

PNRR - Misura M2.C2 - Intervento 4.2 Sviluppo Trasporto Rapido di Massa

Realizzazione Trasporto Rapido Costiero Rimini Fiera - Cattolica
2^a tratta Rimini FS - Rimini Fiera (CUP D91E20000170001)

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA



STUDI ED INDAGINI PRELIMINARI

DOCFAP - DOCUMENTO DI FATTIBILITÀ DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO

Ing. Roberto D'Andrea

Gruppo di lavoro

Arch. Gilberto Avella
Ing. Arianna Bicchichi
Sig.ra Elisa Canevari
Geom. Barbara Dominici
Arch. Matteo Massanelli



SUPPORTO SPECIALISTICO

Geologia e modellazione sismica
Responsabile - Dott. Geol. Carlo Copioli
Collaboratori - Dott. Geol. Gianni Amantini
- Dott. Geol. Fabio Vannoni
Indagini Geognostiche - INTERGEO S.r.l.
Risoluzioni Interferenze - Ing. Gianluca Vitali
Piano del verde - Arch. Serena Corbelli

PROGETTAZIONE



architecna
engineering



Ing. Andrea
Spinosa

Responsabile integrazione prestazioni specialistiche

Ing. Pietro Caminiti

Responsabili di Disciplina

Ing. Pietro Caminiti - *Infrastruttura*
Ing. Maurizio Falzea - *Opere Strutturali*
Ing. Angela Tortorella - *Impianti*
Arch. Alessandro Cacciatore - *Architettura e Sistemazioni Urbane*
Ing. Massimo Plazzi - *Idrologia e Idraulica*
Ing. Davide Salvo - *Capitolati e Documenti Economici*
Ing. Fabrizio Conti - *Coordinatore Sicurezza in fase di Progettazione*
Ing. Andrea Spinosa - *Pianificazione dei trasporti e ACB*
Dott. Geol. Ignazio Giuffrè - *Geologia*

SUPPORTO SPECIALISTICO

Ambiente



Archeologia



COMMESSA

TRC2

FASE

PFTE

DISCIPLINA

GEN

TIPO/NUMERO

RG002

REV.

B

SCALA

-

NOME FILE

TRC2-PFTE-GEN-RG-002-B

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
A	DIC_2022	EMISSIONE	A. SPINOSA	A. SPINOSA	P.CAMINITI
B	FEB_2023	AGGIORNAMENTO PER RICHIESTE RUP	A. SPINOSA	A. SPINOSA	P.CAMINITI
C	-	-	-	-	-

2^a Tratta del Trasporto Rapido Costiero (MetroMare) Rimini FS – Rimini Fiera

DOCFAP

Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali

Indice del documento

PREMESSA	3
1 CRITICITÀ DEL TRACCIATO DEL 2018	5
2 INDIVIDUAZIONE DI UN TRACCIATO ALTERNATIVO	5
3 DESCRIZIONE DELLE POSSIBILI ALTERNATIVE.....	6
4 CONFRONTO DELLE ALTERNATIVE PRESENTATO NEL 2018	13
5 ANALISI MULTICRITERIA DELLE ALTERNATIVE	17
5.1 APPROCCIO METODOLOGICO.....	17
5.2 PARAMETRI DI CALCOLO E RISULTATI	25
6 ANALISI COMPARATIVA DELLE ALTERNATIVE TECNOLOGICHE	47
6.1 SISTEMI FILOVIARI.....	47
6.1.1 <i>Fattori competitivi</i>	51
6.1.2 <i>Svantaggi</i>	52
6.1.3 <i>Direzione evolutiva</i>	52
6.2 TRAZIONE ELETTRICA.....	52
6.3 CONCLUSIONI DELL'ANALISI.....	60
ALLEGATO: TABELLE DI DETTAGLIO DEL CONFRONTO TRA LE DIVERSE TECNOLOGIE	62
INDICI DELLE FIGURE E DELLE TABELLE.....	66
INDICE DELLE FIGURE.....	66
INDICE DELLE TABELLE	67

Premessa

Il progetto di fattibilità tecnico-economica della "2^a Tratta Trasporto Rapido Costiero Rimini FS – Rimini Fiera" è stato sottoposto a richiesta di finanziamento nell'ambito del cosiddetto Avviso numero 1 avente scadenza il 31/12/2018 per l'accesso al Fondo nazionale per i sistemi di trasporti rapidi di massa. Il finanziamento è stato approvato con decreto MIT numero 185 del 30/04/2020 e, successivamente, è stato valutato idoneo ad essere inserito tra le opere della misura M2.C2 del PNRR ai sensi del decreto MIMS numero 448 del 16/11/2021. Con Decreto Dirigenziale numero 337 del 22/12/2021 la Direzione Generale per il trasporto pubblico locale e regionale e la mobilità pubblica sostenibile - Divisione 2 ha quindi provveduto all'impegno contabile delle risorse di cui all'art. 1, comma 1072 della Legge 205/2017 destinate all'intervento di cui trattasi. Tali interventi sono a oggi finanziati con Legge numero 205 del 27/12/2017 "Legge di bilancio 2018" all'art.1, comma 1072, nell'ambito del quale è stato disposto il finanziamento del Fondo di cui alla Legge numero 232 del 11/12/2016, art.1, comma 140, per interventi nel settore del trasporto rapido di massa ad impianti fissi.

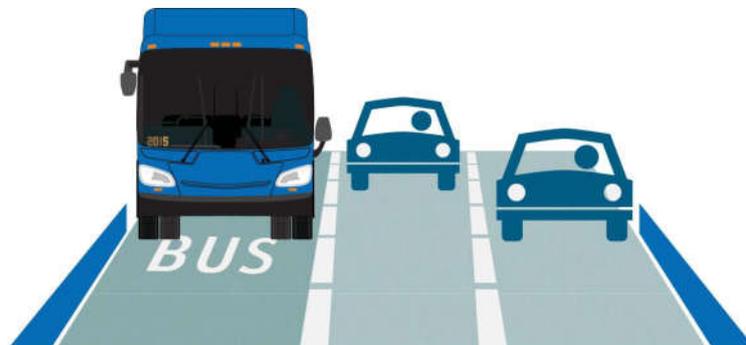
L'intervento si colloca nel più vasto piano di potenziamento e riordino del trasporto collettivo dell'area urbana costiera di Rimini e si colloca nella tipologia dei sistemi intermedi ad alto livello di servizio. Il **trasporto su gomma** è, nel panorama dei trasporti collettivi, quello con minore capacità ma maggiore economia di implementazione, non necessitando di infrastrutture proprie. È caratterizzato da estrema flessibilità ma anche dall'incapacità di garantire un servizio regolare, proprio perché vincolato dal traffico privato, con cui condivide la sede. Se il bus (o il filobus) si muovono su corsie proprie, separate (e protette) si realizza una busvia: in questo caso i maggiori oneri di costruzione sono ripagati dall'aver un servizio più regolare ed efficiente. Quando si adoperano mezzi articolati e le intersezioni sono ridotte al minimo e attrezzate con asservimento semaforico si parla di busvie ad alta capacità (BAC o FAC, nel caso di filovia). BAC/FAC con capacità comprese tra 1.000 e 5.000 posti/ora per senso di marcia sono presenti in diverse città nordamericane e sudamericane così come in diverse città europee, principalmente francesi (*bus à haut niveau de service*, BHNS) e inglesi (BRT, *busway rapid transit*). Il **livello di servizio** fa riferimento alla qualità dell'offerta che lo caratterizza. La frequenza dei passaggi, la capacità del veicolo, la sua velocità commerciale sono elementi importanti dell'offerta ma non i soli. Sono fattori altrettanto importanti:

- l'estensione dell'orario di servizio;
- il comfort e la sicurezza;
- l'accessibilità;
- la connessione con il resto della rete e gli altri mezzi di trasporto;
- i servizi accessori (informazione all'utente) come la presenza di totem informativi in fermata o la copertura wireless.

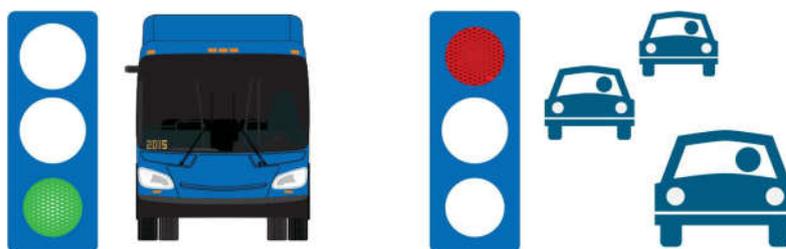
La **qualità del servizio** concerne l'esercizio. La nozione di qualità del servizio è utilizzata per descrivere e qualificare lo scarto tra l'offerta programmata e l'offerta percepita dall'utenza. La qualità del servizio descrive l'insieme dei fattori che influenzano la percezione che il viaggiatore si forma circa la qualità dei propri spostamenti, fornendo la metodologia qualitativa per valutare questi aspetti.

Per una busvia il successo di una realizzazione è legato alla qualità del servizio offerto. Livello di servizio definito dalle seguenti proprietà:

1. sede in gran parte riservata e protetta



2. asservimento semaforico



3. Elevato livello di accessibilità delle fermate e delle vetture



4. Telecontrollo e presenza di elementi informativi e comunicazione all'utenza sia in fermata che in vettura



1 Criticità del tracciato del 2018

Durante la conferenza dei servizi sul progetto di fattibilità tecnico-economica del 2018 sono emerse diverse problematiche di seguito schematizzate:

- a) Pianificazione urbanistica
 - Il progetto richiede un adeguamento della strumentazione urbanistica comunale e provinciale;
 - Analogamente la definizione della viabilità alternativa inserita nel progetto sta incontrando difficoltà;
- b) Attuazione urbanistica, dove la rifunzionalizzazione della viabilità principale
 - Richiede un intervento di spostamento dei sottoservizi molto superiore alle attese;
 - Comporta un impatto sul verde esistente piuttosto rilevante con l'abbattimento di circa 250 alberature;
 - Provoca un forte decremento del sistema della sosta privata in alcune aree non bilanciato;
- c) Cantierizzazione
 - Il rischio archeologico è particolarmente alto lungo tutto il sedime della vecchia Emilia (un recente cantiere nella zona iniziale della via vecchia Emilia con scavi superficiali sotto al metro è rimasto bloccato per ritrovamenti di epoca romana);
 - Il cantiere è fortemente impattante lungo ampia parte del tracciato richiedendo rilevanti periodi di chiusura al traffico di alcune arterie di particolare importanza.

2 Individuazione di un tracciato alternativo

Per le motivazioni pocanzi descritte l'Amministrazione ha rivalutato il tracciato già presentato nel 2009 che corre in rilevato in adiacenza alla linea ferroviaria Bologna – Ancona. Tale alternativa presenta i seguenti aspetti positivi:

- 1) Pianificazione urbanistica
 - Il tracciato è conforme alla strumentazione urbanistica vigente;
 - Il tracciato non ha interferenze e non richiede realizzazioni di viabilità alternativa;
- 2) Realizzazione ed esercizio
 - Il tracciato è interamente in sede propria senza alcun punto di intersezione con la viabilità cittadina;
 - Viene riproposta analoga tecnologia e filosofia della prima tratta già in esercizio;
 - Oltre i due terzi del tracciato (2.670 su 4.100 m) sono realizzabili a doppia via di corsa con positivi effetti sulla capacità e la flessibilità del servizio;
 - Ha un impatto estremamente limitato sia sul verde pubblico che sullo spostamento dei sottoservizi;
- 3) Cantierizzazione
 - Il rischio archeologico passa da alto a basso e si limita alla porzione iniziale del tracciato nella zona della Stazione di Rimini;
 - Il cantiere non richiede chiusure stradali ed ha un impatto limitato sul tessuto cittadino.

3 Descrizione delle possibili alternative

Il progetto riguarda il prolungamento del TRC/MetroMare dalla stazione ferroviaria di Rimini alla Fiera. Nel progetto del 2018 sono stati individuati cinque possibili tracciati:

- **Alternativa 1:** con inserimento della sede su viabilità urbana lungo il percorso Stazione FS - piazzale Battisti - via Savonarola - via Matteotti - via XXIII Settembre 1845 - via Emilia - Fiera;
- **Alternativa 2:** con inserimento della sede su viabilità urbana lungo il percorso Stazione FS - piazzale Battisti - via Savonarola - via Matteotti - via XXIII Settembre 1845 - via Emilia - via Capelli - via Costantino il Grande - Fiera accesso Est;
- **Alternativa 3:** con affiancamento della sede su percorso parallelo alla linea ferroviaria Bologna - Ancona fino alla Fiera;
- **Alternativa 4:** con nuova sede parzialmente su viabilità urbana Stazione FS - piazzale Battisti - via Savonarola - via Matteotti e quindi percorso in affiancamento alla linea ferroviaria Bologna - Ancona;
- **Alternativa 5:** con affiancamento della sede su percorso parallelo alla linea ferroviaria Bologna - Ancona fino a via XXIII Settembre 1845 - via Emilia - via Capelli - via Costantino il Grande - Fiera accesso Est.

La Stazione ferroviaria di Rimini è posizionata tra il Centro Storico e la costa. Il percorso verso la Fiera va quindi individuato all'interno dello spazio creato dall'alveo storico del fiume Marecchia - oggi occupato dal Parco XXV Aprile e dal Porto Canale - e dal nuovo corso del fiume che si allinea in direzione nordest a nord del quartiere di San Giuliano a Mare. In questo spazio ci sono due direttrici possibili per l'inserimento di una sede di trasporto collettivo rapido:

- inserimento lungo la via Emilia;
- inserimento in affiancamento alla linea ferroviaria Bologna - Ancona.

Le alternative individuate seguono questi due tracciati (la 1 e la 3) oppure ne alternano parti di uno o dell'altro (2, 4 e 5). Di seguito le corografie indicative dei tracciati.

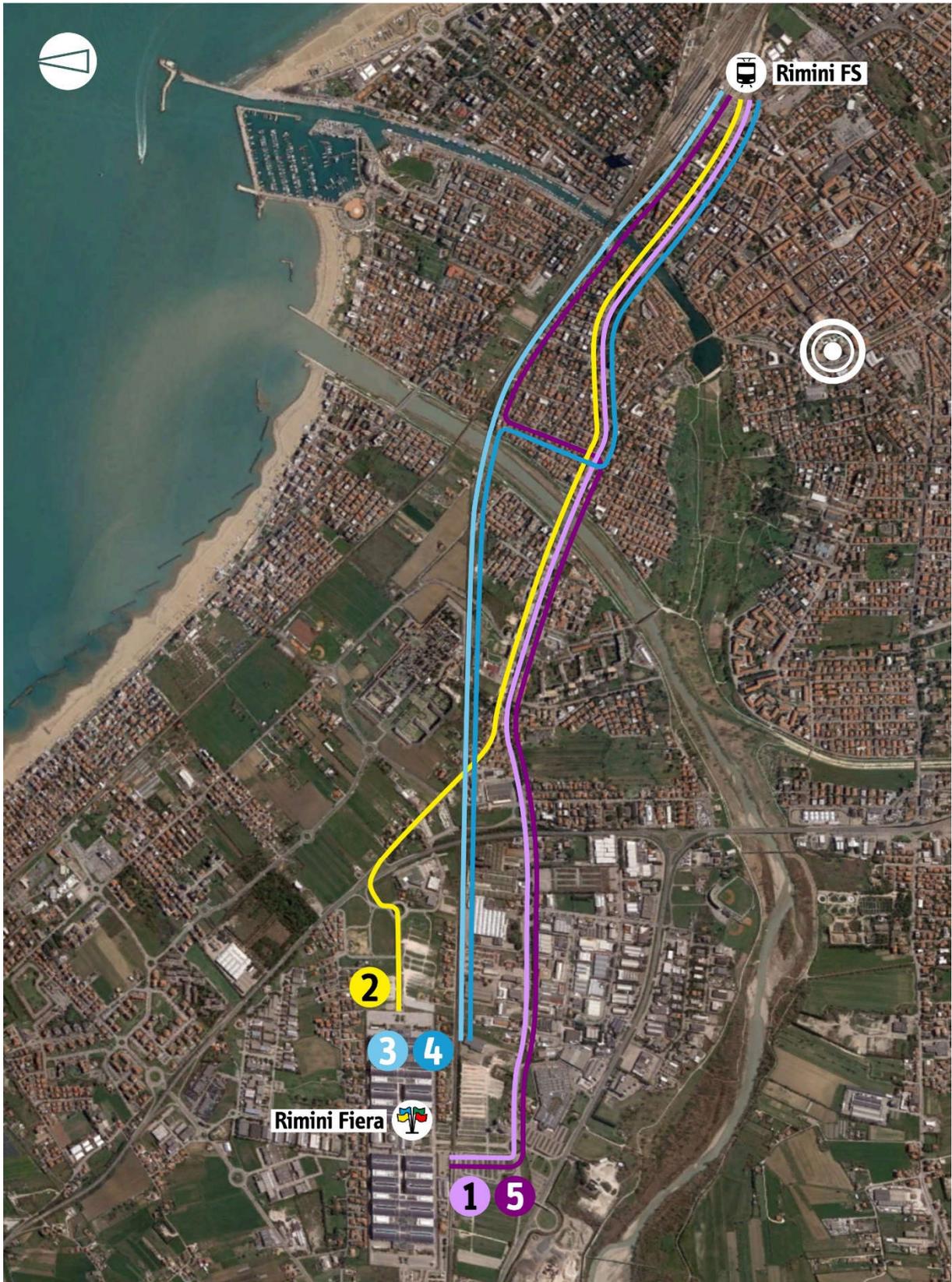


Fig. 1 | Corografia d'insieme delle 5 alternative di tracciato per il prolungamento del TRC tra Rimini FS e la Fiera di Rimini

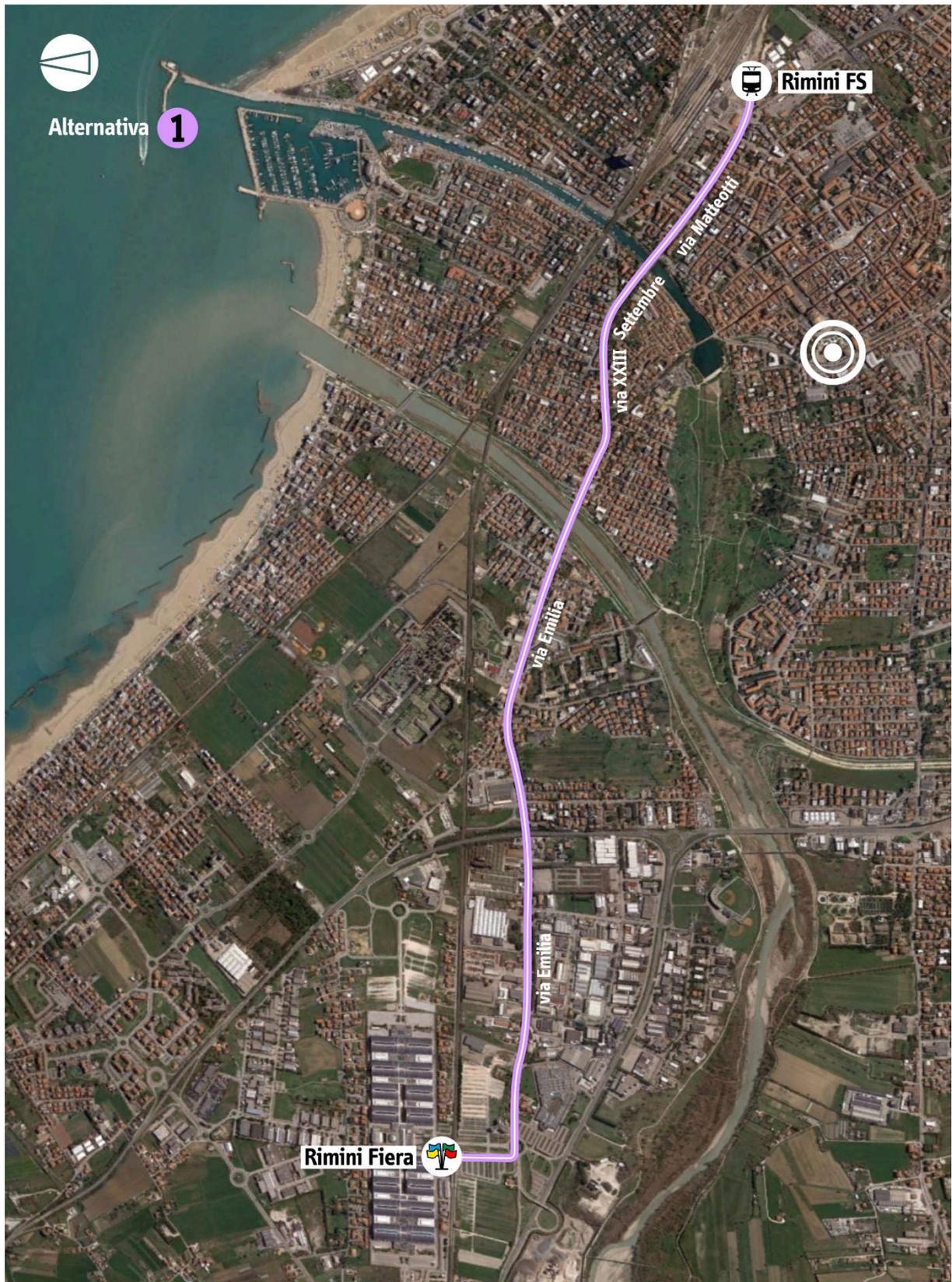


Fig. 2 | Tracciato dell'alternativa 1



Fig. 3 | Tracciato dell'alternativa 2

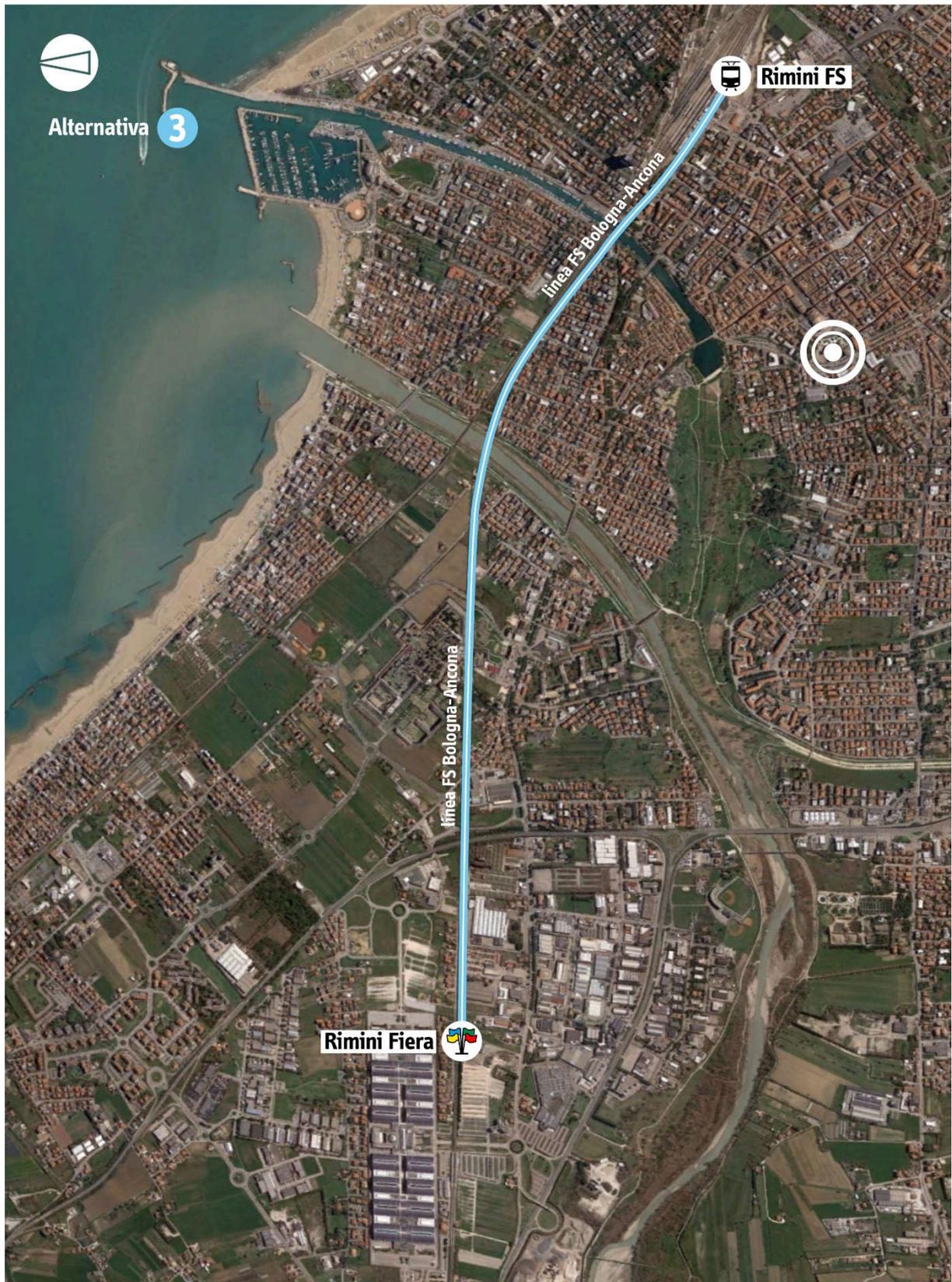


Fig. 4 | Tracciato dell'alternativa 3

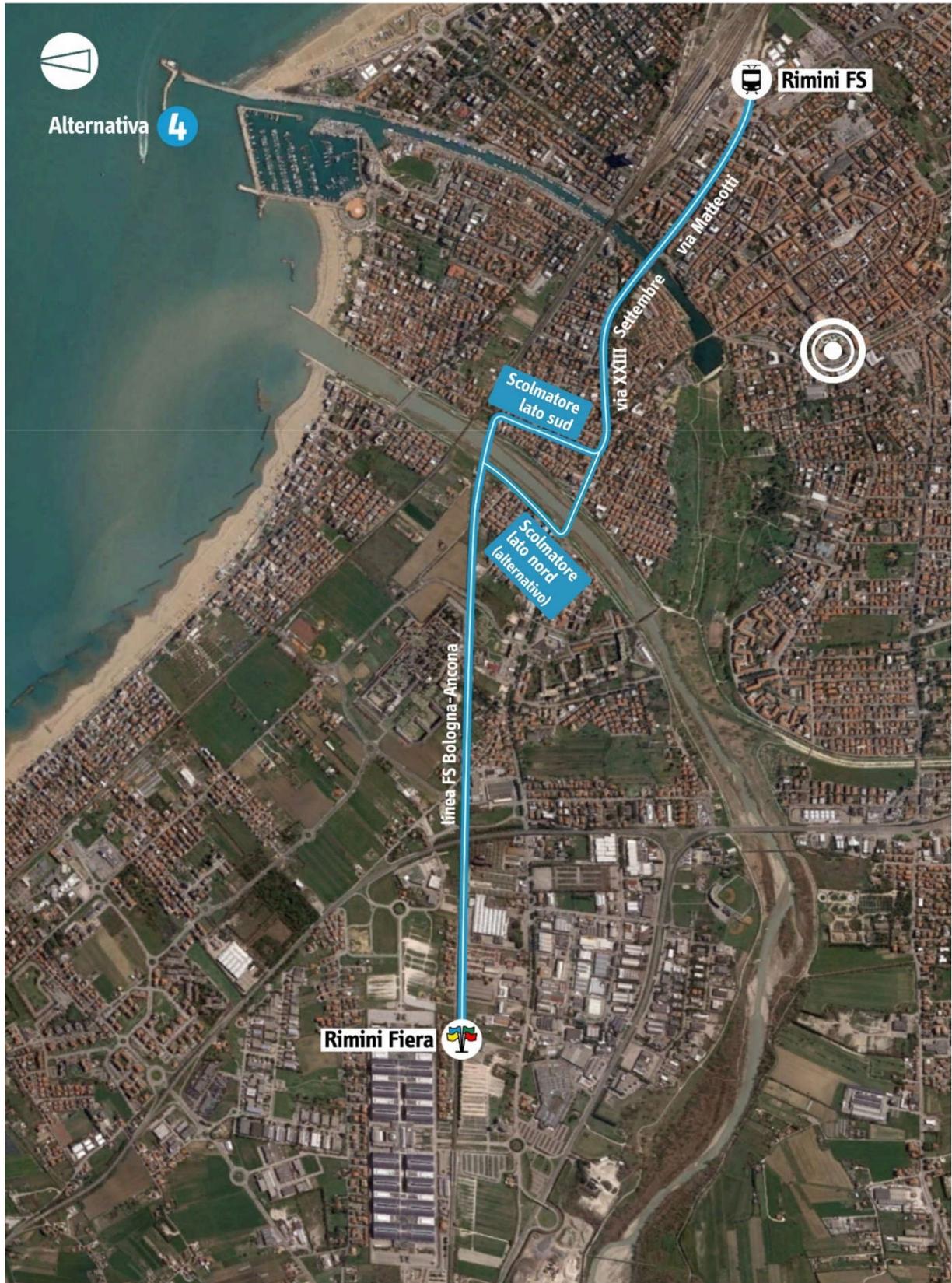


Fig. 5 | Tracciato dell'alternativa 4



Fig. 6 | Tracciato dell'alternativa 5

4 Confronto delle alternative presentato nel 2018

Per evitare distorsioni nella valutazione, la stima economica delle alternative è svolta su costi parametrici e non tiene conto del quadro economico definitivo sviluppato per l'alternativa scelta. Il costo, pari a 9.550 euro per metro di nuova sede, tiene conto di opere, impianti e costi della sicurezza ma, avendo come obiettivo il confronto differenziale, esclude l'acquisto del materiale rotabile.

Di seguito i risultati delle simulazioni di domanda per ciascuna alternativa.

Alternativa 1

Caratteristiche

Percorso	Stazione FS - piazzale Battisti - via Savonarola - via Matteotti - via XXIII Settembre 1845 - via Emilia - Fiera
Lunghezza (m)	4.094
Stima preliminare opere e impianti	39.097.700 euro

Domanda generata

Feriale invernale	7.444
Feriale estiva	12.390
Feriale media	9.076

Key performance index

Domanda annuale per metro di linea	809
Domanda annuale per milione di euro speso	84.731

Alternativa 2

Caratteristiche

Percorso	Stazione FS - piazzale Battisti - via Savonarola - via Matteotti - via XXIII Settembre 1845 - via Emilia - via Capelli - via Costantino il Grande - Fiera accesso Est
Lunghezza (m)	4.086
Stima preliminare opere e impianti	39.021.300 euro
Domanda generata	
Feriale invernale	6.179
Feriale estiva	10.098
Feriale media	7.472

Key performance index

Domanda annuale per metro di linea	667
Domanda annuale per milione di euro speso	69.895

Alternativa 3

Caratteristiche

Percorso	Stazione FS - percorso parallelo alla linea ferroviaria Bologna - Ancona
Lunghezza (m)	4.313
Stima preliminare opere e impianti	41.189.150 euro
Domanda generata	
Feriale invernale	5.285
Feriale estiva	8.549
Feriale media	6.362

Key performance index

Domanda annuale per metro di linea	538
Domanda annuale per milione di euro speso	56.378

Alternativa 4

Caratteristiche

Percorso Stazione FS - piazzale Battisti - via Savonarola - via Matteotti - percorso parallelo alla linea ferroviaria Bologna - Ancona

Lunghezza (m) 4.452

Stima preliminare opere e impianti 42.516.600 euro

Domanda generata

Feriale invernale 5.799

Feriale estiva 9.293

Feriale media **6.952**

Key performance index

Domanda annuale per metro di linea **570**

Domanda annuale per milione di euro speso **59.682**

Alternativa 5

Caratteristiche

Percorso Stazione FS - piazzale Battisti - percorso parallelo alla linea ferroviaria Bologna - Ancona e quindi via XXIII Settembre 1845 - via Emilia - Fiera

Lunghezza (m) 4.571

Stima preliminare opere 43.653.050

Domanda generata

Feriale invernale 6.424

Feriale estiva 10.965

Feriale media **7.923**

Key performance index

Domanda annuale per metro di linea **633**

Domanda annuale per milione di euro speso **66.243**

Dal punto di vista della lunghezza del tracciato le quattro alternative sono sostanzialmente simili: la n. 2 si differenzia perché arriva all'ingresso est della Fiera piuttosto che a quello principale. La domanda è maggiore per la n. 1 perché attraversa le aree più densamente abitate, mentre le altre – per una parte del tracciato – si allineano al margine della zona edificata.

L'analisi considera, come indicatori di efficacia, due rapporti:

- la domanda annuale attratta divisa per la lunghezza della tratta di nuova realizzazione;
- la domanda annuale divisa per il costo stimato delle opere e degli impianti moltiplicata per un milione di euro.

Alternativa	Lunghezza (m)	Stima del costo di opere e impianti	Domanda annuale per metro di linea	Domanda annuale per milione di euro speso
1	4.094	39.097.700	809	84.731
2	4.086	39.021.300	667	69.895
5	4.571	43.653.050	633	66.243
4	4.452	42.516.600	570	59.682
3	4.313	41.189.150	538	56.378

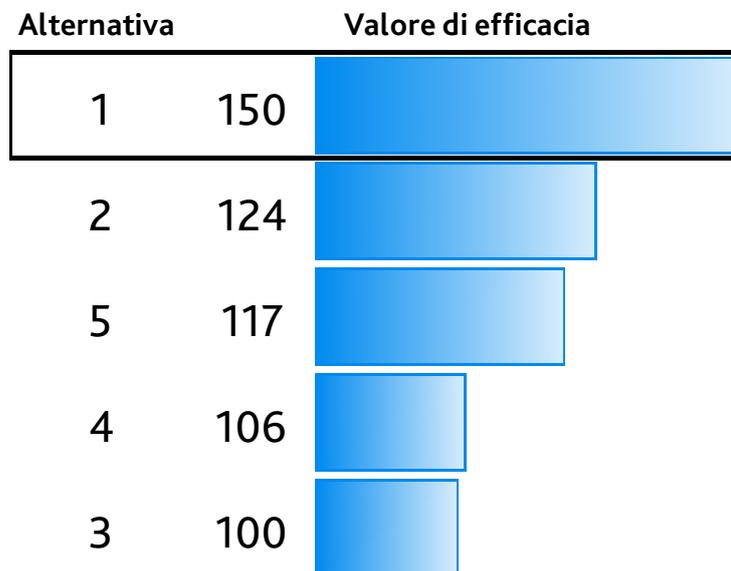


Fig. 7 | Analisi delle alternative di tracciato, sintesi degli indicatori di efficacia

Fatto 100 il valore medio degli indicatori di efficacia dell'alternativa meno performante (la 3) si vede che l'alternativa di tracciato 1 sia la migliore con la 2 e la 5 in posizione intermedia e l'alternativa 4 sostanzialmente allo stesso livello della 3.

5 Analisi multicriteria delle alternative

Constatate le criticità emerse in sede di Conferenza dei Servizi, l'Amministrazione ha deciso di approfondire l'analisi della fattibilità delle alternative con una analisi multicriteri di maggiore dettaglio rispetto a quella realizzata nel 2018.

5.1 Approccio metodologico

Un sistema urbano si mantiene in equilibrio grazie all'azione di due forze contrapposte: la prima, soprannominata valenza, che descrive l'attrattività della città centrale; la seconda, la convenienza, che descrive la necessità degli abitanti di contenere le proprie spese quotidiane mantenendo una qualità della vita accettabile rispetto a quelli che sono i propri canoni. L'azione attrattiva della città centrale su funzioni primarie e investimenti e la reciproca azione repulsiva degli abitanti verso gli alti costi e il caos che ne conseguono portano alla nascita di una fascia adiacente al centro storico che assomma alle tipiche funzioni residenziali, con il tempo, non solo attrezzature e servizi a scala urbana ma anche i servizi e attività primarie delocalizzati dal centro in rapporti ai costi che diventano sempre più elevati. Questa fascia è identificabile come quella che genera il maggior numero di spostamenti accogliendo gli alti flussi provenienti dalle aree esterne, drenandoli e smistandoli verso il centro storico.

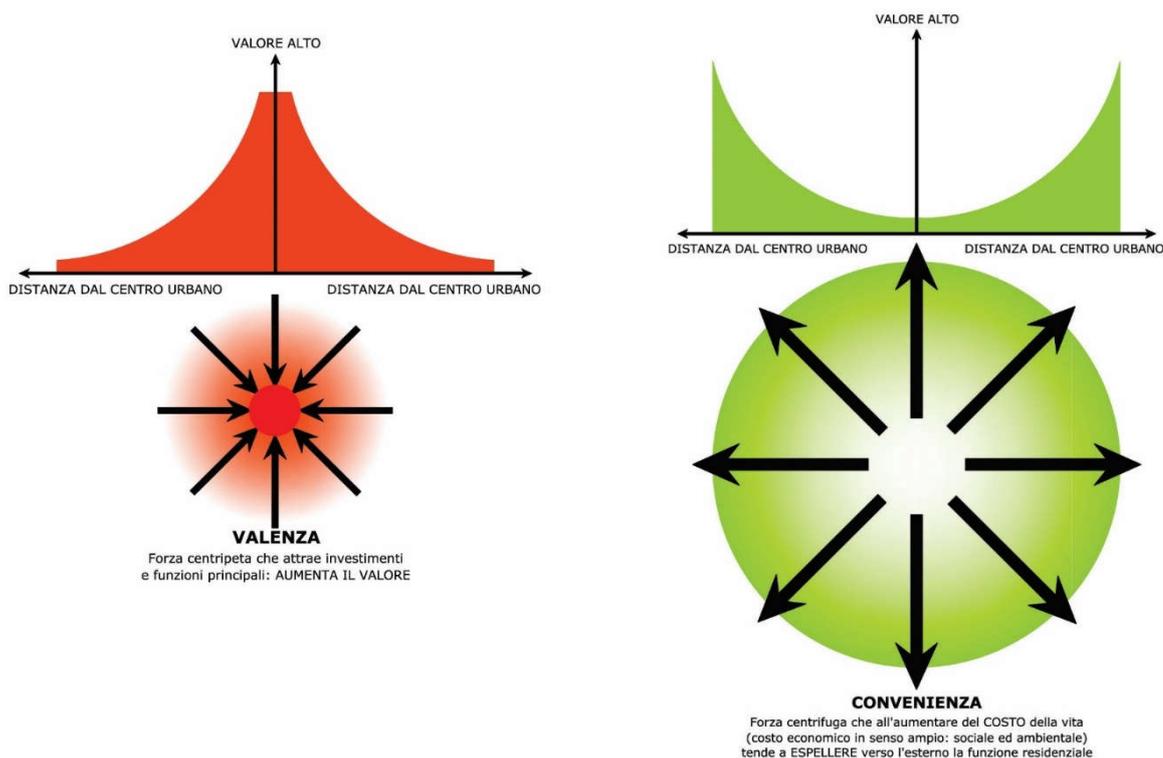


Fig. 8 | Esempificazione grafica delle forze opposte che agiscono su un'area urbana

Una delle proprietà meno evidenti della rete portante del trasporto rapido metropolitano (TRM) è quella di aumentare la resilienza del sistema urbano e metropolitano. Il termine resilienza deriva dal latino *resilire* che significa saltare indietro, rimbalzare: si tratta di un termine desunto dalla metallurgia dove indica la capacità di un materiale di resistere agli urti senza spezzarsi. Nelle strutture urbane – e, per estensione, territoriali – la resilienza definisce

una qualità collettiva caratterizzata dalla capacità di reazione nelle situazioni di difficoltà, orientata al bene comune e guidata da principi solidali, cooperativi, collaborativi, che evolve e si sviluppa nel mutuo aiuto con la mobilitazione di risorse relazionali, con la promozione di responsabilità per il benessere delle persone e della stessa comunità di appartenenza (territoriale, ambientale, sociale, produttivo).

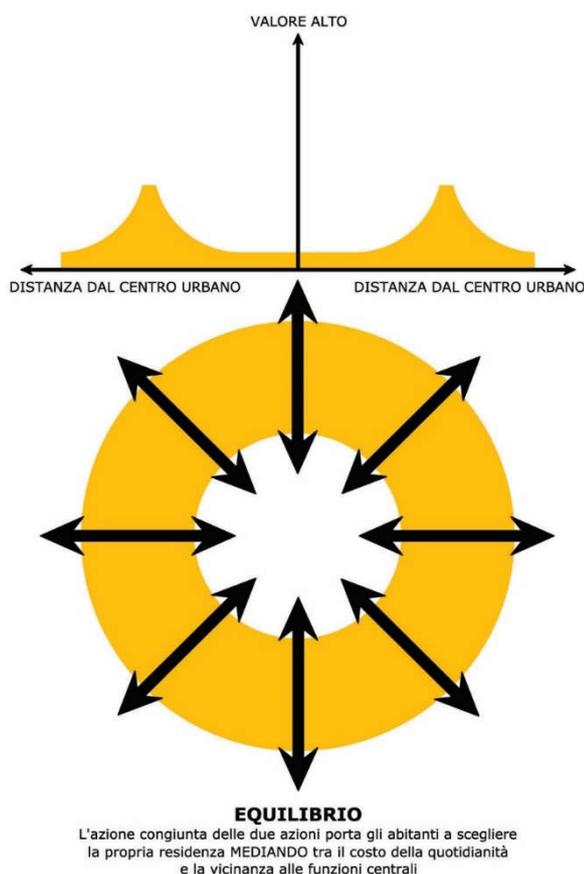


Fig. 9 | Area urbana in cui la coppia di forze della figura precedente ha generato un equilibrio che dispone una zona anulare di maggiore valore economico e sociale intorno ad un centro che, seppure idealmente più ambito, tende a svuotarsi delle proprie funzioni naturali di polo accentratore e guida di tutto il sistema urbano

In termini strategici la resilienza descrive la sostenibilità dei processi fisiologici urbani: una città con un buon grado di resilienza riesce a svolgere i propri processi metabolici in termini tali da non farli dipendere completamente da flussi esterni. Una rete di TRM ben sviluppata garantisce una ripartizione modale equilibrata: persone e merci possono viaggiare su vettori collettivi e non solo su mezzi privati. Al contempo una rete di TRM sostiene lo sviluppo urbano inducendo la densificazione degli spazi e quindi un migliore utilizzo dei suoli.

La scelta delle alternative ha come principio guida quello di progettare un sistema di trasporti che mitighi le inefficienze e le diseconomicità del costruire reti complesse, senza negare la specifica conformazione dilatata della dispersione; che riorganizzi ciò che esiste ma sia capace di evolvere nel tempo. Questo impone di rivedere la filosofia con cui si concepiscono le reti di trasporto, ovvero, di proporre un approccio che ripensi la relazione tra città consolidata e periferie – dove è periferia ogni luogo poco accessibile – e che si apra ai mutamenti del territorio tenendo in conto delle specificità locali in termini di stratificazioni storiche e criticità delle

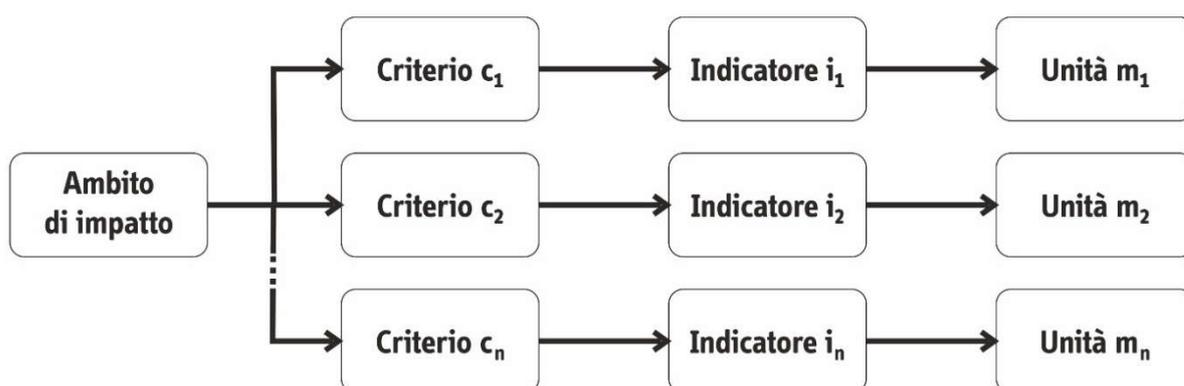
tracce antropiche storicizzate (in termini di patrimonio storico-culturale). Questo approccio, sotto un profilo urbanistico più ampio, rappresenta innanzitutto l'occasione di aprire a un effettivo cambiamento strategico della città nel suo complesso. Secondariamente facendo collaborare le componenti dell'intero sistema dell'intero organismo urbano - città consolidata, periferia, centri secondari e borghi, territorio - per dare risposte convincenti ai problemi di congestione e gentrificazione della città consolidata restituendo peso carattere alle diverse parti del sistema e controllando il disordine della loro crescita.

Nel merito, il confronto tra le alternative è centrato su **quattro ambiti di impatto diretto**:

- A. **Socio-urbanistico**: riguarda il rapporto dell'infrastruttura con la struttura demografica territoriale;
- B. **Paesistico e storico**: riguarda il tema della compatibilità dell'infrastruttura con la struttura vincolistica sovra-ordinata ovvero il paesaggio naturale, il paesaggio agrario e il rischio archeologico;
- C. **Ambiente ed ecosistemi**: riguarda il rapporto dell'infrastruttura con la rete ecologica, le acque e il sottosuolo;
- D. **Funzionale**: riguarda la valutazione di elementi endogeni relativi all'operatività della nuova infrastruttura.

Per ciascun ambito di impatto sono individuati

- I criteri di valutazione;
- Gli indicatori per misurare ciascun criterio;
- Le unità di misura di ciascun indicatore.



La tabella seguente riporta gli indicatori per area di impatto e le rispettive misure.

Tab. 1 | Ambiti, criteri e indicatori per la valutazione delle alternative – parte 1

Ambito	Criterio		Indicatore	Misura	U.M.
A. Socio-urbanistico	A.1	Compatibilità con gli strumenti urbanistici vigenti	Quota del tracciato insistente su corridoi della mobilità PRG/PUMS	km di tracciato insistente su corridoi della mobilità PRG/PUMS diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100
	A.2	Accessibilità ad aree residenziali	Residenti entro 500 metri per lato dal corridoio	Numero residenti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km
	A.3	Prossimità produttiva	Addetti entro 500 metri per lato dal corridoio	Numero addetti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km
	A.4	Prossimità sociale	Piazze e luoghi di aggregazione entro 500 metri dal corridoio	Numero di piazze e luoghi di aggregazione entro 500 metri dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km
B. Paesistico e storico	B.1	Compatibilità con il paesaggio naturale	Quota del tracciato insistente su zone del paesaggio naturale, naturale agrario e naturale di continuità ai sensi del PTPR dell'Emilia-Romagna	km di tracciato insistente su zone del paesaggio naturale diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100
	B.2	Compatibilità con il paesaggio agrario	Quota del tracciato insistente su zone del paesaggio agrario di rilevante valore, agrario di valore e agrario di continuità ai sensi del PTPR dell'Emilia-Romagna	km di tracciato insistente su zone del paesaggio agrario diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100
	B.3	Compatibilità e rischio archeologica	Quota del tracciato insistente su aree e ambiti di interesse archeologico sulla base della letteratura disponibile	km di tracciato insistente su aree e ambiti di interesse archeologico diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100
C. Ambiente ed ecosistemi	C.1	Impatto con il sottosuolo	Escavato prodotto	Totale dell'escavato prodotto diviso per i km totali di sviluppo	m ³ /km
	C.2	Interferenza con il reticolo idrografico	Area ricadente in alveo di fiumi, fossi e torrenti o aree umide	km di tracciato ricadente in alveo di fiumi, fossi e torrenti o aree umide diviso per i km totali di sviluppo	m/km x 100
	C.3	Impatto vegetazionale	Alberature rilevanti adiacenti al corridoio	Alberature rilevanti (oltre i 5 metri di altezza) adiacenti al corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km

Tab. 2 | Ambiti, criteri e indicatori per la valutazione delle alternative – parte 2

Ambito	Criterio		Indicatore	Misura	U.M.
C. Ambiente ed ecosistemi	C.4	Intrusione visuale	Rilevanza paesaggistica	Altezza media del bifilare dalla livelletta moltiplicato la lunghezza sopraterra del corridoio su viabilità non preesistente	m x km/km
	C.5	Impatto acustico	Numero di ricettori sensibili entro 500 metri per lato dal corridoio	Numero di ricettori sensibili entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km
	C.6	Impatto climalterante	Bilancio netto dell'energia grigia	Energia grigia sull'intero ciclo di vita dell'opera (realizzazione, esercizio, fine vita, valutata in 20 anni) meno le emissioni climalteranti evitate dagli spostamenti privati evitati	t di CO2EQ/km
D. Funzionale	D.1	Efficienza della rete del trasporto pubblico	Riduzione tempo trascorso sul trasporto pubblico	Riduzione ore totali trascorse sul tpl in ora di punta	Ore/km
	D.2	Efficienza della rete del trasporto privato	Riduzione tempo trascorso sul trasporto privato	Riduzione ore totali trascorse sulla rete del trasporto privato in ora di punta	Ore/km
	D.3	Produttività specifica	Passeggeri attratti per giorno feriale	Domanda per giorno feriale invernale diviso per i km totali di sviluppo	Pax/km
	D.4	Efficacia modale	Percorrenze per giorno feriale sottratte al trasporto privato	Percorrenze (passeggeri per le distanze percorse) sottratte al trasporto privato diviso per i km totali di sviluppo	Pax km/km
	D.5	Efficacia trasportistica	Variazione del livello di congestione stradale (ovvero delle tratte aventi in ora di punta un rapporto flusso/capacità superiore al 95%)	Riduzione (in valore assoluto) del totale dei km di rete stradale in congestione rispetto allo scenario di riferimento diviso per i km totali di sviluppo (in fattore moltiplicativo mille)	$\Delta(V/C > 95\%) / km \times 100$

In dettaglio, gli indicatori per l'**ambito di impatto A "Sociale"** sono:

- A.1 **Compatibilità con gli strumenti urbanistici vigenti**, definita dall'estesa in km di tracciato insistente su corridoi della mobilità previsti negli strumenti di programmazione vigenti diviso per i km totali di sviluppo.
- A2. **Prossimità residenziale**, definita dal numero di residenti entro 500 metri per lato dal corridoio. Il valore è misurato come il totale del numero di residenti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo del corridoio.
- A3. **Prossimità produttiva**, definita dal numero di addetti entro 500 metri per lato dal corridoio. Il valore è misurato come il totale del numero di addetti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo del corridoio.
- A4. **Prossimità sociale**, definita dal numero di piazze e luoghi di aggregazione entro 500 metri dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo.

Gli indicatori per l'**ambito di impatto B "Paesistico e storico"** sono:

- B1. **Compatibilità con il paesaggio naturale**, definita dalla quota del tracciato insistente su zone del paesaggio naturale, naturale agrario e naturale di continuità ai sensi del PTPR dell'Emilia-Romagna. Il valore è misurato come l'estesa in km di tracciato insistente su zone del paesaggio naturale diviso per i km totali di sviluppo.
- B2. **Compatibilità con il paesaggio agricolo**, definita dalla quota del tracciato insistente su zone del paesaggio naturale, naturale agrario e naturale di continuità ai sensi del PTPR dell'Emilia-Romagna. Il valore è misurato come l'estesa in km di tracciato insistente su zone del paesaggio naturale diviso per i km totali di sviluppo.
- B.3 **Compatibilità archeologica**, quota del tracciato insistente su aree e ambiti di interesse archeologico sulla base della letteratura disponibile circa le indagini pubblicate. Il valore è misurato come l'estesa in km di tracciato insistente su aree e ambiti di interesse archeologico diviso per i km totali di sviluppo.

Gli indicatori per l'**ambito di impatto C "Ambiente ed ecosistemi"** sono:

- C1. **Impatto con il sottosuolo**, definito dal volume complessivo dell'escavato prodotto e misurato dal totale dell'escavato prodotto diviso per i km totali di sviluppo.
- C2. **Interferenza con il reticolo idrografico**, definita dallo sviluppo lineare di nuova infrastruttura ricadente in alveo di fiumi, fossi e torrenti o aree umide. Il valore è misurato dal rapporto tra i km di tracciato ricadente in alveo di fiumi, fossi e torrenti o aree umide diviso per i km totali di sviluppo del corridoio.
- C3. **Impatto vegetazionale**, definito dal numero di alberature rilevanti adiacenti al tracciato e misurato dal totale delle alberature rilevanti (oltre i 5 metri di altezza) adiacenti al corridoio diviso per i km totali di sviluppo.

- C4. **Intrusione visuale**, definita dalla rilevanza paesaggistica dell'opera in termini di visuale e misurata dall'altezza lorda sul piano di campagna (altezza media della livelletta più l'altezza della linea di contatto) moltiplicata la lunghezza fuori-terra del corridoio (quindi al netto delle sezioni in trincea e in galleria).
- C5. **Impatto acustico**, definita dal prodotto dell'altezza media del bifilare dalla livelletta moltiplicato la lunghezza sopraterra del corridoio su viabilità non preesistente.
- C6. **Impatto climalterante**, definito dal bilancio netto dell'energia grigia dalla culla alla tomba del corridoio di progetto. Il valore è misurato dal totale per anno di vita utile dell'energia grigia sull'intero ciclo di vita dell'opera (realizzazione, esercizio, fine vita, valutata in 20 anni di esercizio) meno le emissioni climalteranti dagli spostamenti privati evitati e dai servizi autobus a trazione termica sostituiti da quelli elettrici dell'infrastruttura di progetto.

Gli indicatori per l'ambito di impatto D "Funzionale" sono:

- D1. **Efficienza della rete del trasporto pubblico**, definito dallo sforzo medio che una vettura in transito sulla linea deve produrre ovvero dal valore della pendenza media della livelletta per i km di sviluppo del tracciato (in fattore moltiplicativo mille).
- D2. **Efficienza della rete del trasporto privato**, definita dal tempo totale di percorrenza tra i terminali della sola tratta di progetto.
- D3. **Produttività specifica**, definita dal totale dei passeggeri saliti sui veicoli in servizio sull'infrastruttura di progetto in ora di punta. Il valore è misurato come rapporto tra la domanda per giorno feriale invernale diviso per i km totali di sviluppo del corridoio.
- D4. **Efficacia modale**, definita dalle percorrenze (veicoli per km) sottratte al trasporto privato. Il valore è misurato sul rapporto tra le percorrenze (passeggeri per le distanze percorse) sottratte al trasporto privato diviso per i km totali di sviluppo del corridoio.
- D5. **Efficacia trasportistica**, definita dalla variazione del livello di congestione stradale (ovvero delle tratte aventi in ora di punta un rapporto flusso/capacità superiore al 95%) rispetto allo scenario di Riferimento. È misurata in termini di riduzione (in valore assoluto) del totale dei km di rete stradale in congestione rispetto allo scenario di riferimento diviso per i km totali di sviluppo (in fattore moltiplicativo mille)

Tutti i valori sono misurati direttamente sulla consistenza progettuale e trasportistica – attraverso il modello di domanda – di ciascuna alternativa. L'unico valore calcolato è il C7 relativo all'impatto climalterante misurato sull'energia grigia e il fabbisogno energetico per l'esercizio dell'opera su una vita utile di un impianto filoviario assunto pari a 20 anni di attività¹.

¹ Sulla scorta delle assunzioni ministeriali per la valutazione delle istanze di finanziamento per l'accesso al Fondo nazionale per il trasporto rapido di massa.

Per la ponderazione dell'energia grigia² dei materiali da costruzione dell'opera e dei veicoli sono considerati i seguenti fattori emissivi (misurati in kg CO_{2EQ}/kg):

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

Per quanto concerne i materiali delle batterie, se previste sulle vetture, la composizione unitaria (riferita al kWh) è:

Batteria (tipo LCO)	kg per kWh
Peso totale	5,00
Litio	2,10
Cobalto	1,75
Grafite	0,40

Sono assunti i seguenti elementi di progetto basati sulla tipologia litio-ossidi di cobalto (LCO):

Dimensionamento pacco batterie di bordo		
Potenza	40	kWh
Peso	200,00	kg
Litio	152,32	kg
Cobalto	96,68	kg
Grafite	14,02	kg
Fibra di vetro	10,00	kg
Nickel	17,60	kg
Acciaio	30,00	kg

Per quanto concerne gli elementi di linea qui valutabili si assumono:

- una **sezione lorda corrente della filovia** pari a 7,50 cm di larghezza per 40 cm di profondità (per una sezione trasversale di 3,00 m²);
- **fermate** costituite da banchine di 20 metri per 2,6 metri di larghezza e 40 cm di spessore per un volume complessivo di 20,8 m³. Per l'arredo si considerano 150 kg di parti metalliche e 65 kg di materiale plastico e derivati;

² Tra i riferimenti di letteratura si segnala: Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA), *Basics for the Assessment of Embodied Energy and Embodied GHG Emissions for Building Construction*, 2016, IEA EBC Annex 57

- **nuovi ponti** di sezione corrente pari a 10,5 metri di larghezza (filovia più corsia ciclopedonali e banchine di sicurezza) e 90 cm di spessore corrente per una sezione lorda equivalente (struttura in precompresso) pari a 9,45 m²;
- per gli eventuali **sottovia** si assume una sezione equivalente corrente di 5,5 metri per un metro di spessore pari a una sezione corrente pari a 37,7 m². Corpi tecnici e pozzi di ventilazione sono stimati per una incidenza aggiuntiva pari al 5%.

Gli altri fattori di ponderazione sono i seguenti:

Indicatore	U.M.	Valore
Fabbisogno energetico per l'esercizio filoviario	kWh per vkm	2,50 ³
Emissioni climalteranti per vkm autobus termico	g per vkm	1.147 ⁴
Emissioni climalteranti per vkm automobile termica	g per vkm	265 ³
Emissioni climalteranti per kWh	g per kWh	437 ³
Emissioni climalteranti da manutenzione stradale (riferita ai veicoli equivalenti del traffico giornaliero medio)	g per vkm	175 ⁵

5.2 Parametri di calcolo e risultati

Di seguito i parametri progettuali di calcolo delle 5 alternative descritte in dettaglio al precedente paragrafo. Dal punto di vista dell'esercizio, l'intertempo minimo è di 7,5' per tutte le alternative con l'unica eccezione della numero 3, quella parallela alla ferrovia che, essendo l'unica con una quota di percorso banalizzato inferiore al 50% consente un intertempo di 5'.

³ Valore ponderato su benchmark di mercato.

⁴ Valore dall'Addendum all'Avviso numero 2 del MIMS per la presentazione delle istanze sul Trasporto Rapido di Massa.

⁵ Valore calcolato sulla vita media dello strato d'usura in rapporto al traffico giornaliero medio e all'energia grigia del bitume.

Tab. 3 | Alternative di tracciato: caratteristiche geometriche e prestazionali

Indicatore	U.M.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5
Lunghezza del tracciato	km	4,20*	4,09	4,10*	4,45	4,57
Numero fermate	N	13	11	7	9	10
Distanza media tra le fermate	m	300	341	513	445	416
Tempo medio di percorrenza	minuti	12,46	10,91	9,28	10,76	12,54
Velocità commerciale	km/h	20,23	22,48	26,51	24,82	21,88
Tempo di giro	minuti	32,41	29,31	26,06	29,03	32,57
Domanda per giorno feriale	pax	8.758	8.338	7.359	7.703	8.369
Cumulata di picco (passeggeri contemporaneamente a bordo sulla direzione di massimo carico in ora di punta feriale)	pax/h/dir	1.174	1.118	1.098	1.033	1.122
Quota di percorso banalizzato (in esercizio a senso unico alternato)	%	88,6%	73,8%	33,2%	68,6%	63,3%
Frequenza di esercizio in ora di punta	minuti	7,50	7,50	5,00	7,50	7,50
Posti offerti in ora di punta	posti/h/dir	800	800	1.200	800	800
Grado di saturazione in ora di punta	%	147%	140%	92%	129%	140%
Produzione media annuale sull'intera linea	vetture km	890.000	890.000	1.068.000	890.000	890.000
Parco rotabile intera linea (comprese le riserve)	N	15	15	15	15	15
Corse anno per vettura	N	59.333	59.333	71.200	59.333	59.333

(*) Le lunghezze delle alternative 1 e 3 sono leggermente diverse da quelle riportate nel paragrafo 1.5 per i successivi approfondimenti progettuali.

L'analisi applica l'approccio metodologico dettagliato nel paragrafo precedente, al quale si rimanda per eventuali approfondimenti. Gli indicatori sono 19 e afferiscono a 4 aree di impatto: A. Sociale, B. Paesistico e storico, C. Ambiente ed ecosistemi, D. Funzionale.

L'analisi adotta un **approccio differenziale**: quello che si vuole evidenziare ai fini del confronto non sono i valori assoluti degli indicatori quanto la distanza che ciascun indicatore assume tra un'alternativa e l'altra.

La tabella A riporta i valori dei 19 indicatori per ciascuna delle due alternative; alcuni valori sono portati a 100, per amplificarli in modo da renderne più percepibili le mutue differenze (in termini di confronto differenziale). In questa tabella ci sono due scale di lettura: le caselle in giallo sono basate sulla scala di giudizio alto = migliore \Rightarrow basso=peggiore; quelle in azzurro sulla scala inversa, alto = peggiore \Leftarrow basso=migliore.

Elemento importante è quella della **protezione dall'effetto distorcente dello zero** ovvero del caso in cui l'indicatore assume un valore zero solo per una delle due alternative: per controllare l'eccessiva divaricazione del confronto "tutto-niente" (effetto generatore di *outlier*) si attribuisce all'alternativa per cui l'indicatore avrebbe il valore zero, forfettariamente un valore pari al 20% del valore dell'altra alternativa. Il 20% è proprio il margine di tolleranza di queste valutazioni preliminari. Il problema della gestione del valore nullo non si pone quando entrambe le alternative trovano il valore zero per un indicatore, perché nullo è anche lo scarto tra le stesse.

La tabella B omogeneizza i valori della tabella precedente sulla stessa scala di giudizio alto = migliore \Rightarrow basso=peggiore. I valori concordi restano invariati, quelli discordi per metrica di giudizio vengono corretti procedendo in questo modo: data una serie di valori $(v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,k})$

basata sulla scala di giudizio alto = peggiore \Leftarrow basso=migliore la serie di valori $(\bar{v}_{i,1}, \bar{v}_{i,2}, \dots, \bar{v}_{i,k})$ basata sulla scala di giudizio alto = migliore \Rightarrow basso=peggiore concorde agli altri valori si ottiene come:

$$\bar{v}_{i,j} = 100 \frac{\text{Max}(\bar{v}_{i,1}, \bar{v}_{i,2}, \dots, \bar{v}_{i,k})}{v_{i,j}}$$

ovvero dividendo il valore massimo della serie dei numeri per ciascun valore della serie e moltiplicandolo per 100.

Una volta omogeneizzate le scale di giudizio, date k alternative si ha un set V_i formato dagli n_k valori per ciascuno degli i indicatori di giudizio:

$$V_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,k})$$

Per ciascuno di questi gruppi di valori si calcola la mediana μ_e (tabella C, colonna relativa). Questa permetterà di calcolare il valore di riferimento $k = 0,5 \cdot \mu_e$.

A questo punto (tabella C) per ciascun valore $v_{i,j}$ si calcola il valore omogeneizzato $v_{i,j}^{(o)}$:

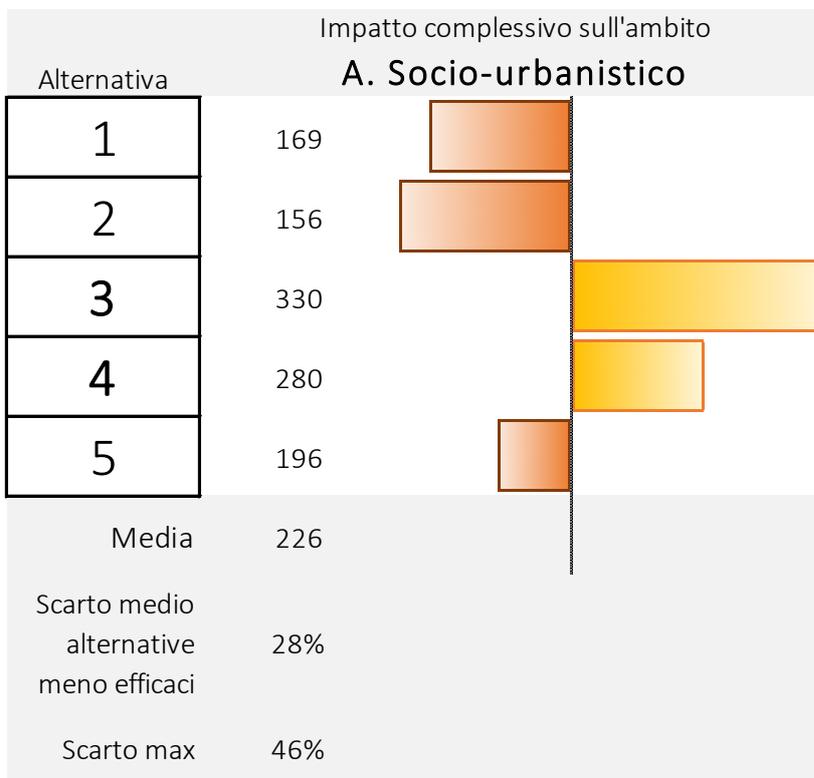
$$v_{i,j}^{(o)} = \frac{v_{i,j}}{k} 100$$

Riassumendo:

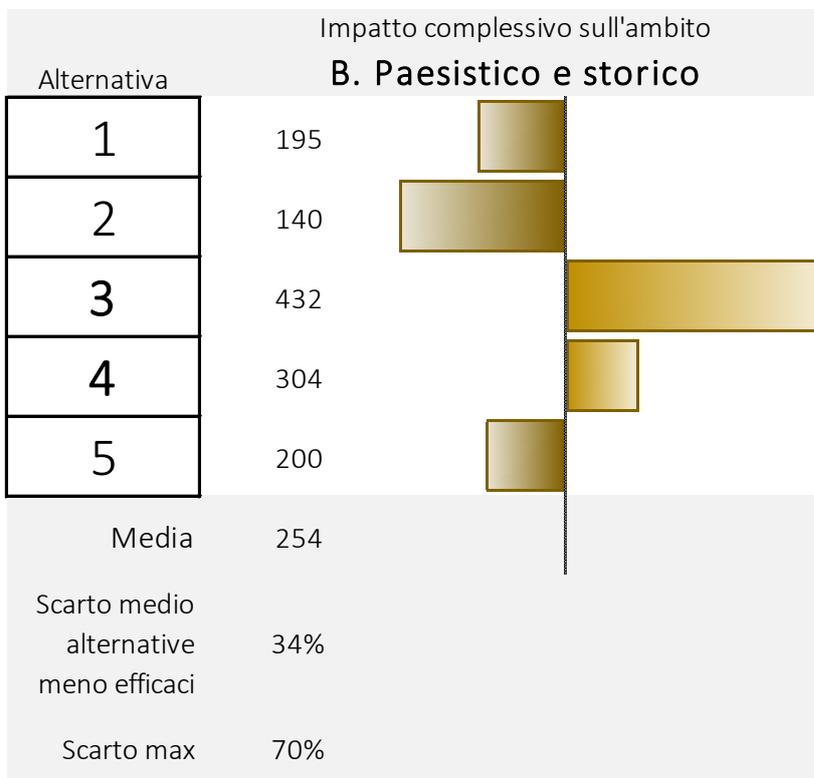
- Si raccolgono i valori di ciascun indicatore per ciascuna alternativa;
- Si omogeneizza le scale di giudizio: **alto = migliore** ⇒ **basso=peggiore**;
- Per ciascuna serie di valori si calcola la mediana della serie e si definisce il parametro di riferimento k pari alla metà del valore della mediana;
- Per ciascuna serie si omogeneizza ciascun valore a k .

A questo punto si sommano i punteggi ottenuti per ambito senza applicare parametri differenziali di pesatura: **il confronto si conclude con una disamina dei risultati ovvero con una discussione degli scarti, per ciascun indicatore, tra una alternativa e le altre sul valore somma per ciascun ambito**. La tabella D riporta, infine, i punteggi complessivi per ciascun ambito d'impatto, ottenuti come media aritmetica dei punteggi degli indicatori di ciascuna delle quattro aree di impatto.

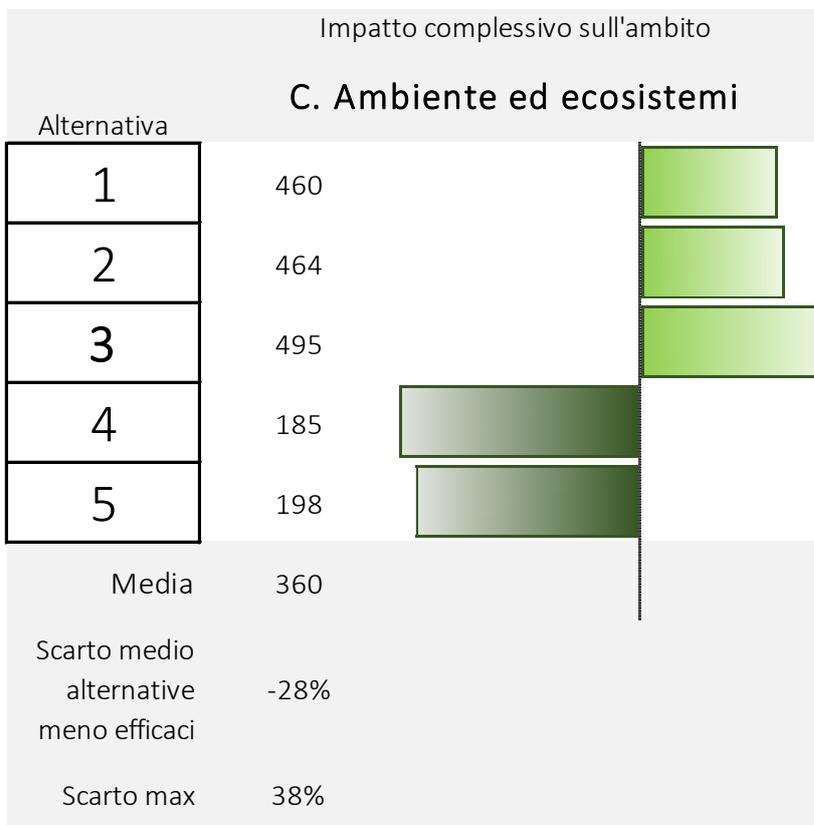
Di seguito la discussione della comparazione tra le sei alternative per ciascun ambito di impatto.



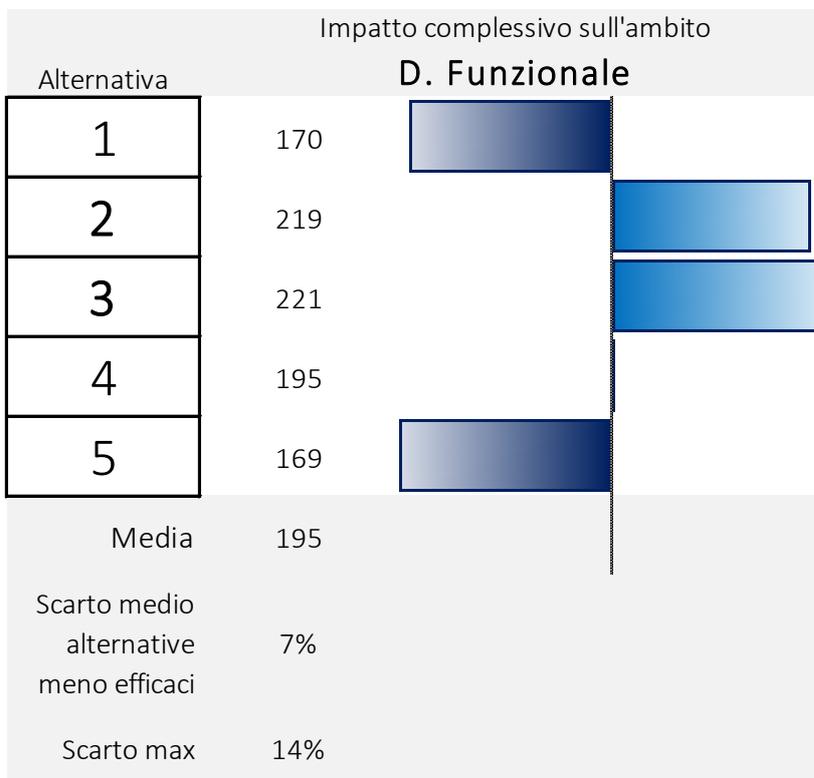
Per l'ambito di impatto A. Socio-urbanistico, le alternative più efficaci sono nell'ordine la 3 e la 4 cioè quelle più vicine al progetto iniziale del TRC parallelo alla linea ferroviaria. Le altre alternative hanno un punteggio più basso del valore medio della serie del 22%.



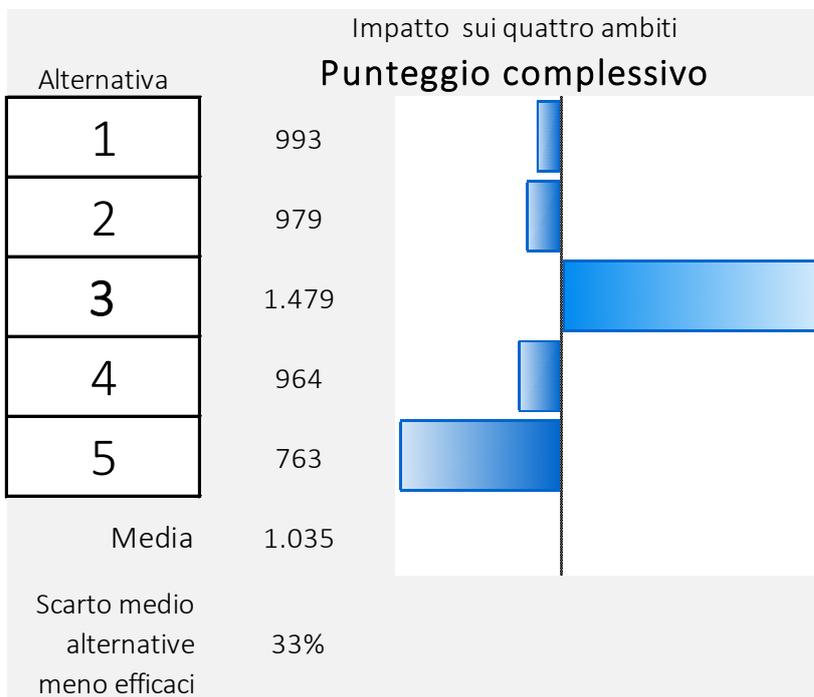
Per l'ambito di impatto B. Paesistico e storico, le alternative più efficaci sono ancora la 3 e la 4. Quella meno performante la 2 che presenta il tratto maggiore su suolo ineditato e non affiancato a infrastrutture esistenti.



Per l'ambito di impatto C. Ambiente ed ecosistemi, a sostanziale parità di interferenza con le aree tutelate, le alberature e l'impatto acustico potenziale (in relazione alla distanza con i ricettori più sensibili), l'alternativa più performante è la 3. Le alternative 4 e 5 sono le più penalizzate, in particolare dalle interferenze con le alberature preesistenti.



Per l'ambito di impatto D. Funzionale, l'alternativa più efficace è la 3 per la velocità commerciale, minore lunghezza del tracciato e quindi dei tempi di percorrenza e le prestazioni trasportistiche, di poco superiore alla 2. Le altre alternative presentano un'efficacia minore anche se l'alternativa 4 è prossima al valore medio della serie mentre la 1 e la 5 sono più distaccate nel senso di una minore efficacia.



Complessivamente, l'**alternativa maggiormente efficace è la 3**: la rilevanza dello scarto (+43% dal valore medio della serie) è legata tanto a fattori prestazionali (come la velocità commerciale) quanto al minore impatto ambientale essendo il tracciato affiancato alla ferrovia Bologna-Ancona. La rilevante velocità commerciale compensa in termini di attrattività l'effetto trasportistico di riduzione delle fermate e il relativo allentamento dalle aree residenziali a maggiore densità.

Le figure seguenti mostrano i differenti involucri del bacino dei 500 metri dalle fermate dell'alternativa 1 (quella del progetto 2018) e la numero 3, qui proposta come aggiornamento del tracciato in quanto maggiormente efficace.

Fig. 10 | Bacino dei 500 metri: confronto tra le alternative 1 (tracciato 2018) e 3 (qui proposta come aggiornamento del tracciato) – parte 1

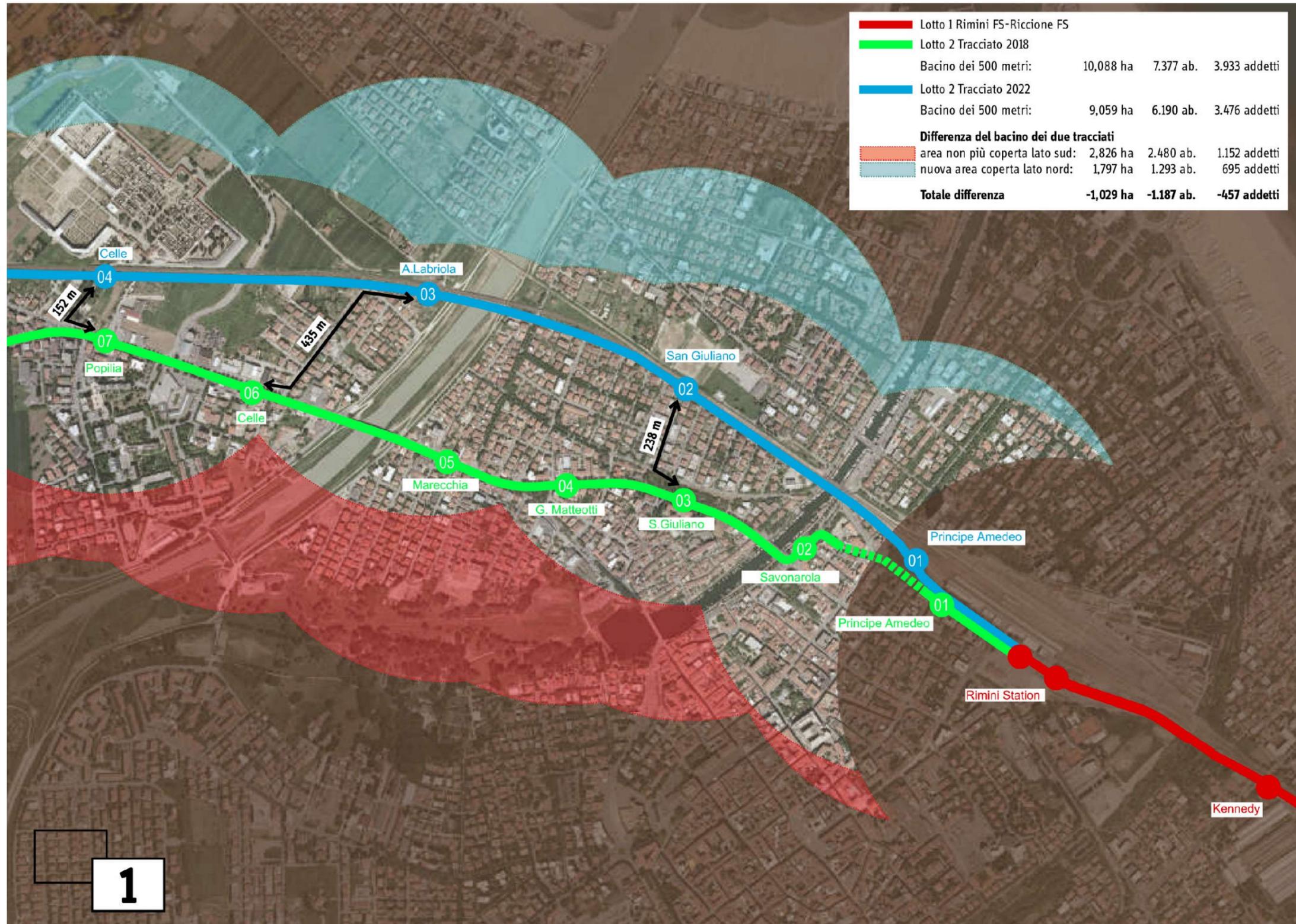
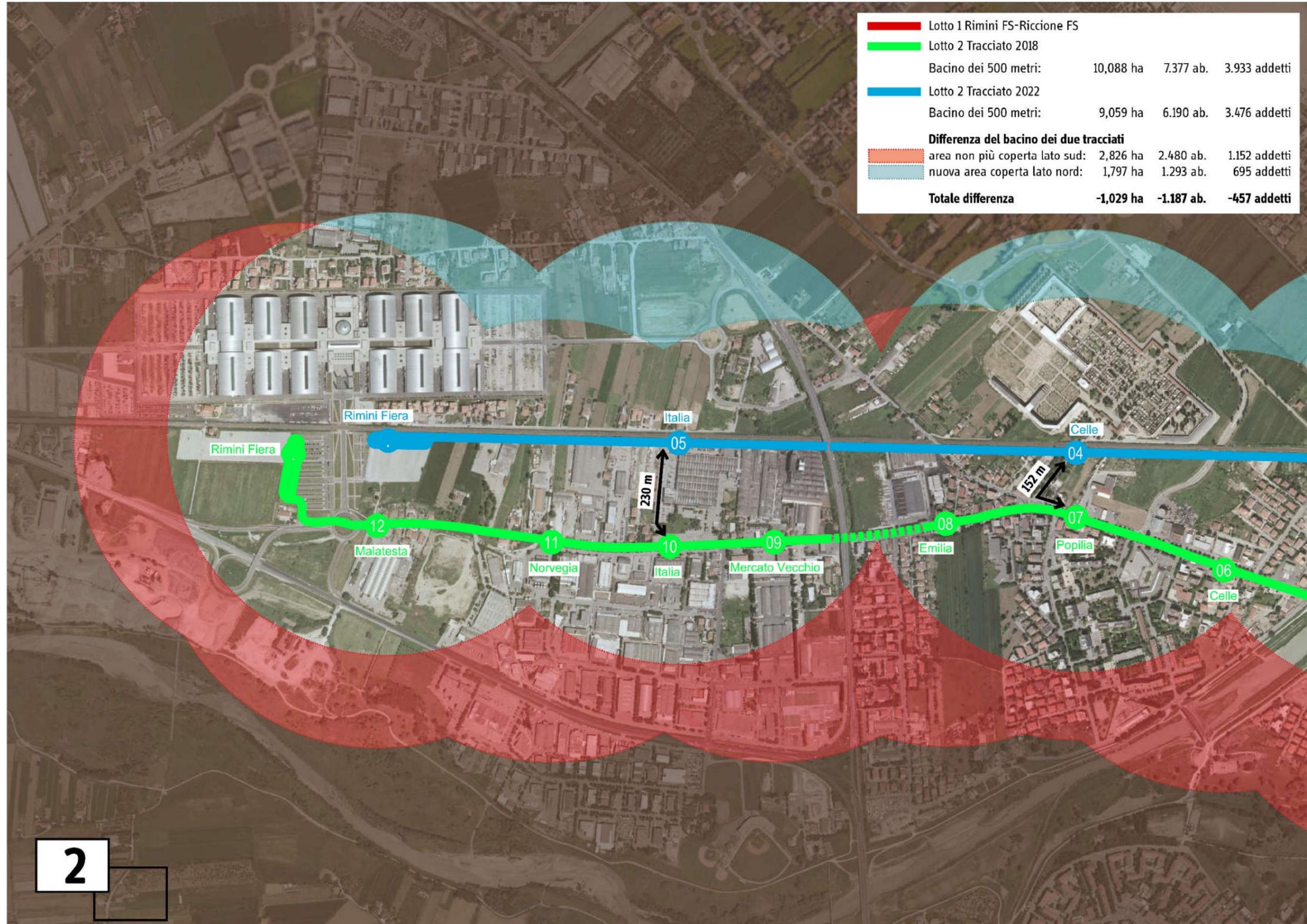


Fig. 11 | Bacino dei 500 metri: confronto tra le alternative 1 (tracciato 2018) e 3 (qui proposta come aggiornamento del tracciato) – parte 2



Tab. 4 | Analisi multicriteri – Tabella A: attribuzione valori relativi – parte 1. Le caselle in giallo sono basate sulla scala di giudizio Alto = migliore ⇒ basso=peggiore; quelle in azzurro sulla scala inversa, Alto = peggiore ⇐ basso=migliore

Ambito	Criterio		Misura	U.M.	1	2	3	4	5
A. Socio-urbanistico	A.1	Compatibilità con gli strumenti urbanistici vigenti	km di tracciato insistente su corridoi della mobilità previsti dal quadro programmatico vigente	km	0,00	0,00	4,10	3,25	1,20
	A.2	Accessibilità ad aree residenziali	Numero residenti entro 500 metri per lato dal corridoio	N	25.346	23.141	24.239	24.475	25.025
	A.3	Prossimità produttiva	Numero addetti entro 500 metri per lato dal corridoio	N	12.769	11.926	11.902	12.788	12.776
	A.4	Prossimità sociale	Numero di piazze e luoghi di aggregazione entro 500 metri dal corridoio	N	7,00	6,00	4,00	5,00	6,00
B. Paesistico e storico	B.1	Compatibilità con il paesaggio naturale	km di tracciato insistente su zone del paesaggio naturale	km	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	B.2	Compatibilità con il paesaggio agrario	km di tracciato insistente su zone del paesaggio agrario	km	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00
	B.3	Compatibilità e rischio archeologica	km di tracciato insistente su aree e ambiti di interesse archeologico	km	0,84	0,84	0,00	0,32	0,84
C. Ambiente ed ecosistemi	C.1	Impatto con il sottosuolo	Totale dell'escavato prodotto	m ³	9.450,00	9.193,50	13.325,00	13.269,00	11.484,75
	C.2	Interferenza con il reticolo idrografico	m di tracciato ricadente in alveo di fiumi, fossi e torrenti o aree umide diviso per i km totali di sviluppo su opere d'arte di nuova realizzazione	m	0,00	0,00	175,00	110,00	65,00
	C.3	Impatto vegetazionale	Alberature rilevanti (oltre i 5 metri di altezza) adiacenti al corridoio	N	248	198	15	98	192

Tab. 5 | Analisi multicriteri – **Tabella A:** attribuzione valori assoluti – parte 2. Le caselle in giallo sono basate sulla scala di giudizio Alto = migliore ⇒ basso=peggiore; quelle in azzurro sulla scala inversa, Alto = peggiore ⇐ basso=migliore

Ambito	Criterio		Misura	U.M.	1	2	3	4	5
C. Ambiente ed ecosistemi	C.4	Intrusione visuale	Altezza media del bifilare dalla livelletta moltiplicato la lunghezza sopraterra del corridoio su viabilità non preesistente	m x km	0,00	0,00	22,55	17,89	6,60
	C.5	Impatto acustico	Numero di ricettori sensibili entro 500 metri per lato dal corridoio	N	12	12	10	11	11
	C.6	Impatto climalterante	Energia grigia sull'intero ciclo di vita dell'opera (realizzazione, esercizio, fine vita, valutata in 20 anni) meno le emissioni climalteranti evitate dagli spostamenti privati evitati	t di CO2EQ	-1.728.383	-1.664.917	-1.630.038	-1.528.536	-1.635.039
D. Funzionale	D.1	Efficienza del trasporto pubblico	Riduzione ore totali trascorse sul tpl in ora di punta	Ore	493,30	581,96	597,60	576,03	523,83
	D.2	Efficienza del trasporto privato	Riduzione ore totali trascorse sulla rete del trasporto privato in ora di punta	Ore	312,75	467,26	494,53	456,93	365,95
	D.3	Produttività specifica	Domanda per giorno feriale invernale	Pax	8.758	8.338	7.359	7.648	8.349
	D.4	Efficacia modale	Percorrenze (passeggeri per le distanze percorse) sottratte al trasporto privato	Pax km	13.969	11.265	10.787	11.445	13.038
	D.5	Efficacia trasportistica	Riduzione (in valore assoluto) del totale dei km di rete stradale in congestione rispetto allo scenario di riferimento	Δ(V/C >95%)	0,00640	0,02697	0,03060	0,02559	0,01348

Gradazione scala di giudizio

Alto = Buono ⇒ Basso = Mediocre

Alto = Mediocre ⇐ Basso = Buono

Tab. 6 | Analisi multicriteri – Tabella B: attribuzione valori relativi – parte 1. Le caselle in giallo sono basate sulla scala di giudizio Alto = migliore ⇒ basso=peggiore; quelle in azzurro sulla scala inversa, Alto = peggiore ⇐ basso=migliore

Ambito	Criterio	Misura	U.M.	1	2	3	4	5	
A. Socio-urbanistico	A.1	Compatibilità con gli strumenti urbanistici vigenti	km di tracciato insistente su corridoi della mobilità previsti dal quadro programmatico vigente diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100	0,00	0,00	100,00	73,05	26,25
	A.2	Accessibilità ad aree residenziali	Numero residenti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km	6.034,76	5.663,49	5.911,95	5.497,53	5.474,73
	A.3	Prossimità produttiva	Numero addetti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km	3.040,24	2.918,75	2.902,93	2.872,42	2.795,01
	A.4	Prossimità sociale	Numero di piazze e luoghi di aggregazione entro 500 metri dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km	1,67	1,47	0,98	1,12	1,31
B. Paesistico e storico	B.1	Compatibilità con il paesaggio naturale	km di tracciato insistente su zone del paesaggio naturale diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100	0,20*	0,20*	0,20*	0,20*	0,20*
	B.2	Compatibilità con il paesaggio agrario	km di tracciato insistente su zone del paesaggio agrario diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100	2,10*	10,52	2,10*	2,10*	2,10*
	B.3	Compatibilità e rischio archeologica	km di tracciato insistente su aree e ambiti di interesse archeologico diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100	20,00	20,56	4,10	7,19	18,38
C. Ambiente ed ecosistemi	C.1	Impatto con il sottosuolo	Totale dell'escavato prodotto diviso per i km totali di sviluppo	m ³ /km	2.250,00	2.250,00	3.250,00	2.980,46	2.512,52
	C.2	Interferenza con il reticolo idrografico	m di tracciato ricadente in alveo di fiumi, fossi e torrenti o aree umide diviso per i km totali di sviluppo su opere d'arte di nuova realizzazione	m/km x 100	500,00	500,00	4.268,29	2.470,80	1.422,01
	C.3	Impatto vegetazionale	Alberature rilevanti (oltre i 5 metri di altezza) adiacenti al corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km	59,05	48,46	3,66	22,01	42,00

Tab. 7 | Analisi multicriteri – Tabella B: attribuzione valori relativi – parte 1. Le caselle in giallo sono basate sulla scala di giudizio Alto = migliore ⇒ basso=peggiore; quelle in azzurro sulla scala inversa, Alto = peggiore ⇐ basso=migliore

Ambito	Criterio		Misura	U.M.	1	2	3	4	5
C. Ambiente ed ecosistemi	C.4	Intrusione visuale	Altezza media del bifilare dalla livelletta moltiplicata la lunghezza sopraterra del corridoio su viabilità non preesistente	m x km/km	0,20*	0,20*	5,50	4,02	1,44
	C.5	Impatto acustico	Numero di ricettori sensibili entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km	2,86	2,94	2,44	2,47	2,41
	C.6	Impatto climalterante	Energia grigia sull'intero ciclo di vita dell'opera (realizzazione, esercizio, fine vita, valutata in 20 anni) meno le emissioni climalteranti evitate dagli spostamenti privati evitati	t di CO ₂ EQ/km	-411.520	-407.469	-397.570	-343.337	-357.698
D. Funzionale	D.1	Efficienza del trasporto pubblico	Riduzione ore totali trascorse sul tpl in ora di punta	Ore/km	117	142	146	129	115
	D.2	Efficienza del trasporto privato	Riduzione ore totali trascorse sulla rete del trasporto privato in ora di punta	Ore/km	74	114	121	103	80
	D.3	Produttività specifica	Domanda per giorno feriale invernale diviso per i km totali di sviluppo	Pax/km	2.085	2.041	1.795	1.718	1.827
	D.4	Efficacia modale	Percorrenze (passeggeri per le distanze percorse) sottratte al trasporto privato diviso per i km totali di sviluppo	Pax km/km	3.326	2.757	2.631	2.571	2.852
	D.5	Efficacia trasportistica	Riduzione (in valore assoluto) del totale dei km di rete stradale in congestione rispetto allo scenario di riferimento diviso per i km totali di sviluppo (in fattore moltiplicativo mille)	$\Delta(V/C >95\%) / \text{km} \times 100$	1.524	6.601	7.463	5.749	2.950

(*) Punteggio calcolato pari a zero, pertanto sostituito dal 20% del valore della media dei valori non nulli della serie (protezione dalla distorsione dell'effetto "tutto-niente")

Gradazione scala di giudizio

Alto = Buono ⇒ Basso = Mediocre

Alto = Mediocre ⇐ Basso = Buono

Tab. 8 | Analisi multicriteri – Tabella C parte 1: omogeneizzazione dei valori relativi delle caselle in celeste, sulla medesima scala di giudizio Alto = migliore ⇒ basso=peggiore. Quelli delle caselle in giallo restano invariati rispetto alla tabella precedente

Ambito	Criterio		Misura	U.M.	1	2	3	4	5
A. Socio-urbanistico	A.1	Compatibilità con gli strumenti urbanistici vigenti	km di tracciato insistente su corridoi della mobilità previsti dal quadro programmatico vigente diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100	0,00	0,00	100,00	73,05	26,25
	A.2	Accessibilità ad aree residenziali	Numero residenti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km	6.034,76	5.663,49	5.911,95	5.497,53	5.474,73
	A.3	Prossimità produttiva	Numero addetti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km	3.040,24	2.918,75	2.902,93	2.872,42	2.795,01
	A.4	Prossimità sociale	Numero di piazze e luoghi di aggregazione entro 500 metri dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km	1,67	1,47	0,98	1,12	1,31
B. Paesistico e storico	B.1	Compatibilità con il paesaggio naturale	km di tracciato insistente su zone del paesaggio naturale diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	B.2	Compatibilità con il paesaggio agrario	km di tracciato insistente su zone del paesaggio agrario diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100	501,13	100,00	501,13	501,13	501,13
	B.3	Compatibilità e rischio archeologica	km di tracciato insistente su aree e ambiti di interesse archeologico diviso per i km totali di sviluppo	km/km x 100	102,79	100,00	501,41	286,01	111,87
C. Ambiente ed ecosistemi	C.1	Impatto con il sottosuolo	Totale dell'escavato prodotto diviso per i km totali di sviluppo	m ³ /km	144,44	144,44	100,00	109,04	129,35
	C.2	Interferenza con il reticolo idrografico	m di tracciato ricadente in alveo di fiumi, fossi e torrenti o aree umide diviso per i km totali di sviluppo su opere d'arte di nuova realizzazione	m/km x 100	853,66	853,66	100,00	172,75	300,16
	C.3	Impatto vegetazionale	Alberature rilevanti (oltre i 5 metri di altezza) adiacenti al corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km	100,00	121,85	1.613,97	268,24	140,58

Tab. 9 | Analisi multicriteri – Tabella C parte 2: omogeneizzazione dei valori relativi delle caselle in celeste, sulla medesima scala di giudizio Alto = migliore ⇒ basso=peggiore. Quelli delle caselle in giallo restano invariati rispetto alla tabella precedente

Ambito	Criterio		Misura	U.M.	1	2	3	4	5
C. Ambiente ed ecosistemi	C.4	Intrusione visuale	Altezza media del bifilare dalla livelletta moltiplicato la lunghezza sopraterra del corridoio su viabilità non preesistente	m x km/km	2.750,00	2.750,00	100,00	136,90	380,92
	C.5	Impatto acustico	Numero di ricettori sensibili entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	N/km	102,79	100,00	120,41	118,86	122,04
	C.6	Impatto climalterante	Energia grigia sull'intero ciclo di vita dell'opera (realizzazione, esercizio, fine vita, valutata in 20 anni) meno le emissioni climalteranti evitate dagli spostamenti privati evitati	t di CO ₂ EQ/km	-411.519	-407.468	-397.570	-343.336	-357.698
D. Funzionale	D.1	Efficienza del trasporto pubblico	Riduzione ore totali trascorse sul tpl in ora di punta	Ore/km	117,45	142,43	145,76	129,39	114,60
	D.2	Efficienza del trasporto privato	Riduzione ore totali trascorse sulla rete del trasporto privato in ora di punta	Ore/km	74,46	114,36	120,62	102,64	80,06
	D.3	Produttività specifica	Domanda per giorno feriale invernale diviso per i km totali di sviluppo	Pax/km	2.085,24	2.040,63	1.794,88	1.717,88	1.826,51
	D.4	Efficacia modale	Percorrenze (passeggeri per le distanze percorse) sottratte al trasporto privato diviso per i km totali di sviluppo	Pax km/km	3.325,91	2.756,87	2.631,06	2.570,84	2.852,26
	D.5	Efficacia trasportistica	Riduzione (in valore assoluto) del totale dei km di rete stradale in congestione rispetto allo scenario di riferimento diviso per i km totali di sviluppo (in fattore moltiplicativo mille)	$\Delta(V/C >95\%) / \text{km} \times 100$	1.523,81	6.600,59	7.463,41	5.749,04	2.949,67

Tab. 10 | Analisi multicriteri – **Tabella D** parte 1: calcolo della mediana μ_e e omogeneizzazione al valore di riferimento $k = 0,5 \cdot \mu_e$

Ambito	Criterio	Misura	50% Mediana	1	2	3	4	5	
A. Socio- urbanistico	A.1	Compatibilità con gli strumenti urbanistici vigenti	km di tracciato insistente su corridoi della mobilità PRG/PUMS diviso per i km totali di sviluppo	13	0	0	762	556	200
	A.2	Accessibilità ad aree residenziali	Numero residenti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	2.832	213	200	209	194	193
	A.3	Prossimità produttiva	Numero addetti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	1.451	209	201	200	198	193
	A.4	Prossimità sociale	Numero di piazze e luoghi di aggregazione entro 500 metri dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	1	254	224	149	171	200
B. Paesistico e storico	B.1	Compatibilità con il paesaggio naturale	km di tracciato insistente su zone del paesaggio naturale diviso per i km totali di sviluppo	50	200	200	200	200	200
	B.2	Compatibilità con il paesaggio agrario	km di tracciato insistente su zone del paesaggio agrario diviso per i km totali di sviluppo	251	200	40	200	200	200
	B.3	Compatibilità e rischio archeologica	km di tracciato insistente su aree e ambiti di interesse archeologico diviso per i km totali di sviluppo	56	184	179	896	511	200
C. Ambiente ed ecosistemi	C.1	Impatto con il sottosuolo	Totale dell'escavato prodotto diviso per i km totali di sviluppo	65	223	223	155	169	200
	C.2	Interferenza con il reticolo idrografico	km di tracciato ricadente in alveo di fiumi, fossi e torrenti o aree umide diviso per i km totali di sviluppo	150	569	569	67	115	200
	C.3	Impatto vegetazionale	Alberature rilevanti (oltre i 5 metri di altezza) adiacenti al corridoio diviso per i km totali di sviluppo	70	142	173	2.296	382	200

Tab. 11| Analisi multicriteri – **Tabella D** parte 2: calcolo della mediana μ e omogeneizzazione al valore di riferimento $k = 0,5 \cdot \mu$

Ambito	Criterio		Misura	50% Mediana	1	2	3	4	5
C. Ambiente ed ecosistemi	C.4	Intrusione visuale	Altezza media del bifilare dalla livelletta moltiplicato la lunghezza sopraterra del corridoio su viabilità non preesistente	190	1.444	1.444	53	72	200
	C.5	Impatto acustico	Numero di ricettori sensibili entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo	59	173	168	203	200	205
	C.6	Impatto climalterante	Energia grigia sull'intero ciclo di vita dell'opera (realizzazione, esercizio, fine vita, valutata in 20 anni) meno le emissioni climalteranti evitate dagli spostamenti privati evitati	-198.785	207	205	200	173	180
D. Funzionale	D.1	Efficienza della rete del trasporto pubblico	Riduzione ore totali trascorse sul tpl in ora di punta	65	182	220	225	200	177
	D.2	Efficienza della rete del trasporto privato	Riduzione ore totali trascorse sulla rete del trasporto privato in ora di punta	51	145	223	235	200	156
	D.3	Produttività specifica	Domanda per giorno feriale invernale diviso per i km totali di sviluppo	913	228	223	197	188	200
	D.4	Efficacia modale	Percorrenze (passeggeri per le distanze percorse) sottratte al trasporto privato diviso per i km totali di sviluppo	1.378	241	200	191	187	207
	D.5	Efficacia trasportistica	Riduzione (in valore assoluto) del totale dei km di rete stradale in congestione rispetto allo scenario di riferimento diviso per i km totali di sviluppo (in fattore moltiplicativo mille)	2.875	53	230	260	200	103

Tab. 12 | Analisi multicriteri – **Tabella E** parte 1: attribuzione punteggi finali come media aritmetica dei punteggi degli indicatori per categoria di impatto

Ambito	Criterio	Misura	1	2	3	4	5	Δ migliore/ peggiore	
A. Socio- urbanistico	A.1	Compatibilità con gli strumenti urbanistici vigenti	km di tracciato insistente su corridoi della mobilità PRG/PUMS diviso per i km totali di sviluppo	169	156	330	280	196	53%
	A.2	Accessibilità ad aree residenziali	Numero residenti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo						
	A.3	Prossimità produttiva	Numero addetti entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo						
	A.4	Prossimità sociale	Numero di piazze e luoghi di aggregazione entro 500 metri dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo						
B. Paesistico e storico	B.1	Compatibilità con il paesaggio naturale	km di tracciato insistente su zone del paesaggio naturale diviso per i km totali di sviluppo	195	140	432	304	200	68%
	B.2	Compatibilità con il paesaggio agrario	km di tracciato insistente su zone del paesaggio agrario diviso per i km totali di sviluppo						
	B.3	Compatibilità e rischio archeologica	km di tracciato insistente su aree e ambiti di interesse archeologico diviso per i km totali di sviluppo						
C. Ambiente ed ecosistemi	C.1	Impatto con il sottosuolo	Totale dell'escavato prodotto diviso per i km totali di sviluppo	460	464	495	185	198	63%
	C.2	Interferenza con il reticolo idrografico	km di tracciato ricadente in alveo di fiumi, fossi e torrenti o aree umide diviso per i km totali di sviluppo						
	C.3	Impatto vegetazionale	Alberature rilevanti (oltre i 5 metri di altezza) adiacenti al corridoio diviso per i km totali di sviluppo						

Tab. 13 | Analisi multicriteri – **Tabella E** parte 2: attribuzione punteggi finali come media aritmetica dei punteggi degli indicatori per categoria di impatto

Ambito	Criterio		Misura	1	2	3	4	5	Δ migliore/ peggiore
C. Ambiente ed ecosistemi	C.4	Intrusione visuale	Altezza media del bifilare dalla livelletta moltiplicata la lunghezza sopraterra del corridoio su viabilità non preesistente	460	464	495	185	198	63%
	C.5	Impatto acustico	Numero di ricettori sensibili entro 500 metri per lato dal corridoio diviso per i km totali di sviluppo						
	C.6	Impatto climalterante	Energia grigia sull'intero ciclo di vita dell'opera (realizzazione, esercizio, fine vita, valutata in 20 anni) meno le emissioni climalteranti evitate dagli spostamenti privati evitati						
D. Funzionale	D.1	Efficienza della rete del trasporto pubblico	Riduzione ore totali trascorse sul tpl in ora di punta	170	219	221	195	169	24%
	D.2	Efficienza della rete del trasporto privato	Riduzione ore totali trascorse sulla rete del trasporto privato in ora di punta						
	D.3	Produttività specifica	Domanda per giorno feriale invernale diviso per i km totali di sviluppo						
	D.4	Efficacia modale	Percorrenze (passeggeri per le distanze percorse) sottratte al trasporto privato diviso per i km totali di sviluppo						
	D.5	Efficacia trasportistica	Riduzione (in valore assoluto) del totale dei km di rete stradale in congestione rispetto allo scenario di riferimento diviso per i km totali di sviluppo (in fattore moltiplicativo mille)						

Punteggio totale (non pesato)	993	979	1.479	964	763	48%
-------------------------------	------------	------------	--------------	------------	------------	------------

Per l'energia grigia e l'impatto climalterante complessivo, di seguito il dettaglio dei calcoli per le due alternative di progetto:

Tab. 14 | Analisi delle alternative: energia grigia e l'impatto climalterante complessivo sull'intero ciclo di vita dell'opera

Indicatore	U.M.	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5
Lunghezza del tracciato	km	4,20	4,09	4,10	4,45	4,57
Produzione annuale	vkm anno	890.000	890.000	1.068.000	890.000	890.000
Percorrenze evitate sul privato	vkm anno	3.492.208	3.324.735	2.696.841	3.049.601	3.329.121
Percorrenze evitate sul resto del tpl	vkm anno	1.047.059	1.047.059	1.256.471	1.047.059	1.047.059
Autobus termici non acquistati sull'intero ciclo di vita dell'opera	N.	50	50	60	50	50
Energia grigia infrastruttura	kg CO ₂ /anno	250.505	240.283	232.718	255.605	264.014
Energia grigia veicoli	kg CO ₂ /anno	102.111	102.111	102.111	102.111	110.187
Energia grigia batterie	kg CO ₂ /anno	624.721	624.721	624.721	624.721	624.721
Bilancio energia grigia	kg CO₂/anno	977.336	967.115	959.550	982.436	998.922
Emissioni climalteranti dall'esercizio filoviario	kg CO ₂ /anno	1.069.558	1.069.558	1.283.469	1.069.558	1.069.558
Emissioni climalteranti risparmiate dal privato	kg CO ₂ /anno	-925.435	-881.055	-714.663	-808.144	-882.217
Emissioni climalteranti risparmiate dal resto del tpl	kg CO ₂ /anno	-1.200.976	-1.200.976	-1.441.172	-1.200.976	-1.200.976
Emissioni climalteranti risparmiate per gli autobus	kg CO ₂ /anno	-396.405	-396.405	-475.686	-396.405	-396.405
Energia grigia risparmiata da manutenzione stradale	kg CO ₂ /anno	-1.252.460	-1.223.152	-1.241.535	-1.175.004	-1.223.920
Bilancio complessivo emissioni climalteranti	kg CO₂/anno	-1.728.383	-1.664.917	-1.630.038	-1.528.536	-1.635.039

6 Analisi comparativa delle alternative tecnologiche

6.1 Sistemi filoviari

Nato negli anni 30 del ventesimo secolo, la sua adozione è legata al progressivo smantellamento di vecchie linee tranviarie. Al tempo il filobus univa infatti le caratteristiche di comfort, flessibilità e semplicità delle autolinee con l'alimentazione elettrica a captazione aerea, che garantiva silenziosità e minori consumi. I veicoli sono mossi da motori elettrici alimentati in corrente continua da una linea aerea dotata sia di cavo di potenza che di ritorno, il cui contatto col veicolo è assicurato da due aste (trolley) dotate di una certa libertà di movimento.

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



Fig. 12 | Filosnodato da 24 m in esercizio a Zurigo (Svizzera)

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

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

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

Tab. 15 | 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

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.

Il filobus è una vettura basata 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.

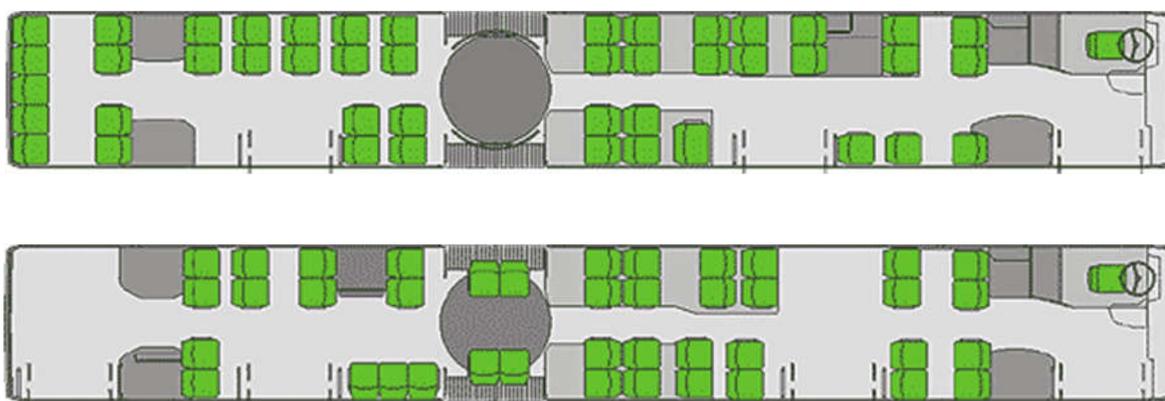
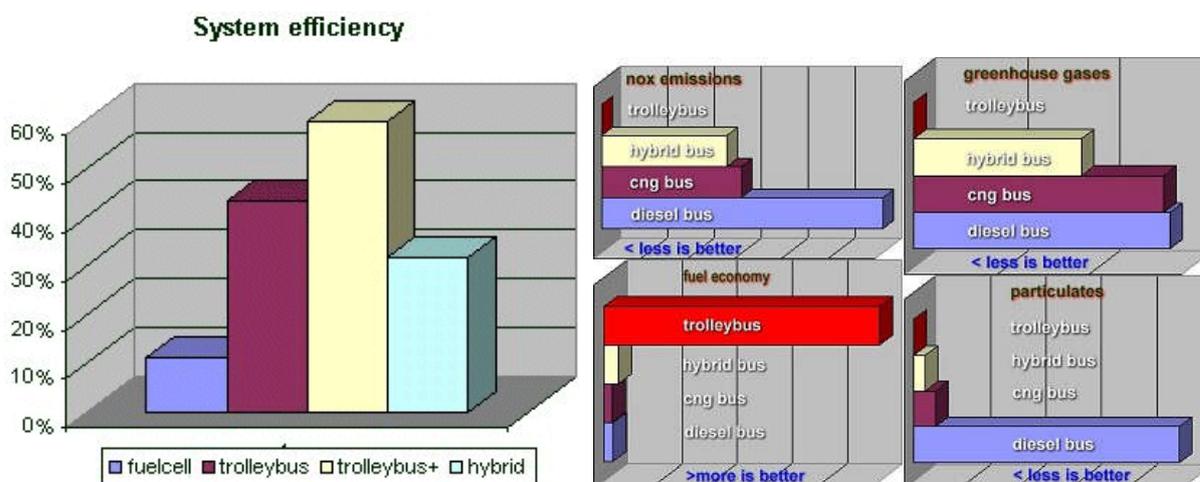


Fig. 13 | Filosnodato da 18 m: esempi di organizzazione delle sedute. L'architettura della trazione elettrica consente di gestire gli spazi in maniera meno rigida rispetto alla trazione termica (in basso)



Figg. 14 - 15 | Tra i veicoli su gomma, per quanto la ricerca sui vettori energetici alternativi (come l'idrogeno) stia facendo passi da gigante, il filobus (*trolleybus*, in inglese) è quello che presenta il rendimento maggiore (fonte UBC University of British Columbia)

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

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

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

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

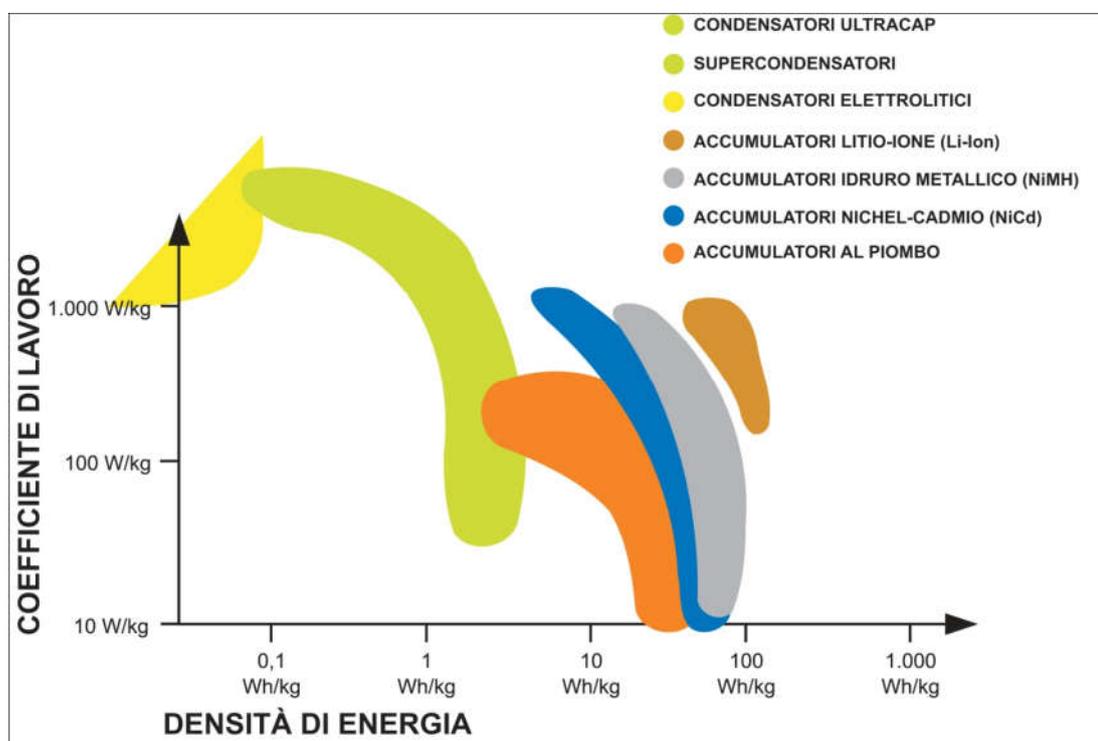


Fig. 16 | Uno dei maggiori elementi di sviluppo della tecnologia filoviaria è costituito dai sistemi di accumulo dell'energia per consentire la marcia anche in assenza di linea aerea. In questo senso il futuro è dato dai supercapacitori, che già oggi

presentano ottimi parametri di qualità/prezzo. I condensatori a doppio strato, rispetto alle batterie elettrochimiche, non sono soggetti ad usura: sopportano più di 500 000 cicli di carica/scarica con una durata di vita minima di 10 anni, senza che la capacità si modifichi in funzione del tempo. È particolarmente importante la loro capacità di poter essere caricati e scaricati a correnti molto elevate.

Per questa ragione sono il mezzo adatto per i cosiddetti freni rigenerativi. In questo caso l'energia cinetica dei veicoli viene trasformata in energia elettrica che all'azionamento può essere nuovamente utilizzata. Soprattutto nel traffico cittadino, i cui cicli di guida sono caratterizzati da continue accelerazioni e frenate, è possibile in questo modo risparmiare fino al 25% di energia.



Fig. 17 | Filobus Solaris 18 Metrostyle di Salisburgo (Austria)

6.1.1 Fattori competitivi

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

6.1.2 Svantaggi

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

6.1.3 Direzione evolutiva

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

6.2 Trazione elettrica

Il filobus è un autobus a trazione elettrica alimentato da una linea aerea bifilare con due conduttori sospesi sulla sede stradale, dai quali il veicolo capta l'energia elettrica tramite due aste di captazione.

Per un filobus l'alternativa *all-electric* all'alimentazione da bifilare comprende dispositivi di accumulo dell'energia con ricarica lenta in deposito oppure rapida: batterie e condensatori.

Il campo della conservabilità e portabilità dell'energia elettrica è in continuo sviluppo:

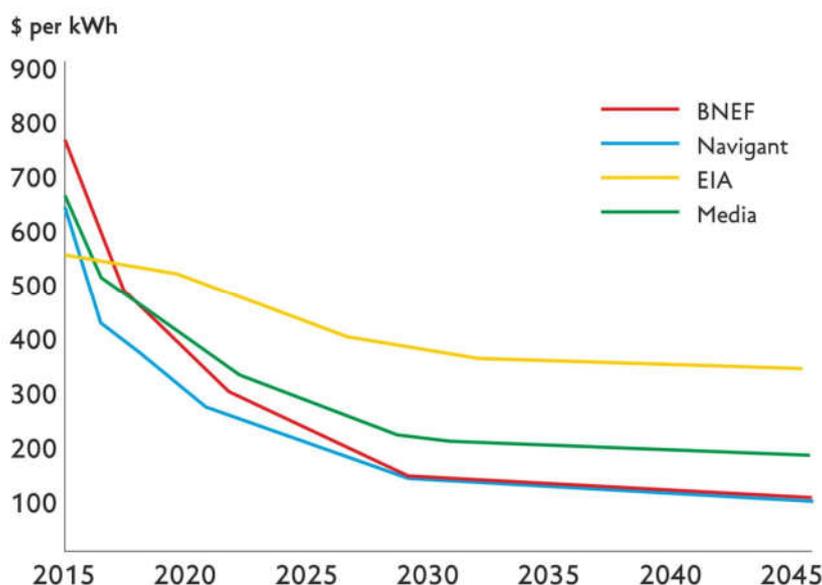


Fig. 18 | Proiezioni del prezzo (in dollari USA, 2015) delle batterie (elaborazione di A. Spinosa su dati Bloomberg New Energy Finance; Navigant Energy Industry Consulting; US Energy Information Administration)

Bisogna però avere ben chiaro che quello che è percepito come un rapido sviluppo delle batterie è in realtà un rapido sviluppo del mercato delle batterie. Affinché l'utilizzo di veicoli elettrici possa diffondersi è necessario risolvere tre problemi fondamentali: la densità energetica, il costo e il tempo di ricarica. Per fornire 1 kWh di energia serve un accumulatore almeno da 55 kg per un costo di mercato di circa 1.000 euro, ossia 1 euro per Wh. Siccome dopo circa 500 ricariche le batterie andranno sostituite, il costo finale è di 2 euro/kWh contro i 10 centesimi dell'energia da filo.

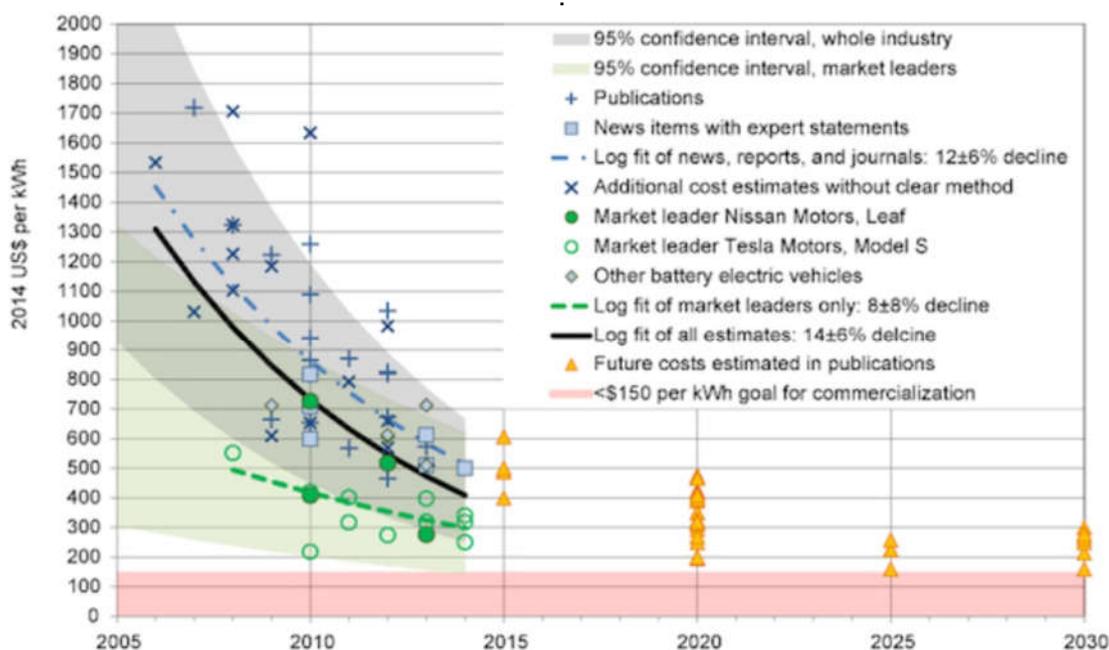


Fig. 19 | Costo delle batterie agli ioni di litio per veicoli elettrici (Bjorn Nykvist e Mans Nilsson, 2015)

Le batterie sono di moltissimi tipi con proprie caratteristiche differenti in base all'applicazione. Sono state la tecnologia più utilizzata perché l'accumulo elettrochimico è sperimentato da molto tempo e consolidato a livello industriale con minori costi di produzione (e acquisto da parte degli utilizzatori) e nota affidabilità delle prestazioni. Sono caratterizzate da alta energia specifica, ma a fronte di bassa potenza specifica, lunghi tempi necessari per la ricarica ed il degrado dei materiali che avviene nei cicli di carico e scarico con conseguente limitazione proprio del numero di cicli stessi. I principali vantaggi delle batterie sono dunque: alta energia specifica; ingombro relativamente ridotto; tecnologia consolidata; ampio e diffuso utilizzo industriale; bassi costi. Tra gli svantaggi: bassa potenza specifica; lunghi tempi di carica; limite massimo di cicli di carica scarica; scarsa elasticità alla risposta.

I supercondensatori, invece, sono di sviluppo assai più recente e, sebbene il loro funzionamento sia simile a quello delle batterie le tecnologie sono tuttora in fase di evoluzione causando al momento alti costi di acquisto e poca conoscenza nel merito. Infatti utilizzando la caratteristica di elevata potenza specifica, i supercondensatori assorbono grossi picchi di corrente per breve tempo, senza avere evidente riduzione del rendimento energetico con i continui cicli di carica e scarica. Questo li mette in competizione con le batterie seppur con

diverse caratteristiche. Entrambi permettono di conservare l'energia e la sua portabilità, ma il supercondensatore - caratterizzato da un'elevata capacità - permette lo stoccaggio di energia a bassi livelli di tensione con una elevata potenza specifica erogabile per poco tempo.

I principali vantaggi dei supercondensatori sono: alta potenza specifica; elevata dinamicità; tempo di carica molto ridotto; basso invecchiamento. Tra gli svantaggi: bassa energia specifica; scarica veloce; ingombro moderato; tecnologia sperimentale; costi elevati.

Essendo componenti di accumulo di energia ad elevata potenza (specifica) ma a bassa energia (specifica) possono essere usati in applicazioni che utilizzino grossi picchi di potenza per tempi brevi. Detto in altri termini l'energia accumulata per unità di massa è poca ma può essere usata come elevata potenza per poco tempo.

Accumulatore		Energia specifica (Wh/kg)		Efficienza (€/Wh)		Numero di cicli	Tempo di ricarica		Tensione di lavoro (Volt)	Vita media (anni)
piombo acido	PbO ₂	30	42	50	130	500	8h	12h	2,1	2
alcaline	Zn/MnO ₂	85	190	1.500	1.700	100	5h	10h	1,6	10
nikel-cadmio	NiCd/NiCad	20	40	150	210	100	3h	6h	1,3	5
litio-ferro-fosfato	LiFePo ₄	90	110	280	310	2.000	10'	15'	3,2	10
ioni di litio	Lilon	100	265	300	330	1.200	15'	30'	3,6	10
	LiMn ₂ O ₄	150	220	250	280	5.000	8'	12'	3,6	10
ossido di litio	Li ₂ O ₂	2.000	7.500	sperimentale		3.000	5'	10'	2,9	10
supercondensatore	---	2,5	10,0	5.000	8.500	1.000.000	1"	10"	2,7	20
				Rif. 0,15	0,18	da petrolio				
				0,08	0,15	da energia elettrica da filo (variabile)				

Fig. 20 | Caratteristiche prestazionali di alcuni tipi di accumulatori chimici a confronto con quelle dei supercondensatori

Per meglio spiegare, un supercondensatore (*supercapacitor*) è un particolare condensatore che ha la caratteristica di accumulare una quantità di carica elettrica eccezionalmente grande rispetto ai condensatori tradizionali. Può accumulare fino a 30 Wh per kg, circa un terzo dell'energia accumulabile da una batteria a ioni di litio a parità di peso ma attualmente costano più di tre volte tanto. A differenza di una batteria però i supercondensatori hanno una durata maggiore: anche se in laboratorio risulta pressoché infinita, in servizio a pieno carico può arrivare a 20 anni.

Un supercondensatore non è diverso da un condensatore tradizionale: è composto da una coppia di conduttori (detti armature) separati da un materiale isolante (detto dielettrico). La carica si concentra sulla superficie delle piastre e l'energia elettrostatica è immagazzinata nel materiale dielettrico posto tra le armature. Rispetto agli accumulatori chimici presentano il

vantaggio di poter essere caricati o scaricati quasi istantaneamente, garantendo un'elevatissima potenza specifica. Inoltre, hanno un numero di cicli di carica/scarica molto più elevato rispetto agli accumulatori tradizionali. Lo svantaggio più rilevante, sempre rispetto agli accumulatori chimici, è la bassa energia immagazzinata. È particolarmente importante la loro "capacità" di poter essere caricati e scaricati a correnti molto elevate. Per questa ragione sono il mezzo adatto per i cosiddetti freni rigenerativi e le ricariche ultrarapide in fermata.

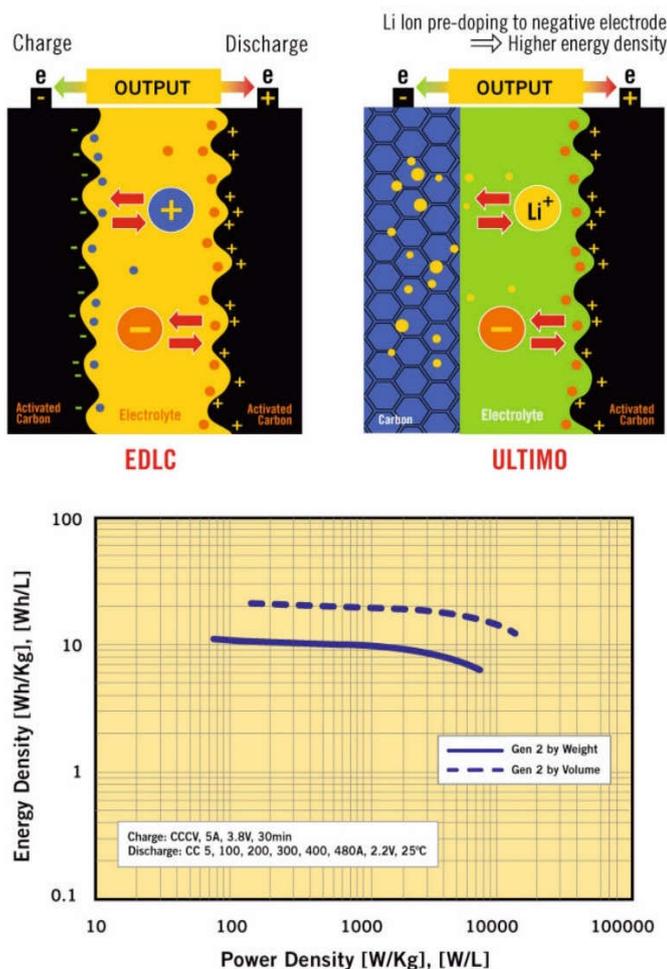


Fig. 21 | Supercondensatori: schema di carica e diagramma tra densità di potenza [W/kg] e densità energetica [Wh/kg]

Per il confronto delle alternative si considerano i seguenti parametri:

Densità media della popolazione	1.100 ab/km ²
Quota emissiva di polveri sottili dovuta al traffico stradale	60%
Tasso di utilizzo del trasporto pubblico	15%
Concentrazione media giornaliera del PM10	25 µg/m ³

Livello acustico L_{DEN} lungo il corridoio di progetto

57 dB(A)

Fig. 22 | Grandezze di riferimento del caso di studio

Dal punto di vista del costo energetico si assume un riferimento economico di 1,35 euro per litro di carburante (diesel). Il costo del kWh è calcolato sulla base dei coefficienti forniti dall'Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico sulla base del fabbisogno energetico annuale.

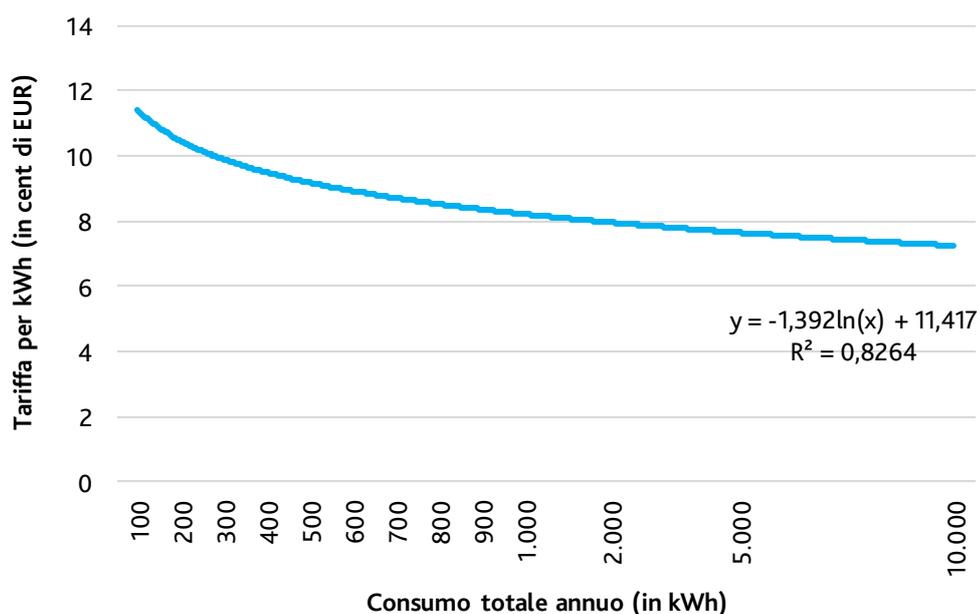


Fig. 23 | Curva di costo di un kWh sulla base del fabbisogno energetico annuale

Il costo sanitario (evitato) è calcolato (per difetto) su patologie di cui, allo stato attuale delle conoscenze, il nesso causa-effetto è ponderabile con un robusto indice di confidenza. Si tratta:

- per l'inquinamento atmosferico (Medparticles, 2015; Baccini et al., 2015; Janssen et al., 2016; Li et al., 2016) adenocarcinoma (AC), linfoma, asma e broncopneumopatia cronica ostruttiva (BCO);
- per l'inquinamento acustico (OMS, ISS, Environmental Acoustic American Society): annoyance e ipertensione arteriosa.

I valori di morbilità per ogni $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di incremento del $\text{PM}_{10\text{EQ}}$ rispetto al fondo naturale (Baccini et al., 2015) e la conseguente spesa sanitaria annuale attesa (ISS, Ministero della Salute⁶) sono i seguenti:

- AC: $64 \cdot 10^{-5}$; 69.400 €
- linfoma: $27 \cdot 10^{-6}$; 54.800 €
- asma: $92 \cdot 10^{-2}$; 810 €

⁶ Tariffari nazionali delle prestazioni del Servizio Sanitario Nazionale (Ministero della Salute)

- BCO: $88 \cdot 10^{-4}$; 4.440 €

Per il rumore ambientale i dati – in termini di morbilità ogni dB(A) di incremento del livello acustico L_{DEN}^7 sono:

- annoyance: $11 \cdot 10^{-2}$; 533 €
- ipertensione arteriosa: $33 \cdot 10^{-1}$; 1.905 €

Per il corridoio si trova che la relazione che stima la progressione della spesa sanitaria (Mehta et al., 2011) è:

$$C_H = 3,85 \text{ [euro]} \cdot TGM \frac{1}{10} \ln(d_t \cdot L)$$

Dove: 3,85 euro è una costante monetaria k e (assumendo il livello di fondo del PM10 pari a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$); TGM il traffico giornaliero medio; d_t è la densità territoriale del bacino della linea; L è la lunghezza del corridoio.

I parametri di riferimento sono i seguenti:

Pesi unitari

Batteria tipo Li-Ion 0,30 kg / kWh

Condensatore (ultracap) 5,08 kg / kWh

Costi medi

Pneumatici per autotrasporto 540 € cad.

Pavimentazione stradale (6/7/19) 15 €/m²

Pavimentazione stradale (6/7/29) 25 €/m²

contattore per strisciante 7.500 € cad.

Bifilare filoviario 840 €/m

Stazione di ricarica e-Bus 550.000 € cad.

Batteria Li-Ion per mezzo da 12m 23.700 € cad.

Batteria Li-Ion per mezzo da 18m 33.800 € cad.

Condensatore (ultracap) 0,022 €/FV

Fig. 24 | Costi unitari di riferimento

Bifilare 12 anni

Batterie tipo Li-Ion 5 milioni di cicli

Condensatore (ultracap) 50 milioni di cicli

⁷ Livello acustico equivalente giorno-sera-notte

Fig. 25 | Vita media di esercizio di alcuni elementi tecnici

Il primo confronto è sull'efficienza intrinseca ovvero sulla tara propria di ciascuna tecnologia. Dal punto di vista del peso specifico per ogni passeggero trasportato appare che auto- e filobus siano l'alternativa più efficiente.

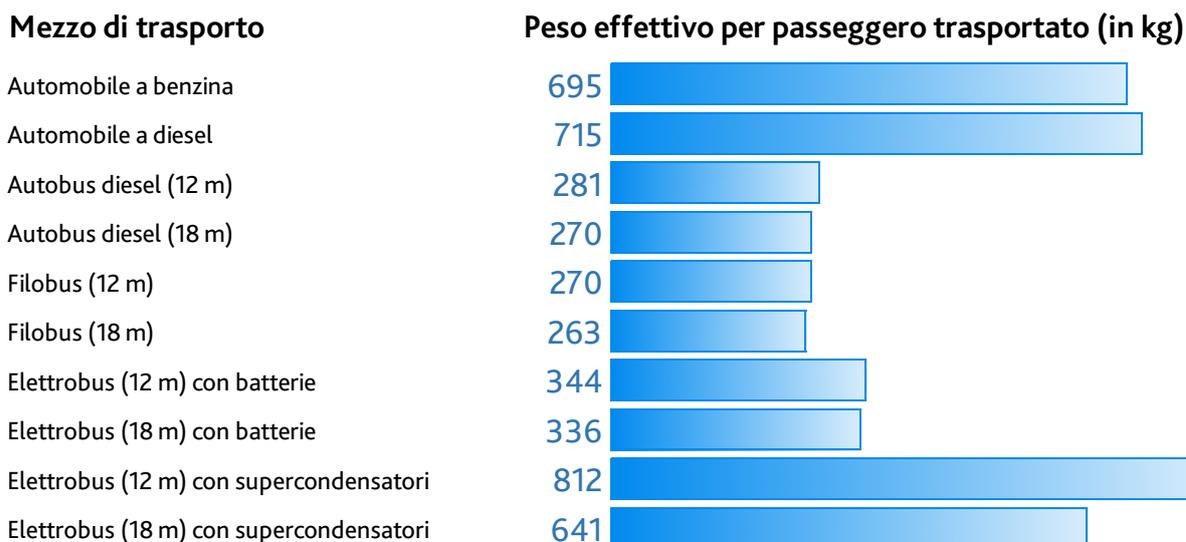


Fig. 26 | Peso unitario per passeggero trasportato

A parità di dimensioni un elettrobus a batterie pesa quasi il 30% in più, un elettrobus a condensatori il 40% in più.

Con il termine energia grigia si indica una metodologia per valutare l'ammontare totale dell'energia utilizzata nel corso dell'intera vita di un prodotto: estrazione delle materie prime, trasporto, trasformazione, montaggio, installazione, come pure la demolizione e lo smaltimento. La complessità ha un costo e l'energia grigia ne rappresenta un valido strumento di misura.

Mezzo di trasporto

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

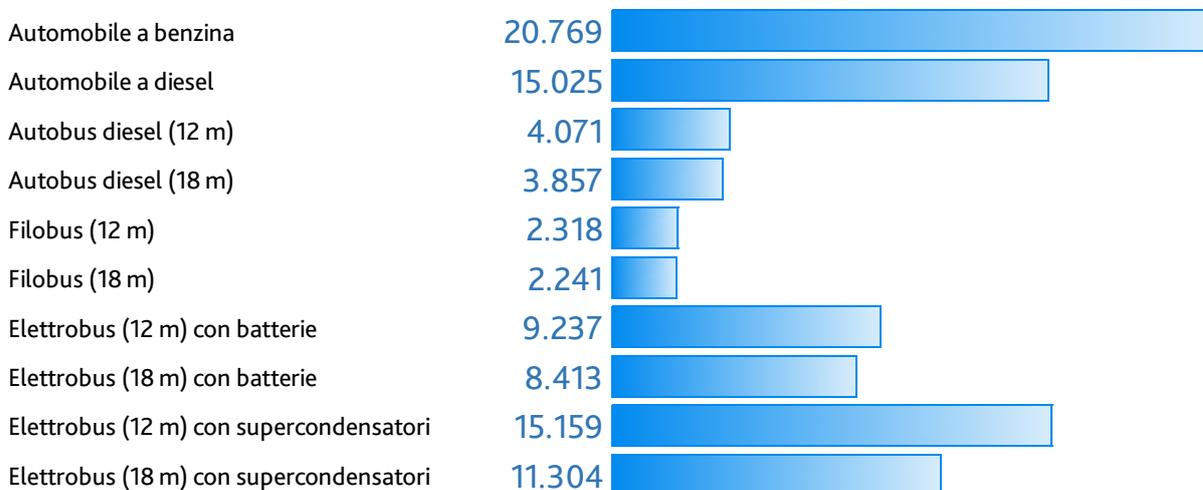


Fig. 27 | Energia grigia per posto offerto (kWh) su un ciclo di vita di servizio di 30 anni

Confrontando l'energia grigia per posto offerto (kWh) su un ciclo di vita di servizio di 30 anni, sempre rispetto ad una filovia con mezzi da 18 metri, si trova un incremento del 70% per un autobus diesel; 275% per un filobus a batterie; 400% per un elettrobus.

Rispetto alla sola energia di esercizio un articolato diesel ha un consumo superiore del 70% rispetto ad un filobus da 18 metri; il 28% in più per un filobus a batterie; il 163% in più per un elettrobus a condensatori.

Mezzo di trasporto

Energia totale per posto offerto (MWh) su un ciclo di vita di servizio di 25 anni

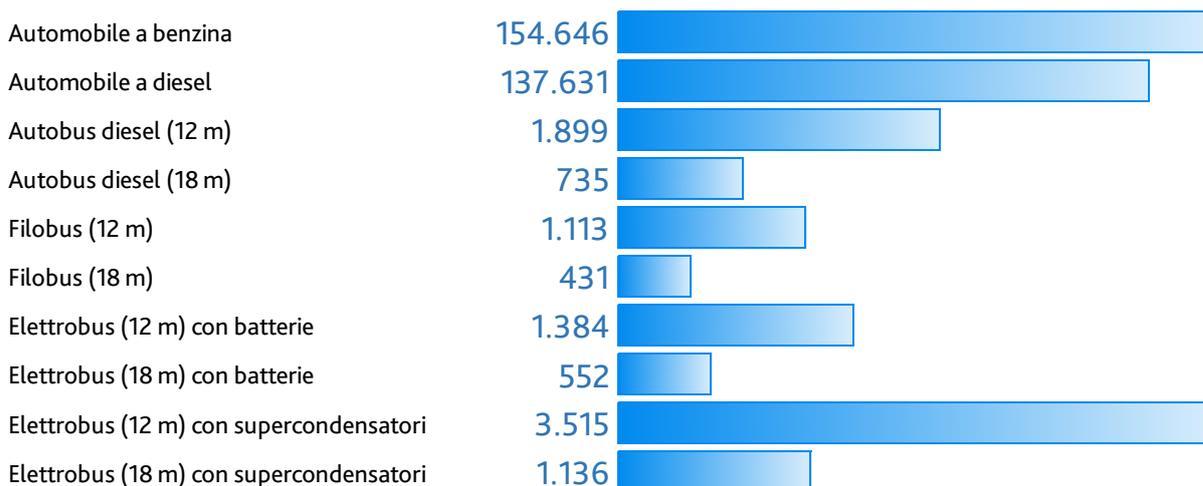


Fig. 28 | Energia totale per posto offerto (MWh) su un ciclo di vita di servizio di 30 anni

Questo comportamento si ritrova, naturalmente, nel costo complessivo di acquisto e esercizio (gestione, trazione e manutenzione) per 100 passeggeri anno trasportati: rispetto ad un filonodato da 18 metri, un autobus ha un costo maggiore del 28%; un elettrobus a batterie del 35%; un elettrosnodato a condensatori del 59%.

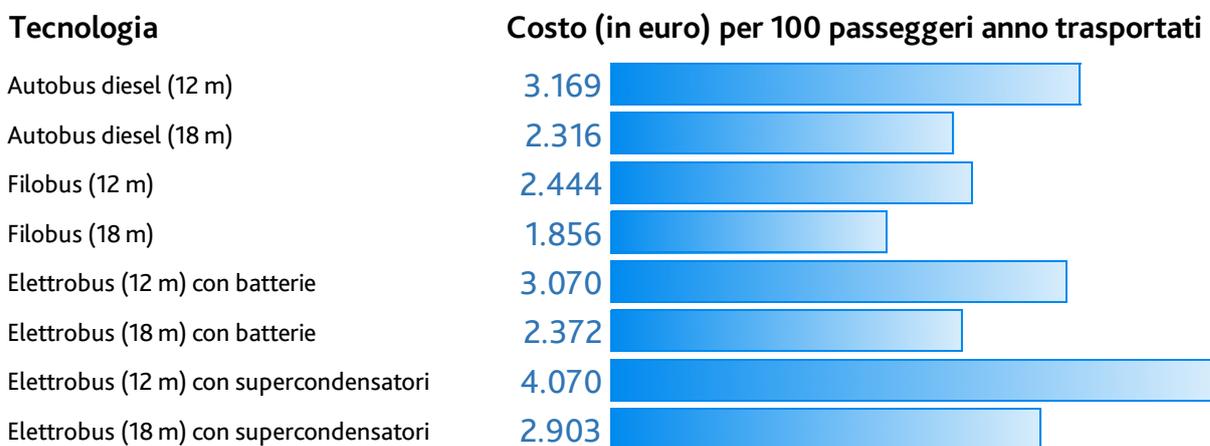


Fig. 29 | Costo complessivo (realizzazione più gestione e manutenzione) per 100 passeggeri anno trasportati

Le tabelle di dettaglio dei calcoli sono riportate in allegato al fondo della relazione.

6.3 Conclusioni dell'analisi

Dal punto di vista tecnologico sono state analizzate 8 alternative:

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



Sono stati analizzati i costi di acquisto e gestione di un servizio adeguato alla domanda di progetto. Il risultato è esemplificato dal confronto sul costo complessivo di acquisto e esercizio (gestione, trazione e manutenzione) per 100 passeggeri anno trasportati: rispetto ad un filodotato da 18 metri, un autobus ha un costo maggiore del 28%; un elettrobus a batterie del 35%; un elettrodotto a condensatori del 59%.

Il tracciato assunto per le simulazioni tecnologiche è quello migliore dall'analisi delle alternative di cui al capitolo 5.

L'analisi della tecnologia più efficiente ed efficace nella sua applicazione conferma come migliore la soluzione filoviaria già in uso sulla prima tratta del TRC.

Allegato: Tabelle di dettaglio del confronto tra le diverse tecnologie

Di seguito il dettaglio delle misure utilizzate per il confronto tra le possibili tecnologie per l'implementazione del corridoio Rimini FS – Fiera di Rimini.

Si tratta di 8 possibili alternative:

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

Tutti i costi sono espressi al valore di dicembre 2021.

La potenza nominale di filobus ed elettrobus è così assunta:

Mezzo	mezzo da 12 m	350			
	mezzo da 18 m	500			
	Costo	Posti totali (4 pp/mq)	Impianti di trazione	Impianti di accumulo energetico di bordo	
Automobile a benzina	13.000	4	0	0	
Automobile a diesel	17.000	4	0	0	
Autobus diesel (12 m)	250.000	90	0	0	
Autobus diesel (18 m)	400.000	150	0	0	
Filobus (12 m)	600.000	90	7.500.000	0	
Filobus (18 m)	900.000	150	7.500.000	0	
Elettrobus (12 m) con batterie per marcia autonoma	600.000	80	5.400.000	280.000	
Elettrobus (18 m) con batterie per marcia autonoma	900.000	130	5.400.000	400.000	
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	600.000	40	3.000.000	1.260.000	
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	900.000	80	3.000.000	1.800.000	

Tab. 16 | Costo dei mezzi e degli impianti di trazione

Mezzo	Costo	Posti totali (4 pp/mq)	Tara (kg)	Peso extra impianti di bordo (kg)	Peso del mezzo (kg)
Automobile a benzina	13.000	4	2.500	0	2.500
Automobile a diesel	17.000	4	2.580	0	2.580
Autobus diesel (12 m)	250.000	90	19.000	0	19.000
Autobus diesel (18 m)	400.000	150	30.000	0	30.000
Filobus (12 m)	600.000	90	18.000	0	18.000
Filobus (18 m)	900.000	150	29.000	0	29.000
Elettrobus (12 m) con batterie per marcia autonoma	600.000	80	18.000	3.889	21.889
Elettrobus (18 m) con batterie per marcia autonoma	900.000	130	29.000	5.556	34.556
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	600.000	40	18.000	11.667	29.667
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	900.000	80	29.000	16.667	45.667

Tab. 17 | Caratteristiche dimensionali

Mezzo	Vita media in km percorsi	Vita media in anni	Costo per p/anno (€)	Costo per milione di pkm/anno (€)
Automobile a benzina	120.000	10,8	300,0	27.083
Automobile a diesel	180.000	15,5	275,0	23.611
Autobus diesel (12 m)	7.000.000	14,0	198,4	397
Autobus diesel (18 m)	7.000.000	14,0	190,5	381
Filobus (12 m)	11.000.000	22,0	303,0	606
Filobus (18 m)	11.000.000	22,0	272,7	545
Elettrobus (12 m) con batterie per marcia autonoma	11.000.000	22,0	340,9	682
Elettrobus (18 m) con batterie per marcia autonoma	11.000.000	22,0	314,7	629
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	11.000.000	22,0	681,8	1.364
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	11.000.000	22,0	511,4	1.023

Tab. 18 | Costo di acquisto ripartito sulla vita media

Mezzo	MEZZI		ESERCIZIO		
	Costo cad. (€)	Costo per milione di pkm/anno (€)	Costo per pkm (cc€)	Costo per vettura km (€)	Costo per milione di pkm/anno (€)
Automobile a benzina	13.000	2.500	12,37	0,49	123.700
Automobile a diesel	17.000	1.528	11,01	0,44	110.093
Autobus diesel (12 m)	250.000	28	3,41	3,07	34.100
Autobus diesel (18 m)	400.000	27	2,19	3,29	21.921
Filobus (12 m)	600.000	28	2,00	1,80	20.000
Filobus (18 m)	900.000	25	1,29	1,93	12.857
Elettrobus (12 m) con batterie per marcia autonoma	600.000	31	2,20	1,76	22.000
Elettrobus (18 m) con batterie per marcia autonoma	900.000	29	1,41	1,84	14.143
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	600.000	62	2,80	1,12	28.000
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	900.000	46	1,80	1,44	18.000

Tab. 19 | Costo di acquisto mezzi e gestione

Mezzo	MANUTENZIONE			AMBIENTE	
	Costo per pkm (cc€)	Costo per vettura km (€)	Costo per milione di pkm/anno (€)	Costo per pkm (cc€)	Costo per vettura km (€)
Automobile a benzina	1,42	0,06	14.200	141,01	5,64
Automobile a diesel	1,54	0,06	15.400	118,75	4,75
Autobus diesel (12 m)	3,36	3,02	33.600	5,41	4,87
Autobus diesel (18 m)	3,02	4,54	30.240	3,48	5,22
Filobus (12 m)	1,75	1,58	17.500	4,27	3,84
Filobus (18 m)	1,58	2,36	15.750	2,75	4,12
Elettrobus (12 m) con batterie per marcia autonoma	1,84	1,47	18.375	4,48	3,59
Elettrobus (18 m) con batterie per marcia autonoma	1,65	2,15	16.538	2,88	3,75
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	2,10	0,84	21.000	5,34	2,14
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	1,89	1,51	18.900	3,43	2,75

Tab. 20 | Costo di manutenzione ordinaria e spese sanitarie indotte (qualità dell'aria e rumore)

Tecnologia	Acquisto mezzi	Impianti di trazione	Impianti di accumulo energetico di bordo
Automobile a benzina	5.625.000	0	0
Automobile a diesel	5.156.250	0	0
Autobus diesel (12 m)	3.720.238	0	0
Autobus diesel (18 m)	4.285.714	0	0
Filobus (12 m)	5.681.818	7.500.000	0
Filobus (18 m)	6.136.364	7.500.000	0
Elettrobus (12 m) con batterie per marcia autonoma	6.392.045	5.400.000	16.406.250
Elettrobus (18 m) con batterie per marcia autonoma	6.136.364	5.400.000	15.000.000
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	12.784.091	3.000.000	29.531.250
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	9.588.068	3.000.000	21.093.750

Tab. 21 | Costo complessivo di acquisto per un ciclo di vita di 25 anni

Tecnologia	Esercizio	Manutenzione	Totale
Automobile a benzina	92.775.000	10.650.000	109.050.000
Automobile a diesel	82.569.750	11.550.000	99.276.000
Autobus diesel (12 m)	25.575.000	25.200.000	54.495.238
Autobus diesel (18 m)	16.441.071	22.680.000	43.406.786
Filobus (12 m)	15.000.000	13.125.000	41.306.818
Filobus (18 m)	9.642.857	11.812.500	35.091.721
Elettrobus (12 m) con batterie per marcia autonoma	16.500.000	13.781.250	58.479.545
Elettrobus (18 m) con batterie per marcia autonoma	10.607.143	12.403.125	49.546.631
Elettrobus (12 m) con supercondensatori	21.000.000	15.750.000	82.065.341
Elettrobus (18 m) con supercondensatori	13.500.000	14.175.000	61.356.818

Tab. 22 | Costo complessivo di gestione e manutenzione per un ciclo di vita di 25 anni

Indici delle figure e delle tabelle

Indice delle figure

FIG. 1 COROGRAFIA D'INSIEME DELLE 5 ALTERNATIVE DI TRACCIATO PER IL PROLUNGAMENTO DEL TRC TRA RIMINI FS E LA FIERA DI RIMINI.....	7
FIG. 2 TRACCIATO DELL'ALTERNATIVA 1.....	8
FIG. 3 TRACCIATO DELL'ALTERNATIVA 2.....	9
FIG. 4 TRACCIATO DELL'ALTERNATIVA 3.....	10
FIG. 5 TRACCIATO DELL'ALTERNATIVA 4.....	11
FIG. 6 TRACCIATO DELL'ALTERNATIVA 5.....	12
FIG. 7 ANALISI DELLE ALTERNATIVE DI TRACCIATO, SINTESI DEGLI INDICATORI DI EFFICACIA.....	16
FIG. 8 ESEMPLIFICAZIONE GRAFICA DELLE FORZE OPPOSITE CHE AGISCONO SU UN'AREA URBANA.....	17
FIG. 9 AREA URBANA IN CUI LA COPPIA DI FORZE DELLA FIGURA PRECEDENTE HA GENERATO UN EQUILIBRIO CHE DISPONE UNA ZONA ANULARE DI MAGGIORE VALORE ECONOMICO E SOCIALE INTORNO AD UN CENTRO CHE, SEPPURE IDEALMENTE PIÙ AMBITO, TENDE A SVUOTARSI DELLE PROPRIE FUNZIONI NATURALI DI POLO ACCENTRATORE E GUIDA DI TUTTO IL SISTEMA URBANO.....	18
FIG. 10 BACINO DEI 500 METRI: CONFRONTO TRA LE ALTERNATIVE 1 (TRACCIATO 2018) E 3 (QUI PROPOSTA COME AGGIORNAMENTO DEL TRACCIATO) – PARTE 1.....	34
FIG. 11 BACINO DEI 500 METRI: CONFRONTO TRA LE ALTERNATIVE 1 (TRACCIATO 2018) E 3 (QUI PROPOSTA COME AGGIORNAMENTO DEL TRACCIATO) – PARTE 2.....	35
FIG. 8 FILOSODATO DA 24 M IN ESERCIZIO A ZURIGO (SVIZZERA).....	47
FIG. 9 FILOSODATO DA 18 M: ESEMPI DI ORGANIZZAZIONE DELLE SEDUTE. L'ARCHITETTURA DELLA TRAZIONE ELETTRICA CONSENTE DI GESTIRE GLI SPAZI IN MANIERA MENO RIGIDA RISPETTO ALLA TRAZIONE TERMICA (IN BASSO).....	49
FIGG. 10 - 11 TRA I VEICOLI SU GOMMA, PER QUANTO LA RICERCA SUI VETTORI ENERGETICI ALTERNATIVI (COME L'IDROGENO) STIA FACENDO PASSI DA GIGANTE, IL FILOBUS (TROLLEYBUS, IN INGLESE) È QUELLO CHE PRESENTA IL RENDIMENTO MAGGIORE (FONTE UBC UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA).....	49
FIG. 12 UNO DEI MAGGIORI ELEMENTI DI SVILUPPO DELLA TECNOLOGIA FILOVIARIA È COSTITUITO DAI SISTEMI DI ACCUMULO DELL'ENERGIA PER CONSENTIRE LA MARCIA ANCHE IN ASSENZA DI LINEA AEREA. IN QUESTO SENSO IL FUTURO È DATO DAI SUPERCAPACITORI, CHE GIÀ OGGI PRESENTANO OTTIMI PARAMETRI DI QUALITÀ/PREZZO. I CONDENSATORI A DOPPIO STRATO, RISPETTO ALLE BATTERIE ELETTROCHIMICHE, NON SONO SOGGETTI AD USURA: SOPPORTANO PIÙ DI 500 000 CICLI DI CARICA/SCARICA CON UNA DURATA DI VITA MINIMA DI 10 ANNI, SENZA CHE LA CAPACITÀ SI MODIFICHÌ IN FUNZIONE DEL TEMPO. È PARTICOLARMENTE IMPORTANTE LA LORO CAPACITÀ DI POTER ESSERE CARICATI E SCARICATI A CORRENTI MOLTO ELEVATE.....	50
FIG. 13 FILOBUS SOLARIS 18 METROSTYLE DI SALISBURGO (AUSTRIA).....	51
FIG. 14 PROIEZIONI DEL PREZZO (IN DOLLARI USA, 2015) DELLE BATTERIE (ELABORAZIONE DI A. SPINOSA SU DATI BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE; NAVIGANT ENERGY INDUSTRY CONSULTING; US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION).....	52
FIG. 15 COSTO DELLE BATTERIE AGLI IONI DI LITIO PER VEICOLI ELETTRICI (BJORN NYKVIST E MANS NILSSON, 2015).....	53
FIG. 16 CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DI ALCUNI TIPI DI ACCUMULATORI CHIMICI A CONFRONTO CON QUELLE DEI SUPERCAPACITORI.....	54
FIG. 17 SUPERCAPACITORI: SCHEMA DI CARICA E DIAGRAMMA TRA DENSITÀ DI POTENZA [W/KG] E DENSITÀ ENERGETICA [WH/KG].....	55
FIG. 18 GRANDEZZE DI RIFERIMENTO DEL CASO DI STUDIO.....	56
FIG. 19 CURVA DI COSTO DI UN KWH SULLA BASE DEL FABBISOGNO ENERGETICO ANNUALE.....	56
FIG. 20 COSTI UNITARI DI RIFERIMENTO.....	57
FIG. 21 VITA MEDIA DI ESERCIZIO DI ALCUNI ELEMENTI TECNICI.....	58
FIG. 22 PESO UNITARIO PER PASSEGGERO TRASPORTATO.....	58
FIG. 23 ENERGIA GRIGIA PER POSTO OFFERTO (KWH) SU UN CICLO DI VITA DI SERVIZIO DI 30 ANNI.....	59
FIG. 24 ENERGIA TOTALE PER POSTO OFFERTO (MWH) SU UN CICLO DI VITA DI SERVIZIO DI 30 ANNI.....	59
FIG. 25 COSTO COMPLESSIVO (REALIZZAZIONE PIÙ GESTIONE E MANUTENZIONE) PER 100 PASSEGGERI ANNO TRASPORTATI.....	60

Indice delle tabelle

TAB. 1	AMBITI, CRITERI E INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DELLE ALTERNATIVE – PARTE 1	20
TAB. 2	AMBITI, CRITERI E INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DELLE ALTERNATIVE – PARTE 2	21
TAB. 3	ALTERNATIVE DI TRACCIATO: CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E PRESTAZIONALI	26
TAB. 4	ANALISI MULTICRITERI – TABELLA A: ATTRIBUZIONE VALORI RELATIVI – PARTE 1. LE CASELLE IN GIALLO SONO BASATE SULLA SCALA DI GIUDIZIO ALTO = MIGLIORE ⇒ BASSO=PEGGIORE; QUELLE IN AZZURRO SULLA SCALA INVERSA, ALTO = PEGGIORE ⇐ BASSO=MIGLIORE	36
TAB. 5	ANALISI MULTICRITERI – TABELLA A: ATTRIBUZIONE VALORI ASSOLUTI – PARTE 2. LE CASELLE IN GIALLO SONO BASATE SULLA SCALA DI GIUDIZIO ALTO = MIGLIORE ⇒ BASSO=PEGGIORE; QUELLE IN AZZURRO SULLA SCALA INVERSA, ALTO = PEGGIORE ⇐ BASSO=MIGLIORE	37
TAB. 6	ANALISI MULTICRITERI – TABELLA B: ATTRIBUZIONE VALORI RELATIVI – PARTE 1. LE CASELLE IN GIALLO SONO BASATE SULLA SCALA DI GIUDIZIO ALTO = MIGLIORE ⇒ BASSO=PEGGIORE; QUELLE IN AZZURRO SULLA SCALA INVERSA, ALTO = PEGGIORE ⇐ BASSO=MIGLIORE	38
TAB. 7	ANALISI MULTICRITERI – TABELLA B: ATTRIBUZIONE VALORI RELATIVI – PARTE 1. LE CASELLE IN GIALLO SONO BASATE SULLA SCALA DI GIUDIZIO ALTO = MIGLIORE ⇒ BASSO=PEGGIORE; QUELLE IN AZZURRO SULLA SCALA INVERSA, ALTO = PEGGIORE ⇐ BASSO=MIGLIORE	39
TAB. 8	ANALISI MULTICRITERI – TABELLA C PARTE 1: OMOGENEIZZAZIONE DEI VALORI RELATIVI DELLE CASELLE IN CELESTE, SULLA MEDESIMA SCALA DI GIUDIZIO ALTO = MIGLIORE ⇒ BASSO=PEGGIORE. QUELLI DELLE CASELLE IN GIALLO RESTANO INVARIATI RISPETTO ALLA TABELLA PRECEDENTE	40
TAB. 9	ANALISI MULTICRITERI – TABELLA C PARTE 2: OMOGENEIZZAZIONE DEI VALORI RELATIVI DELLE CASELLE IN CELESTE, SULLA MEDESIMA SCALA DI GIUDIZIO ALTO = MIGLIORE ⇒ BASSO=PEGGIORE. QUELLI DELLE CASELLE IN GIALLO RESTANO INVARIATI RISPETTO ALLA TABELLA PRECEDENTE	41
TAB. 10	ANALISI MULTICRITERI – TABELLA D PARTE 1: CALCOLO DELLA MEDIANA ME E OMOGENEIZZAZIONE AL VALORE DI RIFERIMENTO $K = 0,5 \cdot ME$	42
TAB. 11	ANALISI MULTICRITERI – TABELLA D PARTE 2: CALCOLO DELLA MEDIANA ME E OMOGENEIZZAZIONE AL VALORE DI RIFERIMENTO $K = 0,5 \cdot ME$	43
TAB. 12	ANALISI MULTICRITERI – TABELLA E PARTE 1: ATTRIBUZIONE PUNTEGGI FINALI COME MEDIA ARITMETICA DEI PUNTEGGI DEGLI INDICATORI PER CATEGORIA DI IMPATTO	44
TAB. 13	ANALISI MULTICRITERI – TABELLA E PARTE 2: ATTRIBUZIONE PUNTEGGI FINALI COME MEDIA ARITMETICA DEI PUNTEGGI DEGLI INDICATORI PER CATEGORIA DI IMPATTO	45
TAB. 14	ANALISI DELLE ALTERNATIVE: ENERGIA GRIGIA E L'IMPATTO CLIMALTERANTE COMPLESSIVO SULL'INTERO CICLO DI VITA DELL'OPERA	46
TAB. 15	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	48
TAB. 16	COSTO DEI MEZZI E DEGLI IMPIANTI DI TRAZIONE	62
TAB. 17	CARATTERISTICHE DIMENSIONALI	63
TAB. 18	COSTO DI ACQUISTO RIPARTITO SULLA VITA MEDIA	63
TAB. 19	COSTO DI ACQUISTO MEZZI E GESTIONE	64
TAB. 20	COSTO DI MANUTENZIONE ORDINARIA E SPESE SANITARIE INDOTTE (QUALITÀ DELL'ARIA E RUMORE)	64
TAB. 21	COSTO COMPLESSIVO DI ACQUISTO PER UN CICLO DI VITA DI 25 ANNI	65
TAB. 22	COSTO COMPLESSIVO DI GESTIONE E MANUTENZIONE PER UN CICLO DI VITA DI 25 ANNI	65