di una offerta di trasporto affidabile ed efficiente.

**È lecito allora chiedersi se, alla luce delle nuove esigenze di efficienza e resilienza urbana, sarebbe sostenibile la reintroduzione di servizi tranviari urbani e periurbani?**

Le tabelle alle figure 47 e 48 mostrano l'evoluzione degli spostamenti interzonali nell'area vasta della piana costiera compresa tra la Versilia, Lucca e Livorno con un incremento stimato al 2030 dagli attuali 1,945 milioni di spostamenti giornalieri a 2,180 milioni.

Inquadrare la tramvia pisana in progetto, dal potenziamento del sistema delle LAM urbane all'estensione come servizi ferroviari leggeri d'Area vasta amplierebbe il bacino d'utenza grazie alla captazione di una domanda latente di trasporto pubblico che oggi i servizi su gomma non riescono a intercettare, per proprio limite strutturale. I corridoi di possibile sviluppo sono 4:

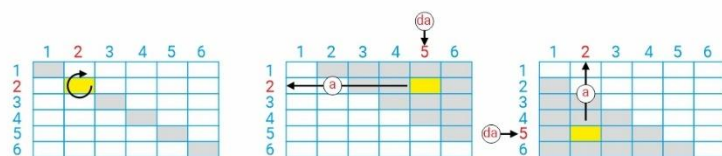
- 1) Lungo la direttrice Cisanello-Cascina-Pontedera, in affiancamento alla linea ferroviaria Leopolda;
- 2) Lungo la direttrice San Rossore – San Giuliano Terme – Lucca, in affiancamento o con uso della ferrovia Pisa-Lucca;
- 3) Lungo la direttrice Stazione – Marina di Pisa – Tirrenia – Livorno, con parziale recupero del sedime dismesso del *Trammino*;
- 4) Lungo la direttrice Pisa San Rossore – Viareggio, in affiancamento alla tratta Pisa – Viareggio della linea tirrenica oppure come riuso in chiave di servizi ferroviari leggeri della ferrovia Lucca – Viareggio (come ulteriore sviluppo della direttrice di cui al punto 2).

La domanda potenziale attraiibile da questo sistema integrato si attesta (nello scenario demografico attuale) in 104.370 passeggeri per giorno feriale ovvero ben 32,5 milioni di passeggeri annui, con un incremento del 124% rispetto ai passeggeri trasportati dalla somma dei servizi di trasporto pubblico locale nella stessa area di studio.

Le successive figg. 50-54 dettagliano le valutazioni preliminari delle sopra elencate possibili direttrici di sviluppo di una rete ferroviaria leggera d'Area vasta per la piana pisana.

Tab. 47 – Matrice aggregata degli spostamenti giornalieri (periodo scolastico) al 2023

|                      | Pisa    | Pontedera | Livorno | Lucca   | Viareggio | Massa-Carrara | La Spezia | Pistoia | Firenze   | Empoli  | Costa degli Etruschi | Piombino | Elba    |           |
|----------------------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------------|-----------|---------|-----------|---------|----------------------|----------|---------|-----------|
| Pisa                 | 55,765  | 10,580    | 13,643  | 15,029  | 15,063    | 8,748         | 6,004     | 5,616   | 5,892     | 7,004   | 9,084                | 5,745    | 5,585   |           |
| Pontedera            | 5,361   | 41,110    | 4,726   | 5,832   | 5,602     | 3,255         | 2,568     | 3,327   | 4,700     | 7,978   | 4,155                | 3,455    | 3,330   |           |
| Livorno              | 7,483   | 5,115     | 84,106  | 4,354   | 4,978     | 4,217         | 3,235     | 2,767   | 3,593     | 4,245   | 10,468               | 4,581    | 4,261   |           |
| Lucca                | 9,279   | 7,106     | 4,901   | 59,789  | 5,452     | 4,975         | 5,222     | 7,645   | 3,750     | 3,340   | 3,581                | 3,653    | 2,819   |           |
| Viareggio            | 7,942   | 5,829     | 4,785   | 4,656   | 79,363    | 5,552         | 6,094     | 4,176   | 2,692     | 2,463   | 3,238                | 3,303    | 2,512   |           |
| Massa-Carrara        | 2,731   | 2,005     | 2,400   | 2,515   | 3,288     | 57,682        | 8,581     | 1,910   | 1,888     | 1,529   | 2,104                | 2,237    | 1,833   |           |
| La Spezia            | 2,318   | 1,956     | 2,277   | 3,265   | 4,462     | 10,611        | 61,697    | 2,482   | 2,639     | 2,419   | 2,678                | 2,712    | 2,967   |           |
| Pistoia              | 4,306   | 5,033     | 3,867   | 9,492   | 6,072     | 4,691         | 4,928     | 76,038  | 16,979    | 14,765  | 4,501                | 4,413    | 4,783   |           |
| Firenze              | 6,723   | 10,581    | 7,473   | 6,929   | 5,824     | 6,898         | 7,799     | 25,269  | 536,331   | 13,410  | 5,950                | 7,154    | 6,531   |           |
| Empoli               | 3,097   | 6,962     | 3,423   | 2,392   | 2,066     | 2,166         | 2,770     | 8,516   | 5,197     | 73,576  | 2,868                | 2,940    | 2,371   |           |
| Costa degli Etruschi | 3,569   | 3,221     | 7,498   | 2,279   | 2,413     | 2,648         | 2,726     | 2,307   | 2,049     | 2,548   | 54,211               | 6,204    | 3,427   |           |
| Piombino             | 212     | 251       | 308     | 218     | 231       | 264           | 259       | 212     | 231       | 245     | 581                  | 33,410   | 1,088   |           |
| Elba                 | 345     | 406       | 480     | 282     | 294       | 363           | 475       | 385     | 354       | 331     | 539                  | 1,827    | 32,047  |           |
| Totale               | 272,889 | 195,554   | 283,290 | 238,544 | 267,713   | 202,773       | 214,841   | 300,518 | 1,233,167 | 252,197 | 199,058              | 119,144  | 111,682 | 1,945,685 |



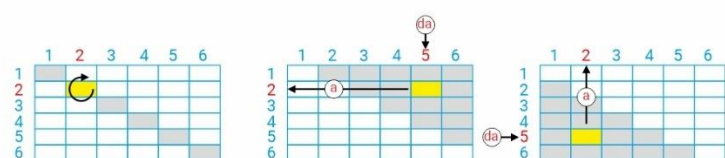
in giallo il valore degli spostamenti giornalieri che si svolgono all'interno del perimetro amministrativo della località B  
in giallo il valore degli spostamenti giornalieri che si svolgono da 5 (origine) verso 2 (destinazione)  
in giallo il valore degli spostamenti giornalieri che si svolgono da 2 (origine) a 5 (destinazione)

chiave: **lettura** della matrice

si tratta di una matrice unidirezionale degli spostamenti

Tab. 48 – Matrice aggregata degli spostamenti giornalieri (periodo scolastico) proiettata al 2030

|                      | Pisa    | Pontedera | Livorno | Lucca   | Viareggio | Massa-Carrara | La Spezia | Pistoia | Firenze   | Empoli  | Costa degli Etruschi | Piombino | Elba    |           |
|----------------------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------------|-----------|---------|-----------|---------|----------------------|----------|---------|-----------|
| Pisa                 | 57,804  | 11,015    | 14,204  | 15,647  | 15,682    | 9,108         | 6,251     | 5,847   | 6,135     | 7,292   | 9,457                | 5,981    | 5,815   |           |
| Pontedera            | 6,823   | 52,303    | 6,014   | 7,422   | 7,129     | 4,142         | 3,268     | 4,233   | 5,981     | 10,152  | 5,287                | 4,396    | 4,237   |           |
| Livorno              | 8,038   | 5,495     | 91,727  | 4,677   | 5,347     | 4,530         | 3,475     | 2,972   | 3,859     | 4,560   | 11,244               | 4,921    | 4,577   |           |
| Lucca                | 11,061  | 8,471     | 5,842   | 71,163  | 6,499     | 5,930         | 6,225     | 9,113   | 4,470     | 3,981   | 4,269                | 4,355    | 3,361   |           |
| Viareggio            | 8,513   | 6,248     | 5,129   | 4,991   | 86,172    | 5,952         | 6,532     | 4,476   | 2,885     | 2,640   | 3,471                | 3,541    | 2,693   |           |
| Massa-Carrara        | 3,053   | 2,242     | 2,683   | 2,812   | 3,675     | 64,678        | 9,593     | 2,136   | 2,110     | 1,709   | 2,352                | 2,501    | 2,049   |           |
| La Spezia            | 2,640   | 2,228     | 2,593   | 3,718   | 5,081     | 12,084        | 70,275    | 2,826   | 3,005     | 2,754   | 3,050                | 3,089    | 3,379   |           |
| Pistoia              | 5,243   | 6,128     | 4,709   | 11,559  | 7,393     | 5,712         | 6,000     | 92,557  | 20,675    | 17,979  | 5,480                | 5,374    | 5,823   |           |
| Firenze              | 7,243   | 11,399    | 8,050   | 7,464   | 6,274     | 7,431         | 8,401     | 27,222  | 589,215   | 14,447  | 6,409                | 7,707    | 7,036   |           |
| Empoli               | 3,653   | 8,212     | 4,037   | 2,822   | 2,437     | 2,555         | 3,268     | 10,046  | 6,131     | 86,993  | 3,383                | 3,468    | 2,796   |           |
| Costa degli Etruschi | 3,792   | 3,422     | 7,966   | 2,421   | 2,563     | 2,813         | 2,896     | 2,451   | 2,177     | 2,707   | 57,902               | 6,592    | 3,641   |           |
| Piombino             | 236     | 280       | 343     | 243     | 257       | 294           | 289       | 236     | 258       | 273     | 648                  | 37,720   | 1,214   |           |
| Elba                 | 352     | 414       | 489     | 288     | 300       | 370           | 484       | 393     | 361       | 338     | 550                  | 1,863    | 34,804  |           |
|                      |         |           |         |         |           |               |           |         |           |         |                      |          |         |           |
| Totale, 2030         | 288,689 | 239,244   | 309,208 | 279,967 | 292,052   | 227,192       | 243,679   | 359,140 | 1,355,560 | 295,626 | 214,845              | 133,799  | 122,431 | 2,180,716 |
| Totale, 2015         | 272,889 | 195,554   | 283,290 | 238,544 | 267,713   | 202,773       | 214,841   | 300,518 | 1,233,167 | 252,197 | 199,058              | 119,144  | 111,682 | 1,945,685 |
|                      | 5.8%    | 22.3%     | 9.1%    | 17.4%   | 9.1%      | 12.0%         | 13.4%     | 19.5%   | 9.9%      | 17.2%   | 7.9%                 | 12.3%    | 9.6%    | 12.1%     |



In giallo il valore degli spostamenti giornalieri che si svolgono all'interno del perimetro amministrativo della località B  
In giallo il valore degli spostamenti giornalieri che si svolgono da 5 (origine) verso 2 (destinazione)  
In giallo il valore degli spostamenti giornalieri che si svolgono da 2 (origine) a 5 (destinazione)

chiave: **lettura** della matrice  
si tratta di una matrice unidirezionale degli spostamenti



Fig. 50 – Sviluppo del sistema tramviario di Pisa con servizi ferroviari leggeri (tipo *tram-treno*) d'Area vasta





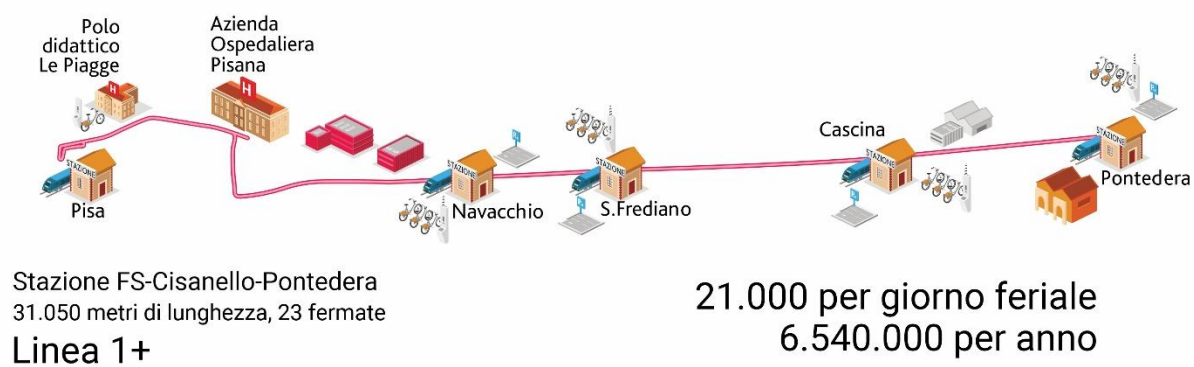
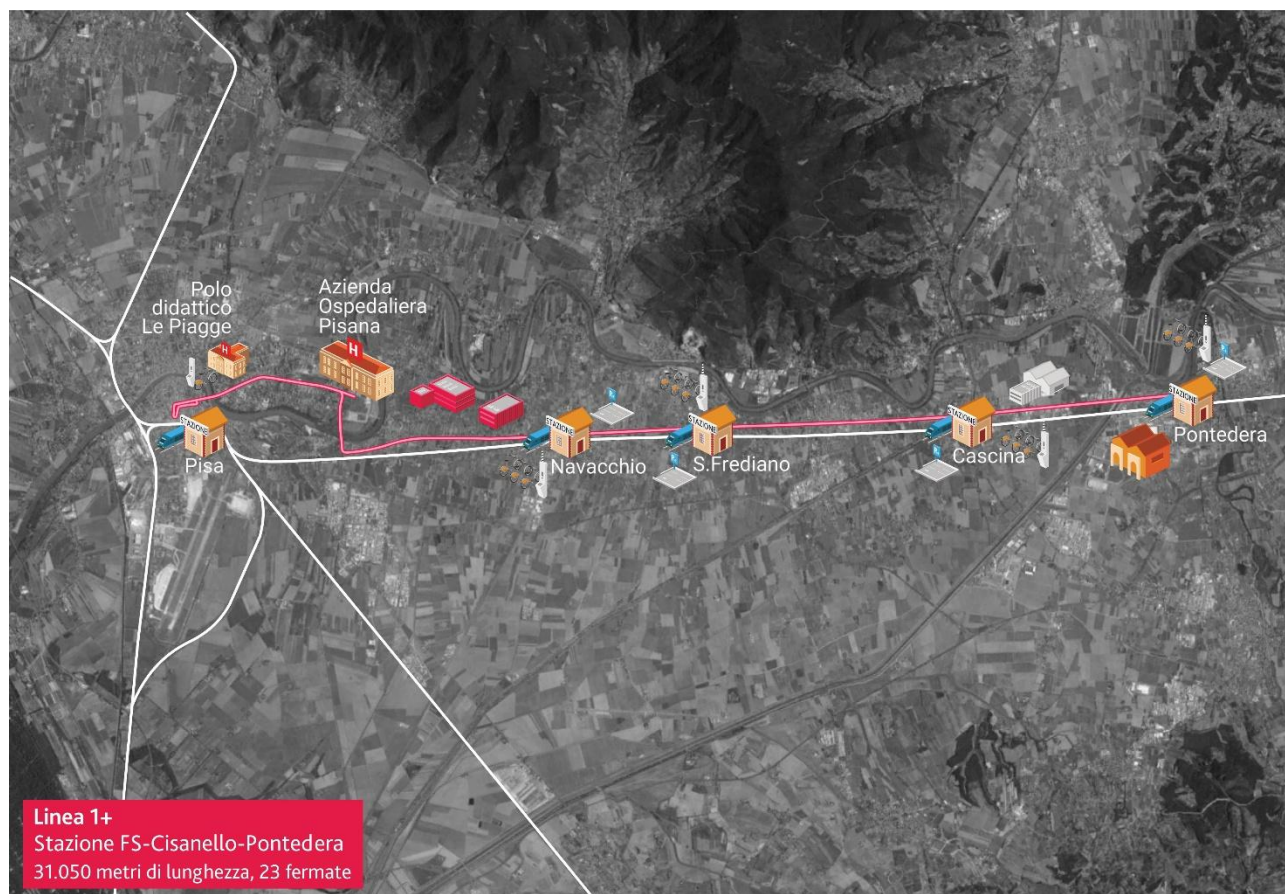


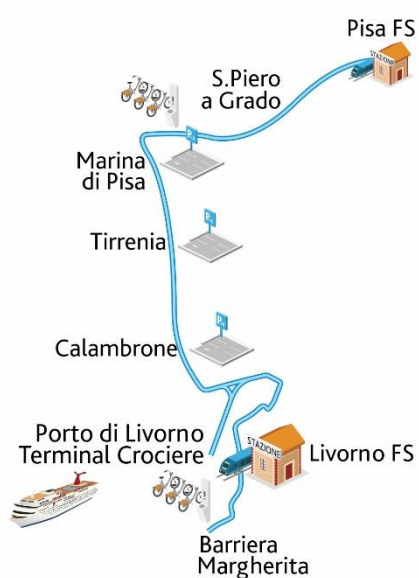
Fig. 51 - Direttrice 1: Pisa Cisanello – Cascina – Pontedera



**Passeggeri:**  
28.150 per giorno feriale  
8.784.000 per anno

Fig. 52 - Direttrice 2: Pisa San Rossore – San Giuliano Terme – Lucca





**Passeggeri:**  
**28.700 per giorno feriale**  
**8.950.000 per anno**

Fig. 53 - Direttrice 3: Pisa stazione – Marina di Pisa – Tirrenia – Livorno



Fig. 54 – Direttrice 4: Pisa San Rossore - Viareggio