



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di un modello di calcolo dei consumi elettrici del trasporto ferroviario

G. Fusco, S. Ricci, M.Vajihi, C. Colombaroni, F. Carrese

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE EDILE E AMBIENTALE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Report RdS/PTR2019/032

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Mobilità

Linea di attività: Analisi ed approccio modellistico al problema di ottimizzazione dell'e-Last-mile. Algoritmi per la stima dei consumi del TPL urbano su ferro

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *Sviluppo di algoritmi e di un sistema informatico di ottimizzazione della distribuzione urbana delle merci con veicoli elettrici.*"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Maria Pia Valentini

Responsabili scientifici DICEA Sapienza Università di Roma: Prof. Gaetano Fusco, Prof. Stefano Ricci

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 METODOLOGIA DI CALCOLO DEI CONSUMI ELETTRICI SULLA RETE FERROVIARIA.....	5
2.2 DEFINIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO.....	21
2.3 APPLICAZIONE A UN CASO DI STUDIO.....	30
3 CONCLUSIONI.....	36
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	36
5 APPENDICE.....	37

Sommario

Il presente rapporto tecnico descrive il modello di calcolo dei consumi elettrici sulle reti ferroviarie urbane e ne presenta un'applicazione dimostrativa ad una linea tranviaria della città di Roma.

La metodologia di stima dei consumi elettrici nei sistemi ferroviari urbani viene preliminarmente inquadrata con un'analisi dei requisiti energetici richiesti per i sistemi ferroviari urbani europei in relazione agli obiettivi e alle aspettative sociali e agli aspetti politici, economici, operativi e ambientali.

Viene quindi riportato uno stato dell'arte dei modelli presenti nella letteratura scientifica sulla stima dei consumi elettrici dei sistemi ferroviari urbani e viene descritto il modello cinematico, che viene prescelto per l'applicazione alla piattaforma di calcolo del progetto di ricerca.

La fruibilità del modello è stata testata a scopo dimostrativo su una linea della rete tranviaria della città di Roma: la linea 8, avente un'estensione di circa 5.45 km, che collega il quartiere di Monteverde con il Centro storico.

Il modello, acquisito in input il diagramma di marcia, fornisce in output il diagramma della forza di trazione e dei consumi elettrici lungo la linea per ciascuna singola corsa.

1 Introduzione

L'Accordo di collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA) della Sapienza ha come obiettivo la realizzazione di un software che si colloca fra gli strumenti ICT per la pianificazione ed ottimizzazione day-to-day della distribuzione urbana delle merci, oggetto tipico dei sistemi di Supply Chain Planning, e per la stima dei consumi di energia per il trasporto con alimentazione diretta dalla rete elettrica.

Nella formulazione del problema e nella progettazione del software, si assume che la distribuzione avvenga con veicoli elettrici, dotati di monitoraggio del livello di carica della batteria, e utilizzi piazzole di carico/scarico con prenotazione.

Nel primo anno di progetto, il problema viene preliminarmente affrontato in termini metodologici mediante dal punto di vista dei requisiti funzionali, delle caratteristiche operative e degli algoritmi risolutivi. Le attività del primo anno sono articolate in tre tematiche, trattate in altrettanti rapporti tecnici:

1. Distribuzione urbana delle merci con veicoli elettrici: problematiche e prospettive
2. Studio e sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione della distribuzione urbana delle merci con veicoli elettrici
3. Sviluppo di un modello di calcolo dei consumi elettrici del trasporto ferroviario.

Il presente Rapporto tecnico "Sviluppo di un modello di calcolo dei consumi elettrici del trasporto ferroviario" riporta uno studio della bibliografia sul consumo elettrico nel trasporto urbano su ferrovia (tram, metro, ferrovie regionali) ed introduce un modello matematico per il calcolo dei consumi energetici nelle ferrovie urbane a una sua applicazione esemplificativa al caso della rete dei trasporti di Roma.

Le attività svolte vengono descritte nella sezione seguente, articolata nei seguenti capitoli.

- Modello di calcolo dei consumi elettrici sulla rete ferroviaria;
- Applicazione ad un caso di studio.

Le conclusioni riassumono i risultati delle attività di ricerca e ne specificano il contributo utile per le fasi successive della ricerca.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Metodologia di calcolo dei consumi elettrici sulla rete ferroviaria

La popolazione dell'UE è urbanizzata al 70% e le città europee stanno generando oltre l'80% del PIL dell'Unione (CE, 2013d). Pertanto, la mobilità all'interno delle città e tra le aree suburbane e le città è incredibilmente importante. Secondo UITP (2016), nel 2014 la ferrovia urbana rappresentava il 44,3% di tutti i viaggi di trasporto pubblico locale in Europa (13,6% - ferrovia suburbana, 16,2% - metropolitana, 14,5% - tram / LRT). Poiché l'economia europea continua a crescere, lo è anche la domanda di trasporto.

Espresso in kWh / pax-km, il consumo di energia della ferrovia urbana è 0,12, ovvero 7 volte inferiore a un'automobile media nel contesto urbano. Tuttavia, l'utilizzo di energia è uno dei principali fattori di costo che gestiscono i sistemi ferroviari urbani (UITP, 2014a). Il consumo totale di energia nelle ferrovie urbane in Europa è di circa 11 T GWh all'anno (UITP, 2014a). Per fare un confronto, la produzione totale netta di elettricità nell'UE-28 è stata di 3,07 milioni di GWh nel 2015 (Eurostat, 2017b).

La costante crescita del mercato dei sistemi ferroviari urbani è evidente in tutto il mondo, compresa l'UE, con l'Asia all'avanguardia in termini di lunghezza del nuovo binario in costruzione (Dauby, 2016).

Lo scopo di questo capitolo è quello di evidenziare i requisiti energetici chiave affrontati dai sistemi ferroviari urbani europei in aspetti relativi ai loro obiettivi e aspettative sociali, politici, economici, operativi e ambientali.

Il fabbisogno energetico del traffico ferroviario urbano in tutta Europa viene analizzato anche in base alle specifiche, alle linee guida e alle migliori pratiche esistenti, in particolare da altri progetti di ricerca e sviluppo. Particolarmente rilevanti sono i seguenti documenti:

- OSIRIS deliverable D1.1. Un insieme comune di requisiti ambientali, sociali e politici per il risparmio energetico, guidato dall'Università di Newcastle;
- Ricerche dell'Università di Newcastle che esplorano le condizioni che potrebbero favorire il trasferimento modale urbano verso i sistemi ferroviari che includono aspetti legati alle sue prestazioni energetiche e di

impatto ambientale (Batty et al., 2015), nonché ricerche che forniscono una visione olistica del consumo di energia nelle aree urbane sistemi ferroviari per i suoi aspetti tecnologici, operativi e strategici (González-Gil et al., 2013, 2015; González-Gil et al., 2014);

- L'ampia letteratura condotta da UITP su questo argomento, ad es. le relazioni collegate all'obiettivo strategico PTx2 di raddoppiare la quota di mercato dei trasporti pubblici entro il 2025 (Van Audenhove et al., 2014);
- Documentazione generata da alcuni organi di lavoro dell'UITP, ad es. il comitato ferroviario leggero, il comitato metropolitano con i suoi sottocomitati (ad es. materiale rotabile, impianti elettrici e sistemi di sicurezza), il comitato ferroviario regionale e suburbano. Gli input includeranno anche gli attuali contributi al lavoro svolto a livello delle Nazioni Unite in attività relative ai cambiamenti climatici;
- Le informazioni generate dal Roll2Rail dell'H2020. In particolare, la sua metodologia di calcolo dell'energia del WP8.2 definirà e compilerà i profili dei servizi di riferimento per i sistemi ferroviari urbani (metropolitana, tram) e suburbani;
- Gruppi di lavoro, seminari e altri progetti in corso in UIC sulla ferrovia suburbana pesante e sui potenziali risparmi sugli effetti ambientali attraverso un trasferimento modale alla ferrovia nelle aree metropolitane e urbane. In particolare, i sistemi di trasporto ferroviario pendolari e regionali e un progetto in corso sulla produzione di un manuale sugli orientamenti per i sistemi di trasporto ferroviario suburbano e regionale.

REQUISITI DI EFFICIENZA ENERGETICA RELATIVI AI SISTEMI FERROVIARI URBANI

REQUISITI SOCIALI

Mentre le autorità europee si concentrano su un passaggio modale dal trasporto privato a quello pubblico a causa della riduzione dell'impatto negativo del trasporto pubblico sull'ambiente, i passeggeri tendono a prestare attenzione a sicurezza, pulizia, comfort e convenienza (OSIRIS, 2013). L'aggiornamento e l'ammodernamento dell'infrastruttura urbana e della flotta ferroviaria in termini di migliore qualità, maggiore comfort e nuovi servizi (HVAC, informazioni in tempo reale, infotainment, ecc.) Influenzano il consumo complessivo di energia e richiedono più energia per il funzionamento delle ferrovie urbane. Pertanto, incoraggiare il trasferimento modale richiede la formazione di una buona percezione del trasporto pubblico all'interno della società.

L'atteggiamento dei passeggeri nei confronti delle innovazioni nella ferrovia urbana influenza la velocità di diffusione delle nuove tecnologie. Nonostante il fatto che queste tecnologie (in particolare l'automazione e i treni senza conducente) contribuiscano a ridurre il consumo di energia, la società in alcune città o paesi più conservatori potrebbe avere delle riserve per l'introduzione di innovazioni ferroviarie urbane in termini di sicurezza e timori di lavoro, paure di lavoro perdita, ecc. (OSIRIS, 2013).

Tuttavia, i registri di sicurezza dei treni senza conducente possono vantare risultati eccellenti e l'accettazione si è dimostrata rapida ed entusiasta in molti luoghi in cui sono stati introdotti. Una tendenza che possiamo vedere qui: una volta che una città ha lanciato una linea UTO, non c'è modo di tornare indietro: anche quelli nuovi sono progettati come UTO e quelli più vecchi possono essere rinnovati come UTO. Inoltre, i passeggeri si aspettano sempre di più dalle tecnologie in termini di dati in tempo reale che prevedono la pianificazione dei loro viaggi (direzione generale della Ricerca e innovazione (Commissione europea), 2017).

Secondo le Nazioni Unite (Nazioni Unite, Dipartimento per gli affari economici e sociali, Divisione della popolazione, 2015) e la Banca mondiale (The United Nations Population Divisions World Urbanization Prospects, 2017), la percentuale di popolazione urbana nel 2050 dovrebbe aumentare all'82% (Fig.1) che aumenterà la pressione sul trasporto, ad es accesso a posti di lavoro, salute e istruzione.

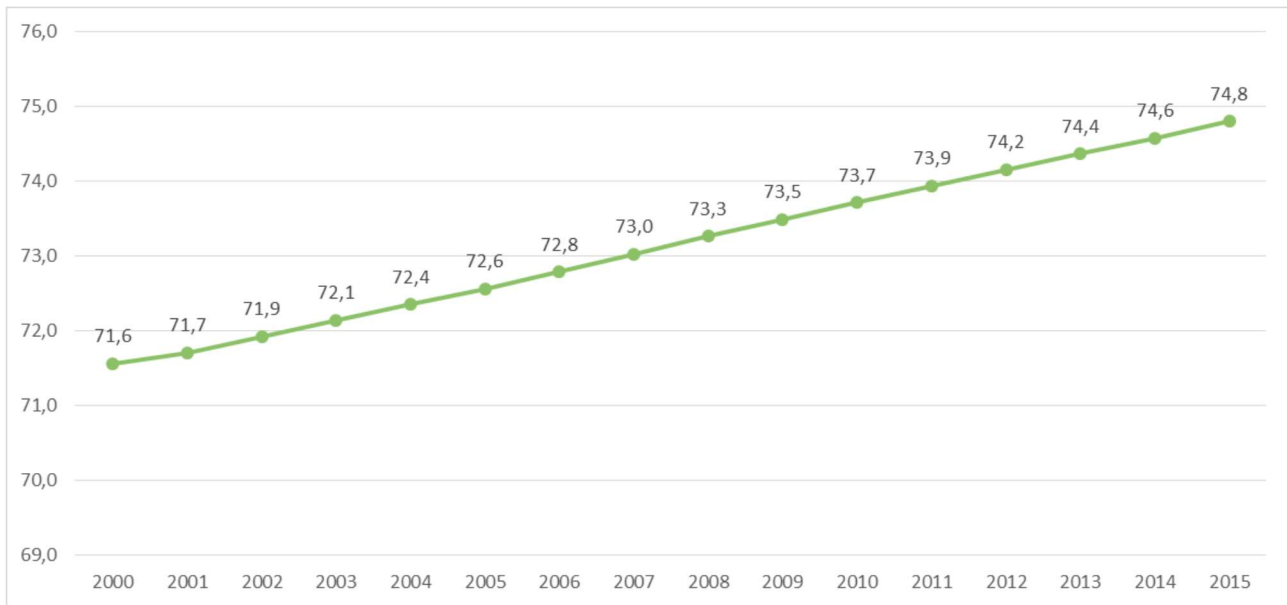


Figura 1. Percentuale di popolazioni urbane in Europa, 2000-2015 (% della popolazione totale)

Note: i dati delle Nazioni Unite si basano su definizioni nazionali

Fonte: Prospettive di urbanizzazione mondiale delle divisioni della popolazione delle Nazioni Unite, la Banca mondiale

Batty et al. (2015) hanno identificato i seguenti attributi di qualità individuale per il trasporto pubblico urbano (in particolare la ferrovia urbana) che influenzano l'utilizzo del trasporto pubblico da parte dei passeggeri:

- Elevato livello di accessibilità e informazioni disponibili. Gli operatori ferroviari urbani dovrebbero fornire ai viaggiatori informazioni pre-viaggio, in-viaggio e in tempo reale;
- Frequenza e affidabilità: tempo di attesa e alta precisione nella prevedibilità del tempo di viaggio. Per quanto riguarda l'atteggiamento del passeggero, significa che si basano sul livello di servizio dichiarato da fornire;
- Comfort su stazioni e materiale rotabile: temperatura dell'aria ambiente, pulizia, fornitura Wi-Fi (sulla stazione e nei veicoli), disponibilità di segnali telefonici sotterranei;
- Sicurezza e protezione. Da un punto di vista tecnologico, dovrebbe contenere telecamere a circuito chiuso, illuminazione migliorata, pulsanti antipánico, ecc.;
- Il prezzo di un viaggio. Dovrebbe esserci un equilibrio tra accessibilità economica e copertura delle esigenze dell'operatore, incluso lo sviluppo dell'innovazione;
- Velocità / tempo di percorrenza indica il tempo necessario per spostarsi da un luogo a un altro e comprende il tempo di accesso, il tempo di attesa e il tempo di viaggio.

La piramide gerarchica dei requisiti dei passeggeri del trasporto pubblico è presentata in Fig. 2.

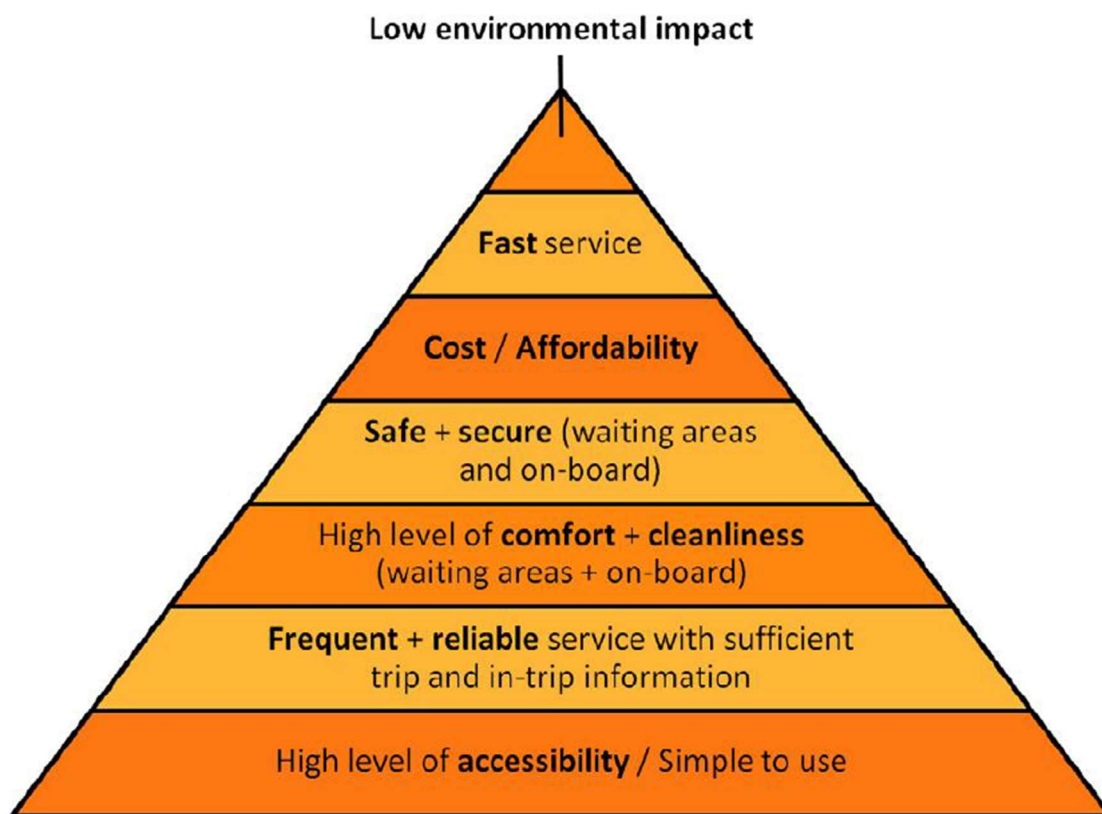


Figura 2. La piramide gerarchica dei requisiti dei passeggeri del trasporto pubblico.
 Fonte: Batty et al., 2015

METODI DA ADATTARE AI REQUISITI SOCIALI

I risultati del progetto OSIRIS (2013) hanno identificato diverse opzioni quando si considera la riduzione / ottimizzazione del consumo di energia elettrica durante i periodi di massima domanda. Questi includono il maggiore utilizzo della frenata a recupero di energia (particolarmente favorevole nel funzionamento "stop-and-go" della ferrovia urbana con brevi progressi) e l'applicazione di nuovi tipi di produzione di energia. Inoltre, altri servizi come gli impianti di ricarica per auto elettriche private, autobus o car sharing elettrici potrebbero anche - almeno in parte - essere alimentati da un'eccessiva energia di frenata rigenerativa che attualmente non viene sfruttata per il funzionamento rigorosamente del treno. Ciò contribuirebbe a ottimizzare l'ulteriore consumo di energia e ridurre ulteriormente la quantità netta di perdite di energia in frenata. Nella stessa linea, l'utilizzo di avanzati sistemi di accumulo dell'energia (ESS) e lo sviluppo di treni più leggeri può anche ridurre il consumo di energia.

Un'altra opzione per l'ottimizzazione del consumo di energia è l'implementazione dell'intera intermodalità tra ferrovia, metropolitana, tram o LRT, servizi di autobus e anche ciclismo e camminata (UIC et al., 2013) per creare le cosiddette "onde verdi" dei flussi di passeggeri. Questa politica include anche una tendenza ad aumentare l'uso dei diritti di passaggio segregati, dando la priorità ai modi di trasporto pubblico ai semafori e l'utilizzo di RFID e NFC nei servizi per i passeggeri.

REQUISITI POLITICI

LEGISLAZIONE ATTUALE

La legislazione dell'UE relativa all'efficienza energetica e all'ottimizzazione del consumo di energia nei sistemi ferroviari urbani è correlata alla posizione dell'UE sul cambiamento climatico globale (OSIRIS, 2013). Le attività dell'UE su questioni climatiche ed energetiche si basano sulla prospettiva a lungo termine che la Commissione ha definito nel 2011 nella tabella di marcia per passare a un'economia competitiva a basse emissioni di carbonio nel 2050 e nel Libro bianco sui trasporti (CE, 2011a, 2011b). Inoltre, sulla base

dell'accordo di Parigi adottato il 12 dicembre 2015 alla COP21 e firmato da 195 Stati nel 2016, l'UE sta promuovendo i seguenti obiettivi (Consiglio dell'UE, 2016):

- Mantenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto di 2 ° C al di sopra dei livelli preindustriali e limitare l'aumento della temperatura a 1,5 ° C;
- aumentare la capacità di adattamento agli impatti negativi dei cambiamenti climatici e favorire la resilienza climatica e lo sviluppo di basse emissioni di gas a effetto serra;
- Rendere i flussi finanziari coerenti con un percorso verso basse emissioni di gas a effetto serra e sviluppo resiliente al clima.

L'accordo di Parigi conferma il percorso dell'UE verso l'economia a basse emissioni di carbonio (EC, 2016b). Precedentemente all'accordo di Parigi, la Commissione europea ha pubblicato il quadro politico per l'energia e il clima del 2030 e un piano per affrontare i cambiamenti climatici globali oltre il 2020 (CE, 2013a, 2015b). A sostegno delle iniziative dell'Unione dell'energia e dell'azione per il clima, la Commissione ha proposto un aggiornamento della direttiva sull'efficienza energetica del 2012 nel 2016, compreso un nuovo obiettivo di efficienza energetica del 30% per il 2030 (CE, 2016d).

L'UE ha fissato un obiettivo ambizioso di riduzione del 40% delle emissioni di gas serra entro il 2030 e dell'80% entro il 2050 (Fig. 3) (CE, 2011b).

Al fine di creare l'ambiente necessario per la transizione a basse emissioni di carbonio, è stata sviluppata una strategia quadro per un'Unione dell'energia resiliente che colleghi i sistemi di trasporto e energia (CE, 2015a, 2016c). Le sue caratteristiche principali sono:

- Ridurre la dipendenza da particolari carburanti, fornitori di energia e rotte;
- Completamento del mercato interno dell'energia (piena integrazione) e consumo di energia più efficiente;
- Decarbonizzazione dell'economia.

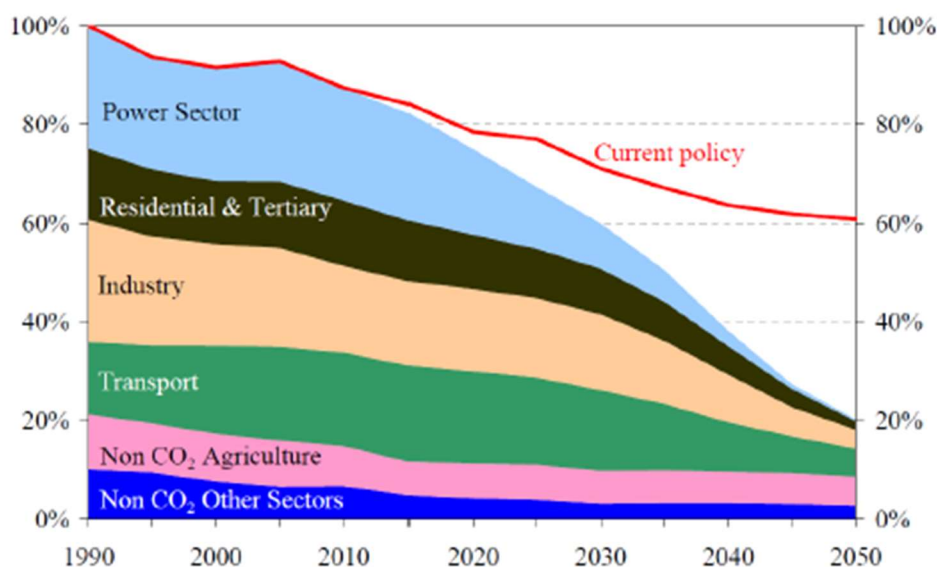


Figura 3. Emissioni di gas a effetto serra dell'UE verso una riduzione interna dell'80% (Note: 100% = 1990)
Fonte: Una tabella di marcia per passare a un'economia competitiva a basse emissioni di carbonio nel 2050 (CE, 2011b)

In generale, l'UE si è impegnata a investire almeno il 35% del bilancio di Orizzonte 2020 in attività legate al clima e all'energia. Ad esempio, l'UE ha fissato un obiettivo dell'UE di almeno il 27% per la quota di energia rinnovabile consumata nell'UE nel 2030. Questo nuovo approccio richiede una gestione intelligente della rete a livello locale e apre nuove opportunità per i sistemi ESS applicati alle ferrovie urbane (CE, 2011b).

Particolare attenzione è rivolta al settore dei trasporti, in quanto i trasporti rappresentano oltre il 30% del consumo finale di energia in Europa (CE, 2015a). La politica dei trasporti dell'UE sta riconoscendo il ruolo del trasferimento modale dai veicoli privati al trasporto pubblico, che può contribuire a ottenere una riduzione del 60% delle emissioni di gas a effetto serra, richiesta dal Libro bianco della Commissione

"Roadmap verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Verso uno spazio competitivo e una risorsa sistema di trasporto efficiente" (CE, 2013d, 2013b, 2014a). Nel 2016 la CE ha presentato "Una strategia europea per la mobilità a basse emissioni" che ha offerto modifiche al quadro normativo dell'UE a causa della nuova politica a basse emissioni (CE, 2016c):

- Ottimizzare il sistema di trasporto e migliorarne l'efficienza:
 - Soluzioni di mobilità digitale per mobilità porta a porta senza soluzione di continuità, logistica integrata e servizi a valore aggiunto;
 - prezzi equi ed efficienti nei trasporti;
 - Promuovere la multi-modalità;
- Aumentare l'uso di energia alternativa a basse emissioni per i trasporti:
 - Quadro efficace per l'energia alternativa a basse emissioni (revisione della legislazione attuale);
 - Lancio di infrastrutture per combustibili alternativi;
 - interoperabilità e standardizzazione per l'elettromobilità;
- Spostarsi verso veicoli a emissioni zero:
 - Miglioramento delle prove sui veicoli per riconquistare la fiducia dei consumatori;
 - Strategia post-2020 per auto e furgoni (nuovi standard post-2020 per l'anidride carbonica per auto e furgoni);
 - Strategia post-2020 per camion, autobus (certificazione delle emissioni di anidride carbonica e del consumo di carburante dei veicoli e monitoraggio e comunicazione di tali dati certificati).

La ferrovia è considerata una modalità di trasporto meno intensiva di gas a effetto serra che può aiutare a contrastare la decarbonizzazione. Inoltre, le restrizioni e l'addebito per le singole auto, tasse sul carburante elevate e tasse elevate per l'acquisto di auto convenzionali supportano l'aumento dell'uso del trasporto pubblico, in particolare le ferrovie urbane (IEA e OCSE, 2016; UIC et al., 2013). Inoltre, l'UE ha aggiornato una serie di direttive relative all'efficienza energetica (CE, 2014b, 2016e, 2017).

MOTIVATORI POLITICI - SFIDE FUTURE

Nel 2016, i servizi della Commissione hanno pubblicato una relazione di attuazione sul Libro bianco del 2011, in cui sono state presentate tendenze aggiornate e sviluppi rilevanti per i trasporti (CE, 2016a):

- Tendenze demografiche e di urbanizzazione.
 - 1) Si prevede che la percentuale della popolazione di età compresa tra 15 e 64 anni scenderà dal 66% al 57% entro il 2060, mentre quelli di età pari o superiore a 65 anni diventeranno una quota molto più ampia (passando dal 18% al 28% della popolazione). Inoltre, la società che invecchia richiederà maggiore enfasi sulla fornitura di servizi di trasporto sicuri, protetti e affidabili con soluzioni adeguate per gli utenti a mobilità ridotta.
 - 2) Il tasso di urbanizzazione in Europa dovrebbe continuare a crescere: dal 73% nel 2014 all'82% nel 2050. L'urbanizzazione progressiva contribuirà ulteriormente ai problemi che interessano molti agglomerati, come congestione, inquinamento, rumore, saturazione degli snodi dei trasporti.

- Economia collaborativa.

La tendenza alla condivisione dell'economia si sta rapidamente espandendo. Il mercato del ridesharing sta diventando una grande industria globale. Nel 2014, i programmi di car sharing erano disponibili in oltre 30 paesi e in centinaia di città. Al giorno d'oggi, si prevede che le entrate globali dei servizi di car sharing cresceranno da \$ 1,1 miliardi nel 2015 a \$ 6,5 miliardi nel 2024. Pertanto, la popolarità dei servizi di car sharing porta a un potenziale sollievo dalla congestione e allo sviluppo di nuovi servizi positivi (ad esempio, con l'adozione di plug-in nei veicoli elettrici (PEV) nei servizi di car sharing, che dovrebbe aumentare man mano che le case automobilistiche promuovono questa tecnologia per il car sharing).

- Automazione e veicoli connessi.

La distribuzione di veicoli automatizzati nelle ferrovie urbane può influire positivamente sul consumo di energia. Innanzitutto, il flusso del traffico può essere livellato controllando la velocità e l'accelerazione. In

secondo luogo, gli errori del driver sono esclusi. Un ostacolo per le autorità dell'UE è la mancanza di condizioni quadro armonizzate (giuridiche, coesistenza con i mezzi di trasporto convenzionali, implicazioni sociali, infrastrutture interoperabili richieste e interfacce). Inoltre, il quadro legislativo sembra essere in ritardo. Sicurezza, responsabilità, protezione della privacy, occupazione e sicurezza sono questioni che al momento non sono state completamente risolte.

- Digitalizzazione e mobilità come servizio.

I big data e le informazioni in tempo reale attraverso Internet, le app e gli smartphone sono le tendenze chiave nella digitalizzazione del trasporto pubblico. I dati raccolti da diverse fonti (sistemi di biglietteria, sensori nei veicoli e infrastruttura PT, segnali stradali, sondaggi, social media, app per smartphone, ecc.) Possono essere utilizzati per analizzare le preferenze e le abitudini dei passeggeri per fornire servizi migliori in treni e oggetti infrastrutturali. Un'altra opportunità per l'utilizzo dell'analisi dei Big Data è la manutenzione predittiva e la gestione patrimoniale di alta qualità. Numerosi fattori importanti influenzano la crescita del servizio di mobilità: buoni trasporti pubblici, una politica di roaming a banda larga mobile e forti connessioni a banda larga.

- Ulteriori cambiamenti nelle filiere: globalizzazione, ICT e stampa 3D.

La pressione competitiva globale, la disponibilità di TIC efficaci che cambiano il comportamento dei consumatori e la crescente personalizzazione dei prodotti e lo sviluppo della stampa 3D sono tre aspetti principali che continueranno a influenzare la politica dei trasporti nelle operazioni di trasporto merci.

- Economia circolare.

La politica di economia circolare diretta all'uso di materiali riciclati e prodotti / componenti ripristinati richiederà nuovi schemi di trasporto di merci dagli utenti ai produttori. Ciò significa che la domanda di trasporto potrebbe aumentare.

- Crescente ruolo dei modi attivi nel mix di trasporto urbano.

Camminare e andare in bicicletta non sono nuovi fenomeni, ma dovrebbero essere presi in considerazione nell'integrazione di diversi mezzi di trasporto. Il bike sharing e l'espansione delle aree pedonali sono le tendenze in aumento degli ultimi anni.

- Aumentare le minacce alla sicurezza.

A causa delle crescenti minacce di attacchi terroristici nell'UE, il trasporto pubblico richiede soluzioni speciali di prevenzione e misure di sorveglianza. Inoltre, la digitalizzazione, l'automazione e le soluzioni di rete nel settore dei trasporti amplieranno le minacce alla sicurezza informatica. Oggi manca una difesa comune e coordinata contro le minacce informatiche. Inoltre, uno spiegamento coordinato dei sistemi di trasporto intelligenti urbani (ITS) che ottimizza l'uso dell'infrastruttura esistente attraverso una varietà di mezzi richiede una serie di decisioni: integrare la legislazione esistente sull'accesso al traffico e ai dati di viaggio, fornendo specifiche in tempo reale Informazioni sul traffico e servizi di informazione multimodale, come previsto nel quadro della direttiva ITS (2010/40 / UE), facilitano il dispiegamento di sistemi di comunicazione da veicolo a veicolo e da veicolo a infrastruttura nelle aree urbane (CE, 2013d, 2013c).

ALTRI PROGETTI E INIZIATIVE UE

Precedenti progetti relativi all'ottimizzazione energetica nelle ferrovie urbane:

1. Progetto MERLIN1 (Gestione sostenibile e intelligente dell'energia per sistemi ferroviari più intelligenti in Europa: un approccio di ottimizzazione integrato) nel 7 ° programma quadro dell'UE (2012-2015). Il progetto era dedicato alla gestione dell'energia nei sistemi ferroviari ed era finalizzato a fornire un approccio integrato e ottimizzato per supportare le decisioni operative che portavano a una gestione intelligente e conveniente di energia e risorse. Mentre la ferrovia urbana non rientrava nell'ambito di questo progetto, MERLIN ha affrontato gli aspetti della gestione intelligente dell'energia dei servizi suburbani nelle principali conurbazioni urbane, il che è rilevante per OPEUS.

2. Progetto OSIRIS2 (Strategia ottimale per innovare e ridurre il consumo di energia nei sistemi ferroviari urbani) nell'ambito del 7° Programma quadro dell'UE (2012-2015). OSIRIS mirava a consentire una riduzione del consumo energetico globale dei sistemi ferroviari urbani in Europa del 10% rispetto ai livelli attuali entro il 2020. Per raggiungere questo obiettivo, sono stati prodotti i seguenti risultati: definizione dei bisogni e requisiti operativi per lo sviluppo di un approccio globale per l'utilizzo di energia nei sistemi ferroviari urbani, cicli di servizio standardizzati e indicatori chiave di prestazione per tram, metropolitana leggera e metropolitana, sviluppando un modello di modello olistico che riunisce i moduli proprietari esistenti di simulazione della rete elettrica e di trazione in un modello di sistema ferroviario urbano completo, utilizzando l'ottimizzazione metodologie per l'identificazione di strategie efficienti e riconciliate per la realizzazione di sistemi ferroviari urbani a basso consumo energetico, ecc.

3. Progetto OPEUS:

Il progetto FINE13 (Future Improvement for Energy and Noise) condotto nell'ambito di Shift2Rail, nell'ambito del programma HORIZON2020 dell'UE (2016-2019), mira a ridurre i costi operativi delle ferrovie mediante una riduzione del consumo di energia e del rumore correlato al traffico ferroviario. L'obiettivo è indirizzato alla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, dei costi del ciclo di vita e dei costi di funzionamento del veicolo.

REQUISITI ECONOMICI

Secondo World Energy Outlook di IEA e OCSE (2016), il prezzo del petrolio dovrebbe aumentare e si prevede che sarà di almeno 80 \$ al barile (bbl) nel 2020. Questo, insieme alla volatilità nei mercati dell'energia e alle pressioni di sicurezza della generazione di energia, aumenta la necessità di una maggiore ottimizzazione delle risorse nelle ferrovie.

Pertanto, l'obiettivo principale legato all'energia è evitare un'economia guidata dai combustibili fossili attraverso lo sviluppo di energia alternativa e l'ottimizzazione del consumo di energia (EC, 2015b). Pertanto, l'attenzione principale è rivolta ai modi di trasporto elettrici e, in particolare ai trasporti pubblici - i sistemi ferroviari urbani.

DOMANDA E CAPACITÀ DELLE FERROVIE URBANE

In termini di trasferimento modale dal trasporto privato a quello pubblico nelle aree metropolitane, la ferrovia urbana è la modalità preferita grazie alla sua capacità di trasporto di massa superiore che consente un trasporto di persone molto più elevato in una determinata unità di tempo rispetto alla strada, e di solito richiede molto meno uso del suolo (UIC e CER, 2015). Dai 57,6 miliardi di viaggi di trasporto pubblico locale nell'UE effettuati nel 2014, circa il 44% è effettuato tramite sistemi ferroviari urbani: tram/LRT rappresentano il 14,5% dei viaggi totali, i sistemi di metropolitana per il 16,2% e le ferrovie suburbane costituiscono il restante 13,6% di il totale (UITP, 2016). Inoltre, la capacità dei sistemi ferroviari urbani è molto più elevata rispetto ad altri modi di trasporto. Il confronto è mostrato in Tab. 1 e in Fig. 4.

Inoltre, le aziende cercano opportunità per ridurre la dipendenza dai finanziamenti statali. Sono incoraggiati a sviluppare entrate secondarie non tariffarie. Pertanto, i modelli di business tradizionali nel settore dei trasporti pubblici sono in fase di trasformazione (ad esempio opportunità di vendita al dettaglio nelle stazioni, pubblicità, sviluppo immobiliare all'interno e intorno alle strutture ferroviarie, segnaletica digitale, asta di denominazione delle stazioni, ecc.).

Tabella 1. Caratteristiche di capacità dei modi di trasporto urbano

Generic Class		Private		Street Transit		Semi-rapid Transit		Rapid Transit	
Characteristics	Unit/ Mode	Auto on Street	Auto on Freeway	RB	SCR	BRT	LRT	RRT	RGR
Vehicle capacity, C_v	sps/veh	4-6, total	1.2-2.0 usable	40-120	100-250	40-150	110-250	140-280	140-210
Vehicles/TU	veh/TU	1	1	1	1-3	1	1-4	1-10	1-10
TU capacity	sps/TU	4-6, total	1.2-2.0 usable	40-120	100-500	40-150	100-750	140-2400	140-2000
Line capacity, ^[c] C	sps/h	720-1050 ^[b]	1800-2600 ^[b]	2400-8000	4000-15,000	4000-8000-20,000 ^[b]	6000-20,000	10,000-70,000	8000-60,000
Productive capacity, ^[c] P_c	10^3 sp-km/h	10-25 ^[d]	50-120 ^[d]	25-90	35-150	75-200-600	120-600	700-1800	800-4000

Note: [a] Abbreviazioni: sps = spazi; veh = veicoli; TU = unità di transito; RB = bus regolare; SCR = tram; BRT = transito rapido bus; LRT = transito ferroviario leggero; RRT = transito rapido su rotaia; RGR = ferrovia regionale.

[b] Con più corsie parallele e sorpassi nelle stazioni.

[c] I valori per C e P_c non sono necessariamente prodotti per i valori estremi dei loro componenti perché raramente coincidono.

[d] Per le auto private, la capacità è il prodotto di occupazione media (1,2 - 1,3) e max. frequenza, poiché non è possibile utilizzare tutti i posti disponibili.

Fonte: (Vuchic, 2007)

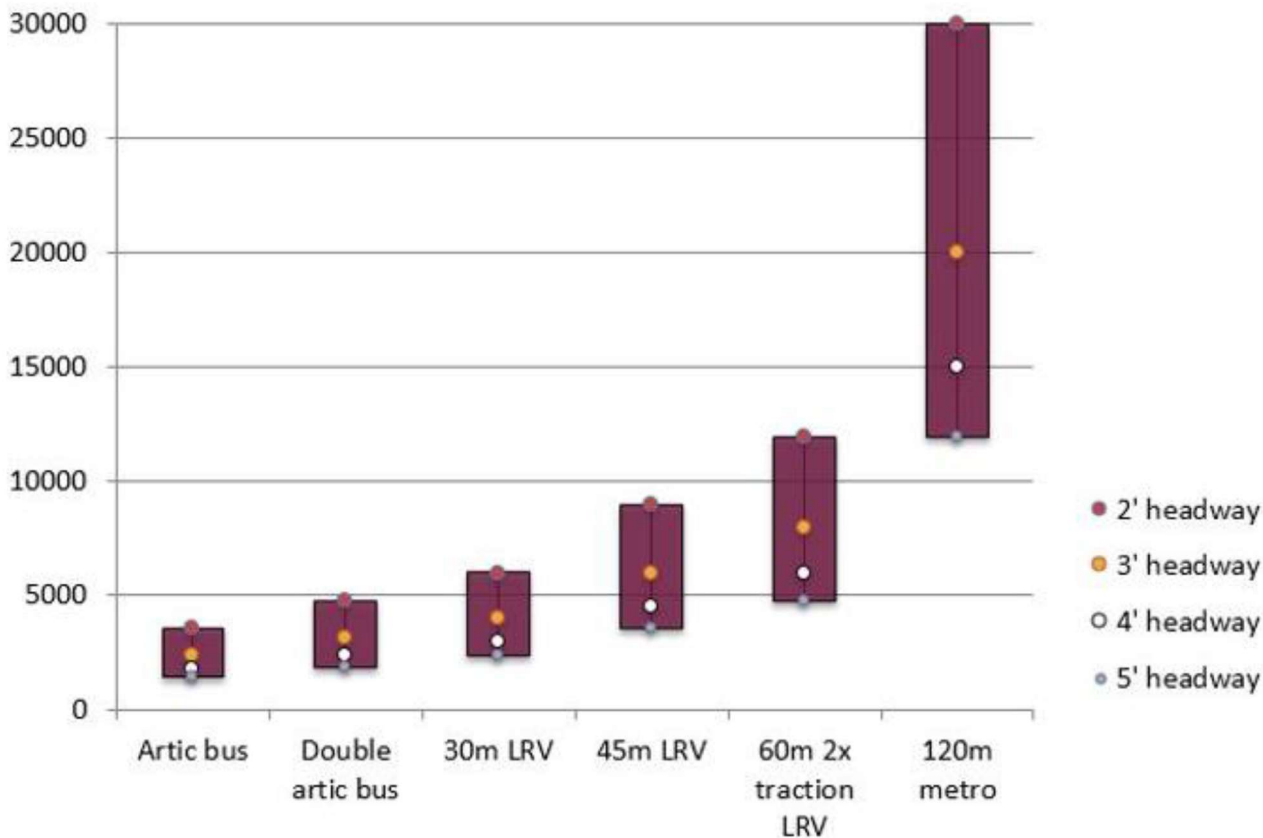


Figura 4. Capacità oraria per velocità fissata per diversi valori di distanziamento.

Fonte: UITP, 2016

COSTO TOTALE DELLA PROPRIETÀ

L'espressione "costo del ciclo di vita" copre il costo di tutte le attività iniziali che hanno creato il sistema e il costo delle attività future che saranno necessarie per mantenere l'investimento disponibile per l'uso continuato, incluso il consumo di energia (Tinubu & Allen, 2005). Ad esempio, l'energia rappresenta il 15-20% delle spese operative di una rete LRT / tram ed è la seconda spesa più grande dopo i costi del personale (UITP, 2014b) (Fig. 5). Pertanto, per rimanere una modalità di trasporto pubblico economica, i sistemi ferroviari urbani dovrebbero trovare opportunità per risparmiare energia e ridurre gli sprechi. Pertanto, gli operatori dovrebbero prestare attenzione al TCO del treno quando acquistano nuovo materiale rotabile e mantenere un adeguato equilibrio tra prezzo iniziale per il treno e costo durante un ciclo di vita (efficienza energetica, manutenibilità, ecc.). A volte treni più costosi ma ad alta efficienza energetica nella fase iniziale potrebbero risparmiare sui costi in ulteriori operazioni.

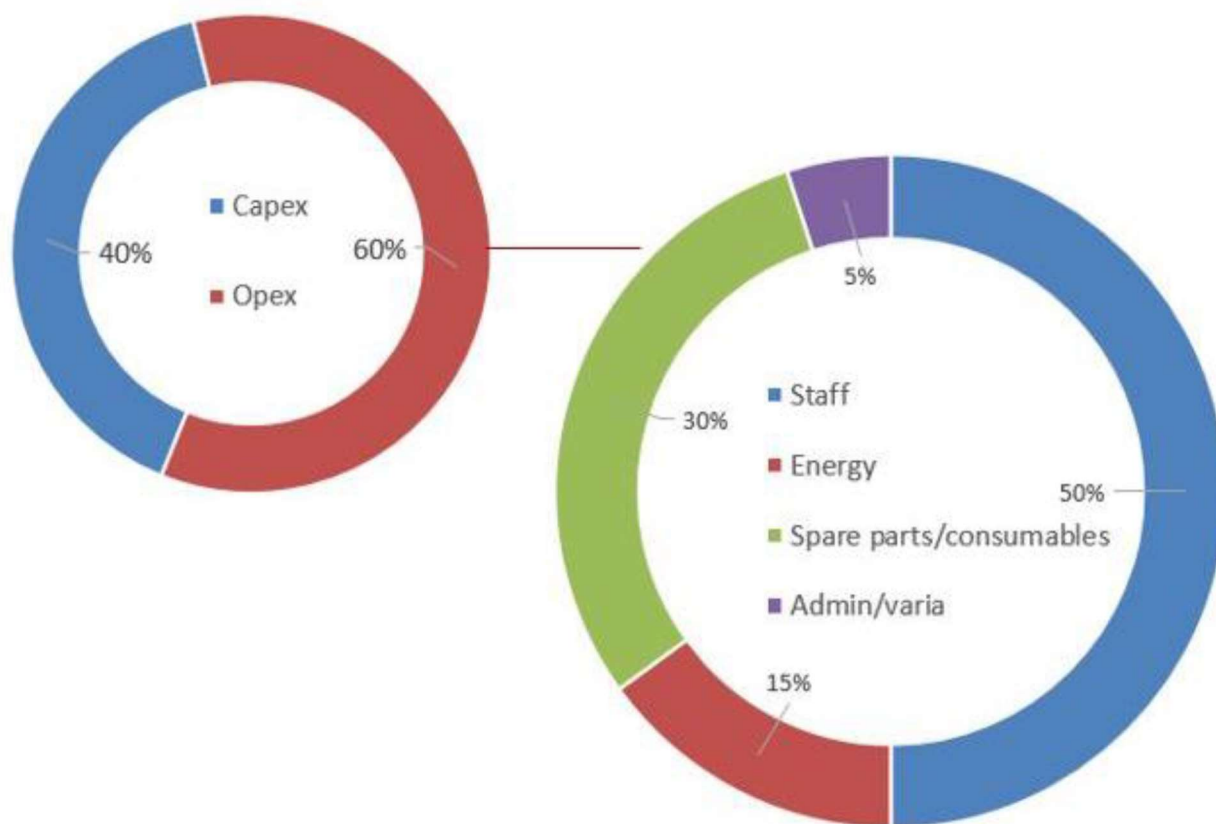


Figura 5. Capitale indicativo del materiale rotabile ferroviario urbano e spese operative

Note: questa rappresentazione LCC è indicativa in quanto la ripartizione dei costi varia notevolmente da paese a paese in base al costo del lavoro, costo dell'energia, struttura della flotta (dimensioni, età, ecc.), allineamento (segregato, traffico misto, topologia, distanza tra le stazioni, ecc.) e condizioni dell'infrastruttura (usura, ecc.).

Fonte: UITP, 2017

RICAVI AGGIUNTIVI E CRESCITA DELL'UTILIZZO ENERGETICO

Di recente, la quota di entrate non tariffarie ha iniziato a crescere a causa del desiderio di ridurre la dipendenza dai finanziamenti pubblici. Tuttavia, entrate commerciali supplementari potrebbero richiedere un consumo di energia aggiuntivo (ad es. Schermi pubblicitari e televisivi nel materiale rotabile e nelle stazioni o nuovi servizi per i passeggeri). Gli esempi di tale pubblicità sono presentati nelle figure 6 e 7. Questo aumento tuttavia trascurabile del consumo di energia da fonti di entrate aggiuntive (entrate pubblicitarie, passeggeri aggiuntivi attraverso un maggiore comfort) potrebbe essere coperto nel grande schema dal potere frenante rigenerativo.

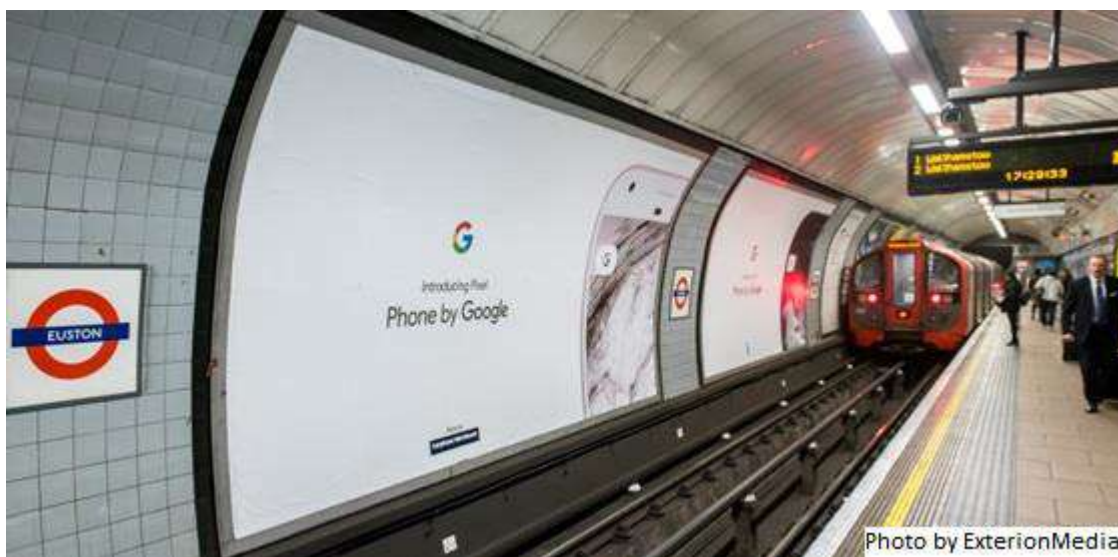


Figura 6. Pubblicità di segnaletica digitale nella metropolitana di Londra



Figura 7. Pubblicità con segnaletica digitale nel trasporto pubblico a Tokyo, in Giappone

REQUISITI OPERATIVI

CICLI DI SERVIZIO STANDARDIZZATI DEL RAIL URBANO

Comprendere i cicli di lavoro e i loro moduli (interstazioni e velocità media nelle interstazioni) è un requisito operativo essenziale per gli operatori ferroviari urbani. Lo sviluppo di cicli di lavoro è stato uno degli obiettivi del progetto OSIRIS. È stata ottenuta una dimostrazione del concetto, ma non ancora realizzata con la misurazione sul campo. La progettazione dei cicli di lavoro è proseguita nell'OPEUS. Quindi, i cicli operativi della ferrovia urbana sono descritti in D.3.1 sulla base dei risultati del programma Roll2Rail (progetto FINE1).

TRENI LEGGERI

La riduzione di massa del materiale rotabile può anche essere considerata una strategia di efficienza energetica. Si distinguono due tipi di design leggero: basato sui componenti (attenzione agli elementi del sistema "treno" senza modifiche al principio di base della configurazione del treno) e basato sul sistema (ottimizzazione del peso dell'intero sistema) (UIC, 2011).

La Figura 8 mostra la proporzione della massa totale del treno presentata da ciascun sottosistema per un binario standard:

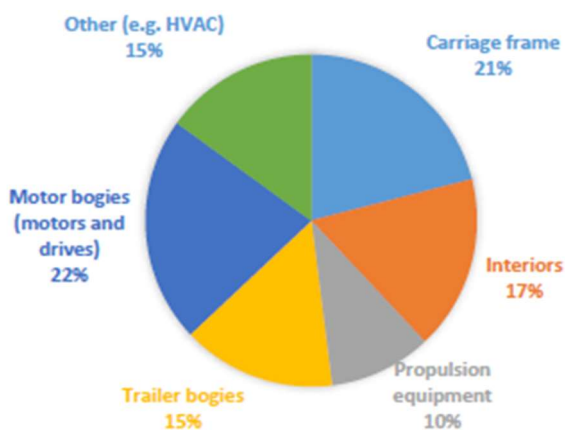


Figura 8. Distribuzione di massa tipica del treno
Fonte: RSSB, 2008

Analizzare ogni elemento (sottosistema) nel sistema "treno" per la possibilità di riduzione del peso è un principio fondamentale di questa strategia. Pertanto, una massa ridotta andrebbe a beneficio della società operativa in termini di minor consumo di energia e usura delle pastiglie / dei dischi dei freni, oltre a una minore usura dell'infrastruttura / della pista.

CONSUMO ENERGETICO E FRENATURA RIGENERATIVA

L'energia per il materiale rotabile viene utilizzata per alimentare gli ausiliari di bordo, ad es. HVAC, sistemi di trazione, dispositivi di sicurezza, sistemi di illuminazione. La Fig. 9 mostra un tipico diagramma di flusso di energia di trazione per i sistemi ferroviari urbani, basato su un'ampia revisione della letteratura di González-Gil et al. (2014).

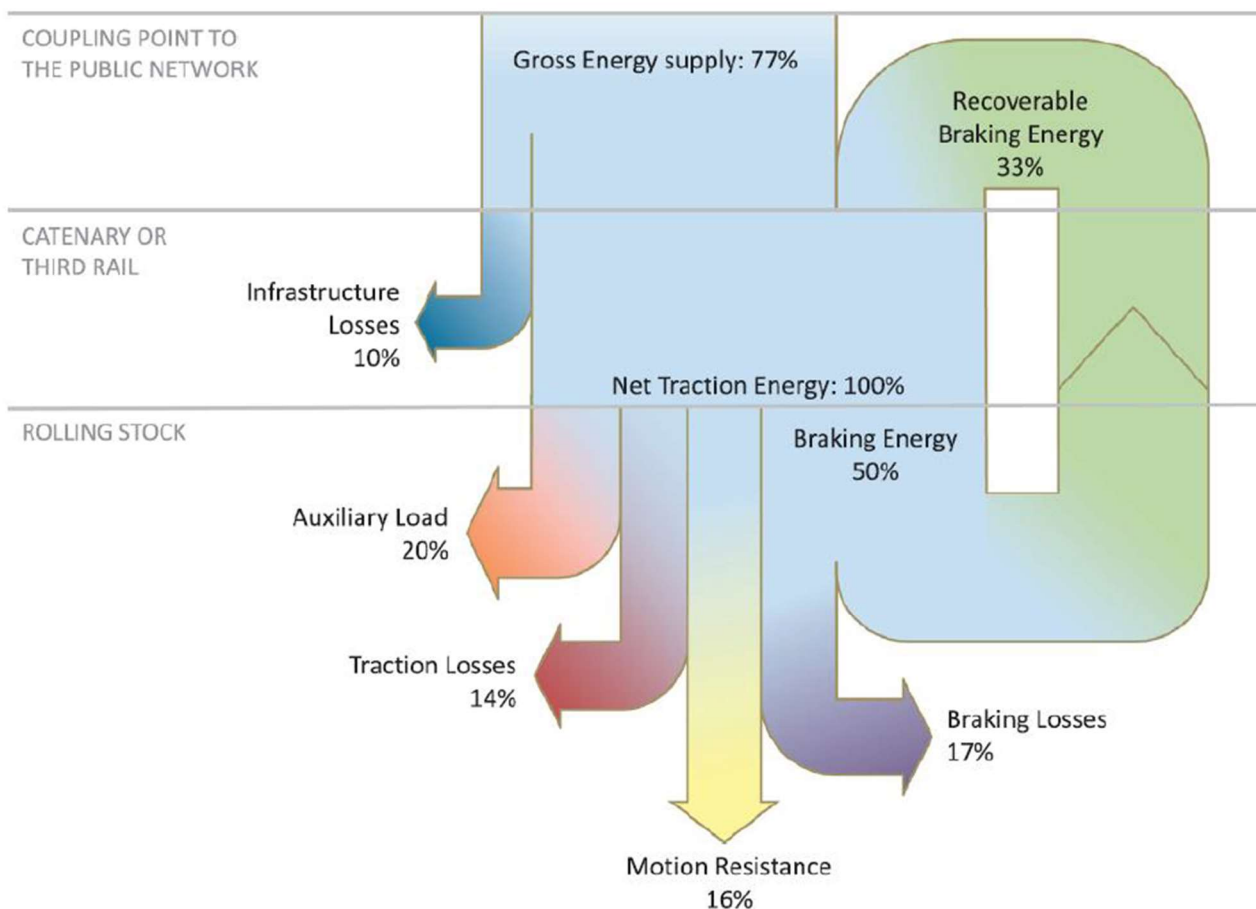


Figura 9. Tipico flusso di energia di trazione nei sistemi ferroviari urbani
Fonte: González-Gil et al., 2014

Le perdite di infrastruttura si riferiscono a perdite nel punto di accoppiamento comune al pattino del pantografo o del collettore e dipendono dal livello di tensione: dal 6% al 22%. Gli ausiliari consumano una quota significativa dell'energia totale del materiale rotabile, dove le apparecchiature HVAC sono responsabili della maggior parte di questo consumo. Un'altra grande quota dell'energia di trazione riguarda il movimento del materiale rotabile: perdite di trazione - 14% e resistenza al movimento - 16%. Tuttavia, la maggior parte dell'energia di trazione viene sprecata nei processi di frenatura - circa la metà della potenza che entra nel materiale rotabile. Potenzialmente, il freno di rigenerazione rigenerativo può aiutare a riportare dal 10% al 45% della perdita di energia a una rete o indirizzare la potenza ad altro materiale rotabile, ma il coefficiente di azione utile non è elevato come previsto. Gli esempi di valutazioni pratiche dei flussi di energia nel Regno Unito, in Spagna e in Svezia mostrano: dall'83,3% al 91,2% di energia viene consumata al pantografo, ma dal 7,2% al 9,6% di energia ritorna alla catenaria (con una certa perdita di energia reostatica) e dall'1,7% al 2,6% - ritorni in griglia (González & Pilo, 2015). Pertanto, la rigenerazione dell'energia può essere migliorata dall'ulteriore sviluppo di tecnologie ad alta efficienza energetica (treni rigenerativi, ESS, sottostazioni reversibili, ecc.).

Al giorno d'oggi, le tecnologie di recupero dell'energia in frenata possono essere classificate in tre famiglie che possono essere utilizzate dagli operatori del trasporto pubblico (Devaux & Tacoen, 2014; González-Gil et al., 2013):

- Applicazioni di stoccaggio mobile costituite da sistemi di accumulo di energia a bordo di un veicolo. Nel caso in cui l'energia recuperata non possa essere utilizzata da altri veicoli nelle vicinanze, l'energia viene indirizzata al sistema di accumulo e successivamente può essere utilizzata dal veicolo per accelerare o fornire energia agli ausiliari (Fig. 10).

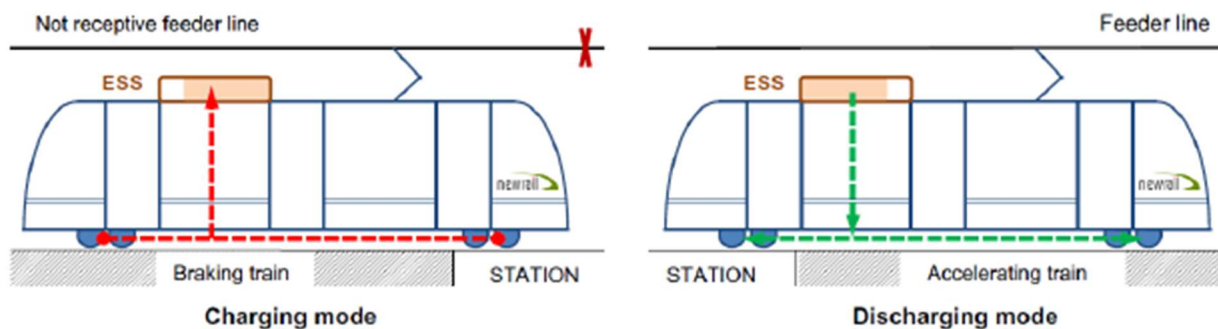


Figura 10. Schema del funzionamento a bordo degli ESS nella ferrovia urbana
 Fonte: González-Gil et al. (2013)

- Applicazioni di immagazzinamento fisse o lungo la strada costituite da uno o più sistemi di accumulo di energia posti lungo i binari. I sistemi possono essere utilizzati per recuperare l'energia da qualsiasi veicolo frenante e per alimentare qualsiasi veicolo in accelerazione nell'area di influenza del sistema (Fig. 11).

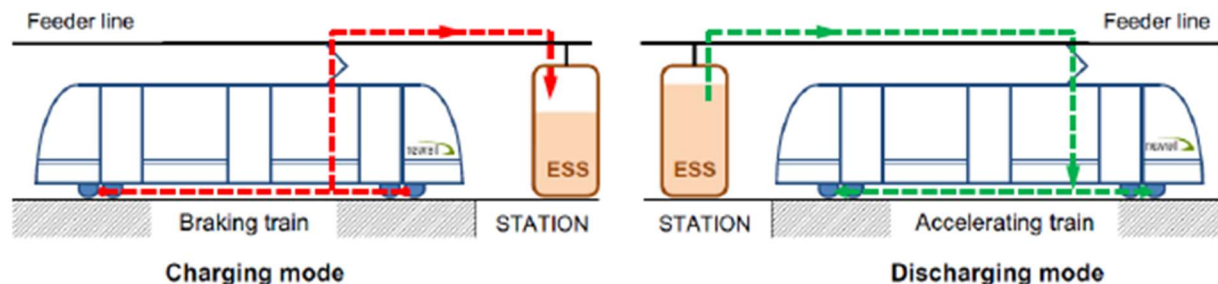


Figura 11. Schema del funzionamento degli ESS lungo il binario urbano

- Le applicazioni fisse "back to the grid" (o sottostazioni reversibili) non immagazzinano l'energia recuperata (tuttavia, possono farlo se un ESS è integrato nella sottostazione), ma inviarlo alla rete elettrica principale per essere utilizzato da altri consumatori o rivenduti ai distributori di energia (Fig. 12).

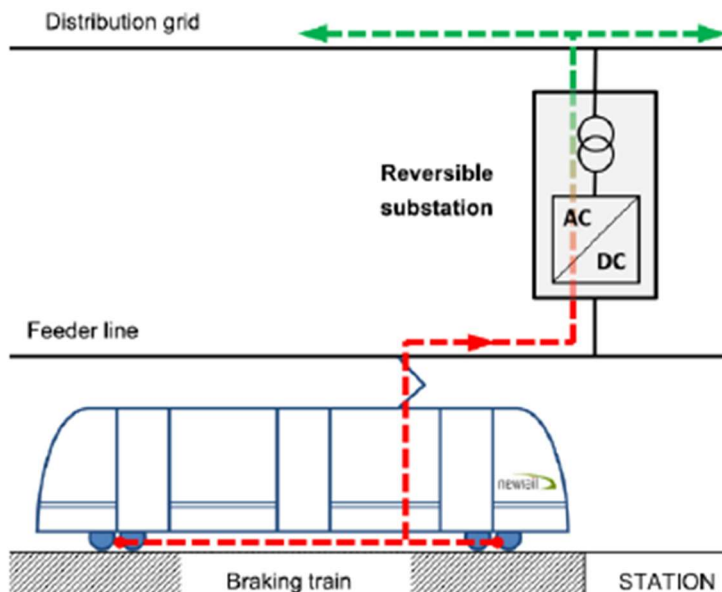


Figura 12. Schema delle sottostazioni reversibili nella ferrovia urbana
 Fonte: González-Gil et al. (2013)

In generale, è possibile identificare le seguenti tecnologie di accumulo di energia per applicazioni ferroviarie urbane: condensatori elettrochimici a doppio strato, volani e batterie (piombo-acido, a base di nichel, a base di litio, a base di sodio e altre batterie emergenti), e accumulo di energia magnetica superconduttiva (González-Gil et al., 2013).

Per quanto riguarda i treni automatizzati, il loro funzionamento ha un impatto diretto ed evidente sui potenziali risparmi energetici in quanto sono generalmente caratterizzati da frequenze molto elevate. Inoltre, i sistemi automatici possono migliorare la ricettività della linea sincronizzando le fasi di accelerazione e decelerazione dei veicoli.

NUOVE FONTI DI CONSUMO ENERGETICO

I sistemi ferroviari urbani sono complessi e il loro consumo di energia dipende da diversi fattori. Anche se i miglioramenti del risparmio energetico vengono effettuati in un'area (ad es. Trazione), altre aree possono aumentare il consumo di energia, come lo era con le tecnologie ITS (ad es. Raccolta e analisi di Big Data e fornire informazioni in tempo reale per passeggeri e treni / personale di manutenzione delle infrastrutture). Inoltre, i passeggeri richiedono funzionalità di comfort più avanzate dal trasporto pubblico: aria condizionata di qualità, accesso Wi-Fi e infotainment (mappe interattive, informazioni in tempo reale, ecc.) Che portano anche alla crescita del consumo di energia.

REQUISITI AMBIENTALI

CAMBIAMENTI CLIMATICI ED EMISSIONI DI GAS A EFFETTO SERRA

Il cambiamento climatico è uno spostamento su larga scala a lungo termine dei modelli meteorologici del pianeta o delle temperature medie. Ci sono prove schiaccianti che il clima terrestre sta cambiando e che la temperatura media della superficie del pianeta è aumentata di 0,89 °C dal 1901 (dopo la prima rivoluzione industriale) al 2012. Inoltre, la temperatura potrebbe aumentare di 3-6 gradi Celsius entro il 2100 senza urgenza azioni (OCSE, 2017a).

Uno dei fattori che influenzano il riscaldamento globale sono le emissioni di gas serra prodotte dalla combustione di combustibili fossili. Nonostante il fatto che le emissioni di gas a effetto serra prodotte dalla ferrovia, generate attraverso la produzione di elettricità, siano molto inferiori a quelle del trasporto su strada, il consumo totale di energia ferroviaria per ferrovia urbana è ancora di circa 11 T GWh all'anno (UITP, 2014a).

In generale, il trasporto è uno dei maggiori fattori che contribuiscono al consumo di energia e alle emissioni di CO₂. Circa il 23% delle emissioni globali di CO₂ da combustibili fossili appartiene al trasporto che è il secondo emettitore più grande dopo la generazione di elettricità e calore (42%) (EC, 2013d; OCSE, 2017b). Inoltre, senza una politica pertinente, le emissioni di gas di trasporto sono aumentate a livello globale del 57% tra il 1990 e il 2012 e, nell'UE, sono aumentate del 36% dal 1990 al 2007 (OCSE, 2017b). Inoltre, nelle aree urbane europee, il trasporto pubblico è responsabile di circa il 10% delle emissioni di gas a effetto serra legate ai trasporti (Ticket to Kyoto, 2014a). Ad esempio, secondo il caso di studio del progetto di Kyoto (2014), le emissioni di carbonio dei modi di trasporto urbano in Francia nel 2008 erano le seguenti (Fig. 13):

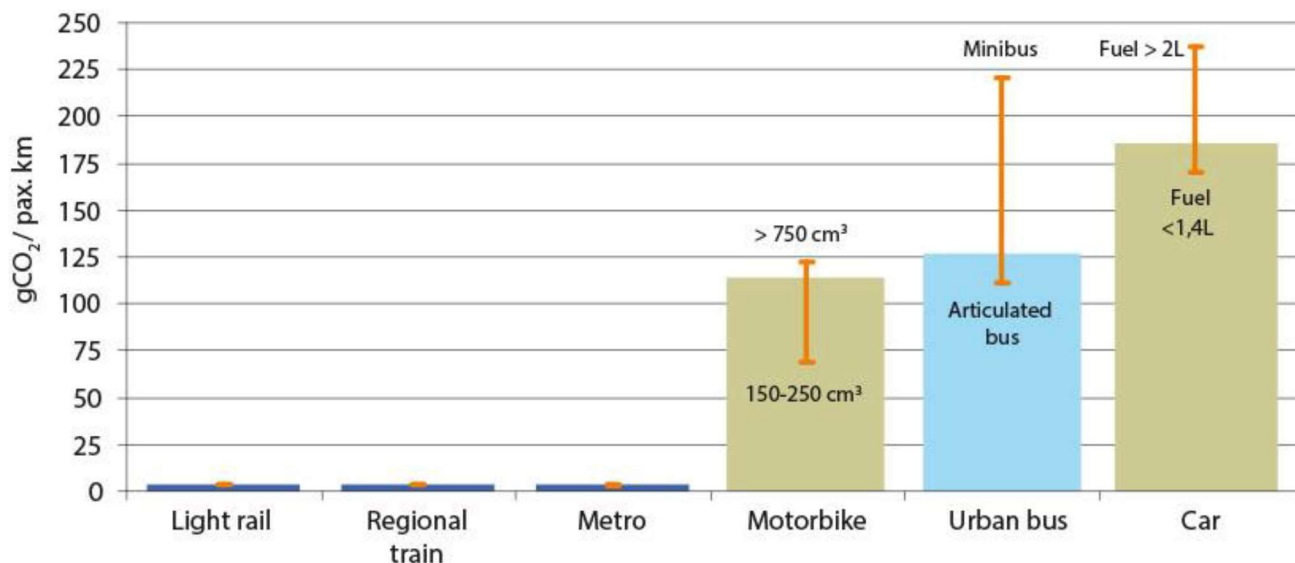


Figura 13. Emissioni di CO₂ dei modi di trasporto urbano in Francia

Fonte: DELOITTE, 2008; Ticket to Kyoto, 2014

Tuttavia, come si può osservare dalla Figura 13: il contributo derivante dai sistemi ferroviari urbani è trascurabile.

INQUINANTI LOCALI

Il maggior numero di emissioni di gas di trasporto si concentra nelle aree urbane dove il numero di auto private è elevato. I tassi di occupazione per tali auto sono bassi e il tasso di emissione è alto.

Accanto all'emissione di gas serra, la produzione di energia e i motori a combustione interna producono particolato (PM) e inquinanti locali. Gli inquinanti soggetti a limitazioni legali in Europa sono CO, HC e particolato (PM). Molteplici settori politici si concentrano sulla misurazione e sulla regolazione della qualità dell'aria all'interno dell'UE (Eurostat, 2017a). Le direttive accettate hanno contribuito a ridurre il livello di esposizione della popolazione urbana all'inquinamento atmosferico.

Le nuove direttive hanno imposto l'obbligo di valutare e ridurre l'esposizione della popolazione alle concentrazioni di PM_{2,5} entro il 2020.

Pertanto, oltre al livello inferiore di emissioni di gas a effetto serra (cfr. Grafico sopra), un altro vantaggio del trasporto ferroviario è che LRT / tram, treni regionali e sistemi metropolitani hanno emissioni zero nel punto di utilizzo, mentre i veicoli stradali emettono ossidi di azoto (NO_x), PM di scarico e altri inquinanti come HC e CO. Come accennato, queste emissioni hanno un impatto negativo sul benessere delle persone e portano a problemi respiratori e di altro tipo. Aumentare la quota del trasporto elettrico all'interno delle città (in particolare la ferrovia urbana) contribuisce al miglioramento della qualità dell'aria rispetto alle direttive citate.

SMART CITIES E SOSTENIBILITÀ

Il concetto di "Smart city", che utilizza tecnologie di informazione e comunicazione per migliorare la sua vivibilità, lavorabilità e sostenibilità, è relativamente nuovo nello sviluppo urbano (Hurtado, 2016). Significa soluzioni ICT per il trasporto pubblico, i sistemi di energia rinnovabile e gli edifici efficienti in termini di risorse nelle città. Pertanto, le città intelligenti e le tecnologie digitali aiutano a creare "città verdi" con un alto livello di efficienza. Pertanto, il trasporto pubblico urbano integrato è responsabile della riduzione della congestione nel trasporto pubblico e del consumo di energia nelle ferrovie urbane (Koceva et al., 2016).

3 CONCLUSIONE: REQUISITI CHIAVE PER L'ENERGIA FACCIATI DAI SISTEMI FERROVIARI URBANI EUROPEI

È stata effettuata una revisione completa delle indagini esistenti sui requisiti sociali, politici, economici, operativi e ambientali relativi al consumo di energia nei sistemi ferroviari urbani. La portata dei requisiti che influenzano il consumo di energia nelle ferrovie urbane con particolare attenzione ai veicoli è illustrata nella figura 14:

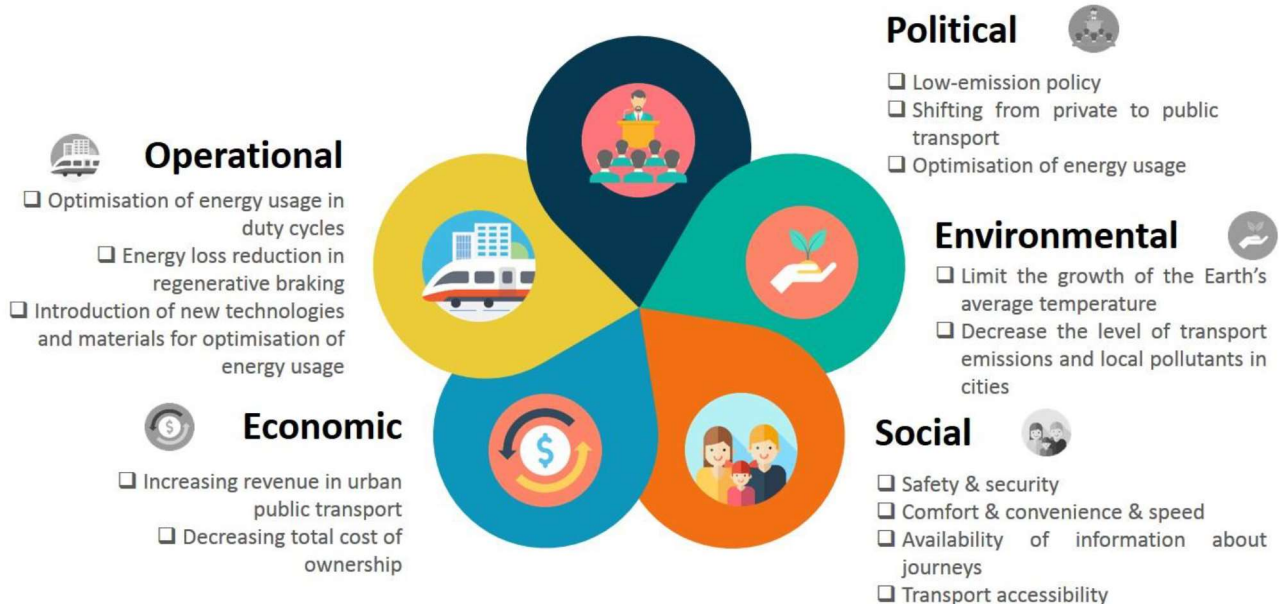


Figura 14. Ambito di applicazione dei requisiti che influenzano il consumo di energia nelle ferrovie urbane
Fonte: UITP, 2017

La considerazione dell'ottimizzazione dell'utilizzo dell'energia nelle ferrovie urbane dovrebbe tenere conto degli obiettivi, delle aspettative e dei bisogni delle diverse sfere della vita: politica, ambientale, socioeconomica e operativa. Alcuni requisiti possono essere contrastati (ad es. Riduzione del consumo di energia e maggiore comfort per i passeggeri allo stesso tempo) e quando si sviluppa e si introduce il nuovo sistema è necessario trovare un equilibrio tra questi requisiti.

2.2 Definizione del modello di calcolo

L'energia necessaria nel sistema ferroviario consuma per soddisfare la potenza di trazione e la potenza di non trazione. Potenza di trazione rappresenta l'energia utilizzata per propulsione il materiale rotabile e alimentare il suo sistema ausiliario. D'altro canto, potenza di non trazione definisce l'energia utilizzata negli altri componenti di sistema ferroviario come stazioni, depositi e sistemi di segnalazione.

Nonostante, il consumo del materiale rotabile possa essere semplicemente calcolato integrando la potenza (P) nel tempo di funzionamento, è quasi impossibile ottenere l'esatta quantità di potenza domandata. La potenza richiesta è influenzata da molti fattori reciprocamente dipendenti. I principali fattori sono elencati di seguito.

- Caratteristiche del veicolo: lunghezza e peso, resistenze di guida, velocità massima, accelerazione massima e decelerazione massima, sforzo di trazione e di frenatura elettrico, efficienza di trazione e di frenata.
- Morfologia dell'infrastruttura: lunghezza e pendenza, capacità e occupazione di linea, altitudine e numero di stazioni, raggio delle curve, limitazioni di velocità, lunghezza e sezione di gallerie, corrente e tensione nominale di linea.
- Tipo di servizio: urbano, suburbano, regionale, intercity, merci.
- Possibile utilizzo del sistema di accumulo dell'energia per rigenerare energia dalla frenata: capacità ed efficienza, a bordo o stazionari.

- Comportamento del macchinista: essendo dotato di ATO (Automatic Train Operation) o DAS (Driver Assistance System) o nessuno, consentendo strategie di risparmio energetico, utilizzando l'inerzia del treno per limitare lo sforzo di frenata, utilizzando le sezioni in discesa per accelerare e le sezioni in salita per rallentare il treno.

Al fine di calcolare il consumo di energia di un treno elettrico, nelle sezioni seguenti vengono discussi due approcci di base.

Come già accennato, il consumo di energia può essere calcolato con la formula seguente:

$$E = \int P dt$$

In alternativa, attraverso la forza di trazione (F) sullo spostamento:

$$E = \int F_T dx$$

La potenza richiesta è la potenza elettrica che viene consumata dai componenti della catena di trazione e dal sistema ausiliario. La catena di trazione basata sull'alimentazione AC o DC è diversa. La catena più comune nei veicoli ferroviari è nel seguente ordine: Catenaria, pantografo, trasformatore, circuito intermedio DC, convertitore di motore, motore, ingranaggio cilindrico e ruota. Sistema ausiliario contiene il sistema di riscaldamento, ventilazione e aria condizionata (HVAC), il sistema di illuminazione interna o esterna, il sistema di apertura e chiusura automatica delle porte e altri sistemi considerati al fine di soddisfare il comfort dei passeggeri.

Secondo le seguenti equazioni, sono disponibili due metodi, metodo di potenza elettrica e metodo cinematico, per ottenere la potenza totale richiesta dal materiale rotabile.

$$P = V \cdot I$$

$$P = v \cdot F_T + P_A$$

Dove:

P è la richiesta di potenza totale in W

V è la tensione in V

I è la corrente in A

v è la velocità del treno in m/s

F_T è la forza di trazione in N

P_A è la potenza ausiliaria in W

Metodo della potenza elettrica

Nella maggior parte dei casi di veicoli elettrici ferroviari, l'energia elettrica viene trasferita al veicolo mediante catenaria aerea come conduttore e la rotaia come conduttore di ritorno. In alcuni casi, la terza rotaia svolge il ruolo di catenaria. Pertanto, la potenza input (P_{in}) può essere ottenuta moltiplicando la tensione di linea (V) per la corrente (I).

$$P_{in} = \int V \cdot I dt$$

Se V è considerato costante

$$P_{in} = V \int I dt$$

A causa delle perdite di energia nei vari componenti del veicolo, inclusi motore, convertitore, trasformatore, pantografo, ecc., La potenza output o la potenza alle ruote è inferiore alla potenza input o alla potenza nella catenaria. Perciò:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

dove η è l'efficienza di trazione. Wardrop (1989) propone un modello basato sulla potenza elettrica per stimare il consumo di energia [1]. Il valore k è il numero di circuiti motore paralleli.

$$E_m = \int \frac{1}{1000 \times 3600} \times V \times I_m \times k \times r_T dt = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \times k \times V \int I_m \times r_T dt$$

dove E_m è il principale consumo di energia (kWh)

I_m è la corrente del motore (A)

k è il codice di combinazione del motore, $k \geq 1$

$r = \frac{F_{actual}}{F_{max}}$, è la proporzione tra trazione effettiva e trazione massima.

t è il tempo di funzionamento (s)

Come mostra l'equazione, per calcolare il consumo, deve trovare il valore effettivo della forza di trazione. Nella prossima sezione (metodo cinematico) verrà discusso chiaramente sulla stima di trazione.

Indipendentemente dalle perdite di energia a livello del veicolo, acquisire energia elettrica in ingresso trasferita al veicolo nella catenaria, dovrebbe essere stimata la tensione e la corrente istantanee. A tal fine, è necessario raccogliere dati presso le stazioni di rettificazione o dal dispositivo di simulazione montato a bordo del treno in grado di segnalare la tensione e la corrente istantanee ricevute.

In continuazione sono riportati due esempi di calcolo di potenza input dalla letteratura.

1- Edstrand (2012) ha utilizzato un modello semplificato per simulare il livello di carico sulle stazioni di rettificazione quando un tram passa sulla sezione [2]. Lui ha scelto 4 stazioni di alimentazione lungo il percorso della linea tranviaria 31 e 32 a Goteborg. I dati sono stati raccolti al mattino presto quando sulla tratta parte un solo tram. La Figura 15 mostra il diagramma di tensione e corrente in una singola stazione di alimentazione che alimenta individualmente il tram 31 in 5 minuti. La Figura 16 invece, illustra il diagramma di tensione e corrente per un minuto in due stazioni che alimentano parallelamente il tram 31.

Gli svantaggi di questo approccio alla raccolta dei dati sono le difficoltà e i verificati errori nel tempo di raccolta dei dati, causati dal funzionamento simultaneo parecchi veicoli ferroviari sulla stessa sezione, cadute di tensione, indisponibilità di dispositivi di simulazione adeguati nelle stazioni, ecc.

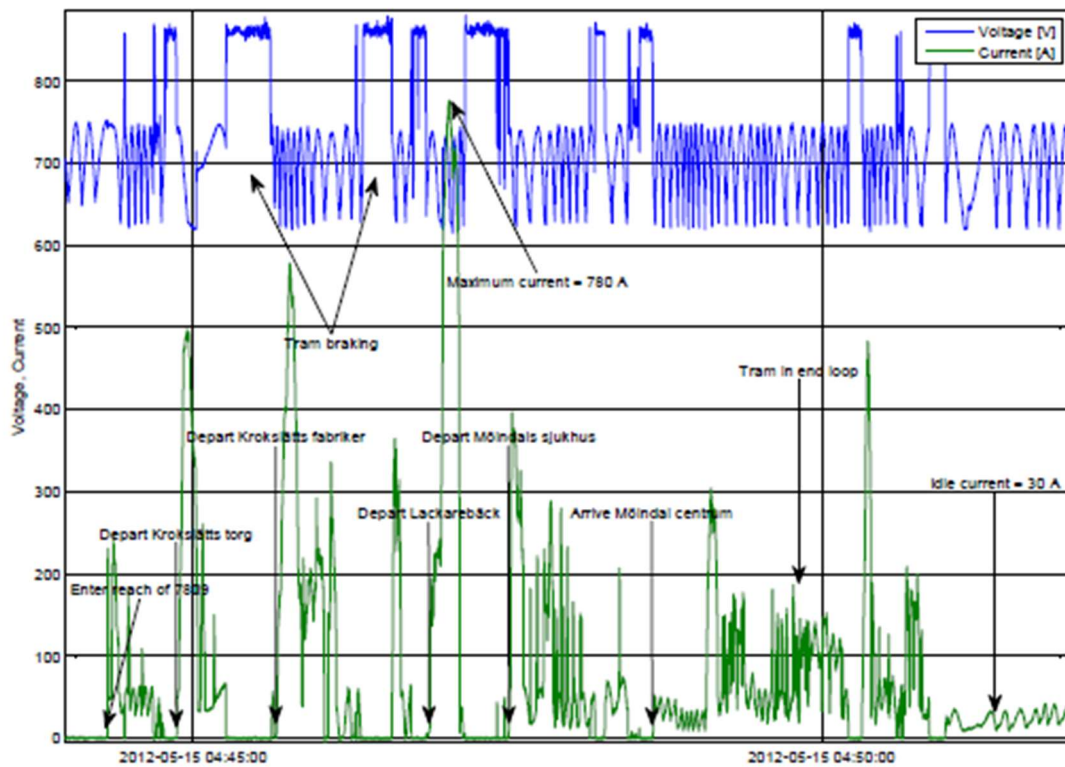


Figura 15. Diagramma di tensione e corrente nella stazione 7809 mentre un tram M31 viaggia da Krokslatt a Mölndal Centrum. Fonte: Edstrand et al., 2012

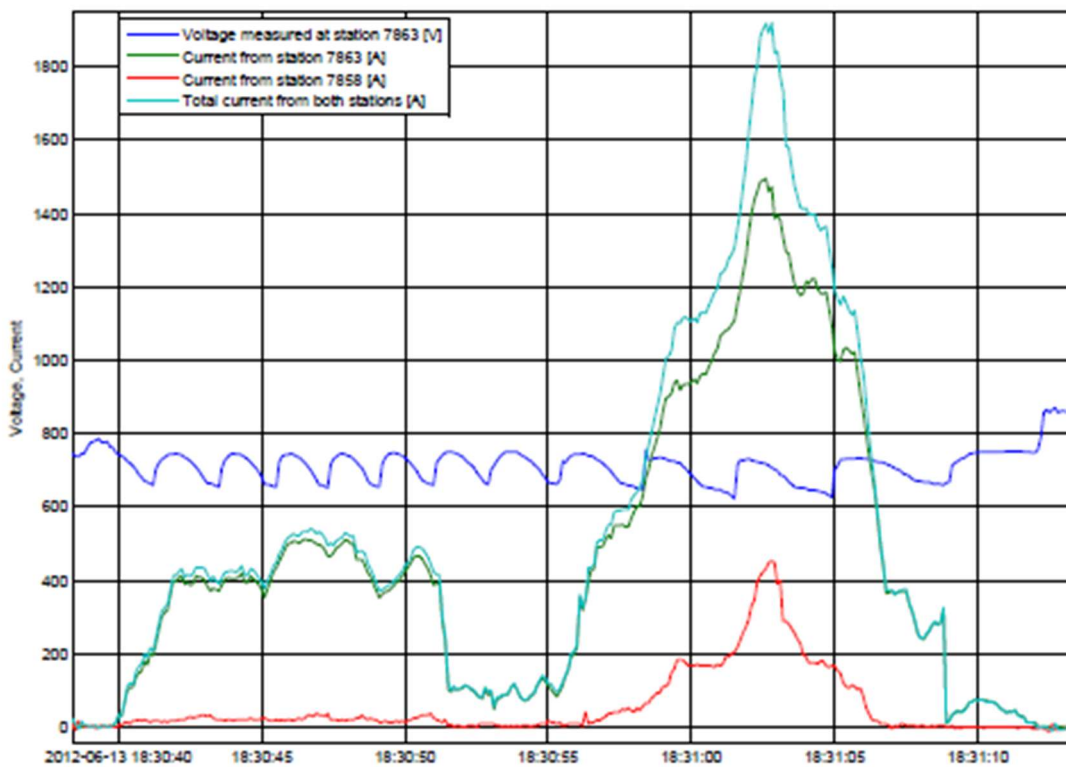


Figura 16. Diagramma di tensione e correnti da stazioni alimentate in parallelo 7858 e 7863. Fonte: Edstrand et al., 2012

2- Tombesi (2017) nella sua ricerca “valutazione delle strategie di guida ecologica dei treni per la formazione del personale di condotta” eseguita presso l'ex deposito locomotive Firenze Romito [3], utilizzato due simulatori per riprodurre la tensione e la corrente istantanee durante il funzionamento di una locomotiva E464 per trasporto regionale Trenitalia. I simulatori impiegati erano il Dynamic Training Simulator (SIDAC) di Trenitalia e la diagnostica remota delle locomotive (RegEnergy) prodotta da Bombardier. La Figura 17 e la Figura 18 mostrano un esempio di dati risultanti dai simulatori.

Nonostante i dati chiari e precisi, il principale svantaggio dell'approccio è la mancanza di disponibilità di tali apparecchiature per tutti i tipi di sistema ferroviario e la sua non generalità.

Metodo cinematico

In questo metodo utilizza la traiettoria del treno per calcolare la potenza alla ruota e, successivamente, la potenza assorbita alla catenaria e, infine, il consumo totale di energia. Traiettoria del treno include i diagrammi di accelerazione (a), velocità (v) e distanza percorsa (x) nel tempo. In base alla seconda legge di Newton, i motori di trazione devono superare le resistenze di guida e accelerare il veicolo.

$$F_T = ma + F_R$$

dove: F_T è la forza di trazione in N

m è il peso del veicolo in kg

a è l'accelerazione in m/s^2

F_R è la resistenza alla guida totale in N

1	Tempo	Timbro tempo	Km	Velocità attuale	Velocità impostata	Tensione	Corrente	Trazione	Antislittante	Tensione batteria	Pressione CG	Pressione CP	Pressione CF1	Pressione CF2	Energia
2027	10.05.2016 14:25:38	00:15:38	0.14	25.00	0.00	3581.00	203.00	54.00	0.00	32.00	5.00	9.55	0.00	0.00	100.53
2028	10.05.2016 14:25:39	00:15:39	0.14	26.00	0.00	3591.00	171.00	48.00	0.00	32.00	5.00	9.56	0.00	0.00	100.63
2029	10.05.2016 14:25:40	00:15:39	0.14	26.00	0.00	3593.00	173.00	44.00	0.00	32.00	5.00	9.57	0.00	0.00	100.72
2030	10.05.2016 14:25:40	00:15:40	0.15	26.00	0.00	3612.00	185.00	42.00	0.00	32.00	5.00	9.58	0.00	0.00	100.81
2031	10.05.2016 14:25:41	00:15:40	0.15	26.00	0.00	3601.00	186.00	41.00	0.00	32.00	5.00	9.59	0.00	0.00	100.92
2032	10.05.2016 14:25:41	00:15:41	0.16	26.00	0.00	3604.00	185.00	40.00	0.00	32.00	5.00	9.60	0.00	0.00	101.03
2033	10.05.2016 14:25:42	00:15:42	0.16	26.00	0.00	3597.00	186.00	40.00	0.00	32.00	5.00	9.61	0.00	0.00	101.14
2034	10.05.2016 14:25:42	00:15:42	0.17	26.00	0.00	3604.00	185.00	40.00	0.00	32.00	5.00	9.62	0.00	0.00	101.26
2035	10.05.2016 14:25:43	00:15:43	0.17	26.00	0.00	3607.00	185.00	40.00	0.00	32.00	5.00	9.63	0.00	0.00	101.37
2036	10.05.2016 14:25:44	00:15:43	0.17	26.00	0.00	3603.00	185.00	40.00	0.00	32.00	5.00	9.64	0.00	0.00	101.48
2037	10.05.2016 14:25:44	00:15:44	0.18	27.00	0.00	3587.00	142.00	36.00	0.00	32.00	5.00	9.65	0.00	0.00	101.55
2038	10.05.2016 14:25:45	00:15:44	0.18	27.00	0.00	3593.00	141.00	29.00	0.00	32.00	5.00	9.66	0.00	0.00	101.63
2039	10.05.2016 14:25:45	00:15:45	0.19	27.00	0.00	3602.00	141.00	25.00	0.00	32.00	5.00	9.67	0.00	0.00	101.72
2040	10.05.2016 14:25:46	00:15:46	0.19	27.00	0.00	3592.00	141.00	22.00	0.00	32.00	5.00	9.68	0.00	0.00	101.80
2041	10.05.2016 14:25:47	00:15:46	0.19	27.00	0.00	3585.00	144.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.69	0.00	0.00	101.89
2042	10.05.2016 14:25:47	00:15:47	0.20	27.00	0.00	3601.00	143.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.70	0.00	0.00	101.96
2043	10.05.2016 14:25:48	00:15:47	0.20	27.00	0.00	3611.00	145.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.71	0.00	0.00	102.05
2044	10.05.2016 14:25:48	00:15:48	0.21	27.00	0.00	3611.00	145.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.72	0.00	0.00	102.12
2045	10.05.2016 14:25:49	00:15:48	0.21	27.00	0.00	3612.00	145.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.73	0.00	0.00	102.21
2046	10.05.2016 14:25:49	00:15:49	0.21	27.00	0.00	3598.00	146.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.74	0.00	0.00	102.28
2047	10.05.2016 14:25:50	00:15:50	0.22	27.00	0.00	3597.00	146.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.75	0.00	0.00	102.37
2048	10.05.2016 14:25:50	00:15:50	0.22	27.00	0.00	3593.00	146.00	22.00	0.00	32.00	5.00	9.76	0.00	0.00	102.46

Figura 17. Esempio di rapporto fornito da SIDAC (Fonte Tombesi et al., 2017)

1	Sample Time	SpeedAct-Loco	ZB-XFTB-MGr1	MN-XI-Ln	MN-XU-Ln
474	18/07/2016 08:24:01.164	32.250977	186.767578	654.54102	3268.06641
475	18/07/2016 08:24:02.177	33.862305	186.669922	680.17578	3265.86914
476	18/07/2016 08:24:03.185	35.913086	186.108398	717.77344	3262.69531
477	18/07/2016 08:24:04.195	37.402344	184.448242	738.28125	3259.52148
478	18/07/2016 08:24:05.206	39.477539	184.936523	765.625	3257.32422
479	18/07/2016 08:24:06.216	41.040039	184.179688	798.0957	3253.17383
480	18/07/2016 08:24:07.227	42.724609	182.739258	820.3125	3246.82617
481	18/07/2016 08:24:08.237	44.53125	183.203125	845.94727	3237.30469
482	18/07/2016 08:24:09.247	46.240234	182.299805	866.45508	3230.95703
483	18/07/2016 08:24:10.257	47.998047	181.958008	900.63477	3218.99414
484	18/07/2016 08:24:11.268	49.780273	181.90918	934.81445	3214.11133
485	18/07/2016 08:24:12.278	51.245117	179.077148	957.03125	3197.75391
486	18/07/2016 08:24:13.288	52.929688	180.737305	984.375	3190.18555
487	18/07/2016 08:24:14.301	54.614258	178.515625	998.04688	3194.58008
488	18/07/2016 08:24:15.309	56.347656	180.053711	1035.64453	3197.50977
489	18/07/2016 08:24:16.319	58.007813	179.711914	1051.02539	3201.66016
490	18/07/2016 08:24:17.319	59.619141	178.271484	1064.69727	3205.07813
491	18/07/2016 08:24:18.320	61.230469	178.662109	1083.49609	3213.62305
492	18/07/2016 08:24:19.320	62.62207	178.149414	1088.62305	3209.47266
493	18/07/2016 08:24:20.321	64.428711	177.099609	1151.85547	3196.5332
494	18/07/2016 08:24:21.321	65.917969	176.904297	1158.69141	3187.01172

Figura 18. Esempio di report fornito dalla tele-diagnostica (Fonte Tombesi et al., 2017).

La resistenza al movimento del treno sono divise in due resistenze principali, denominate aerodinamiche e rotolamento, dipendenti principalmente dalle specifiche del veicolo, e due resistenze dipendenti dall'infrastruttura, vale a dire pendenza e curva.

Resistenza aerodinamica dipende dalla velocità quadrato del treno e dal trascinare:

$$F_a = 0.5 \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

Resistenza al rotolamento dipende dal peso del treno e dal coefficiente di attrito:

$$F_r = f \cdot m \cdot g$$

Resistenza alla pendenza dipende dal peso del treno e dalla pendenza longitudinale della rotaia:

$$F_g = m g \sin \alpha$$

Resistenza alla curva dipende dal raggio di curvatura. Tuttavia, la resistenza ha un impatto molto basso sul consumo, ma l'American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) [4] propone la formula seguente per stimarla approssimativamente.

$$F_c = 0.04 F_g \cdot D$$

dove F_a è la resistenza aerodinamica in N

F_r è la resistenza al rotolamento in N

F_g è la resistenza dovuta alla pendenza in N

F_c è la resistenza in curva in N

ρ è la densità dell'aria in kg/m^3

C_d è il coefficiente di trascinare

A è l'area frontale in m^2

v è la velocità in m/s

μ è il coefficiente di attrito tra rotaia e ruota

m è la massa totale del veicolo in kg

g è l'accelerazione di gravità ($9,82\text{m/s}^2$)

α è l'angolo di gradiente

D è il raggio della curva

Secondo le equazioni precedenti, la forza di trazione viene calcolata tramite seguente equazione.

$$F_T = ma + F_a + F_r + F_g + F_c$$

La Figura 19 mostra un grafico della forza di trazione durante una corsa del treno tra due stop. Il treno attraversa quattro fasi: accelerazione, crociera, coasting e fase di frenata. La massima trazione è all'avvio quando il treno accelera. Nella fase di crociera, l'accelerazione diventa gradualmente zero ma una piccola trazione richiede di superare solo le resistenze di guida per mantenere costante la velocità. Coasting significa non applicare energia al veicolo con conseguente trazione zero. Infine, applicando lo sforzo di frenata, il veicolo decelera e la tendenza di trazione va nell'area negativa fino all'arresto.

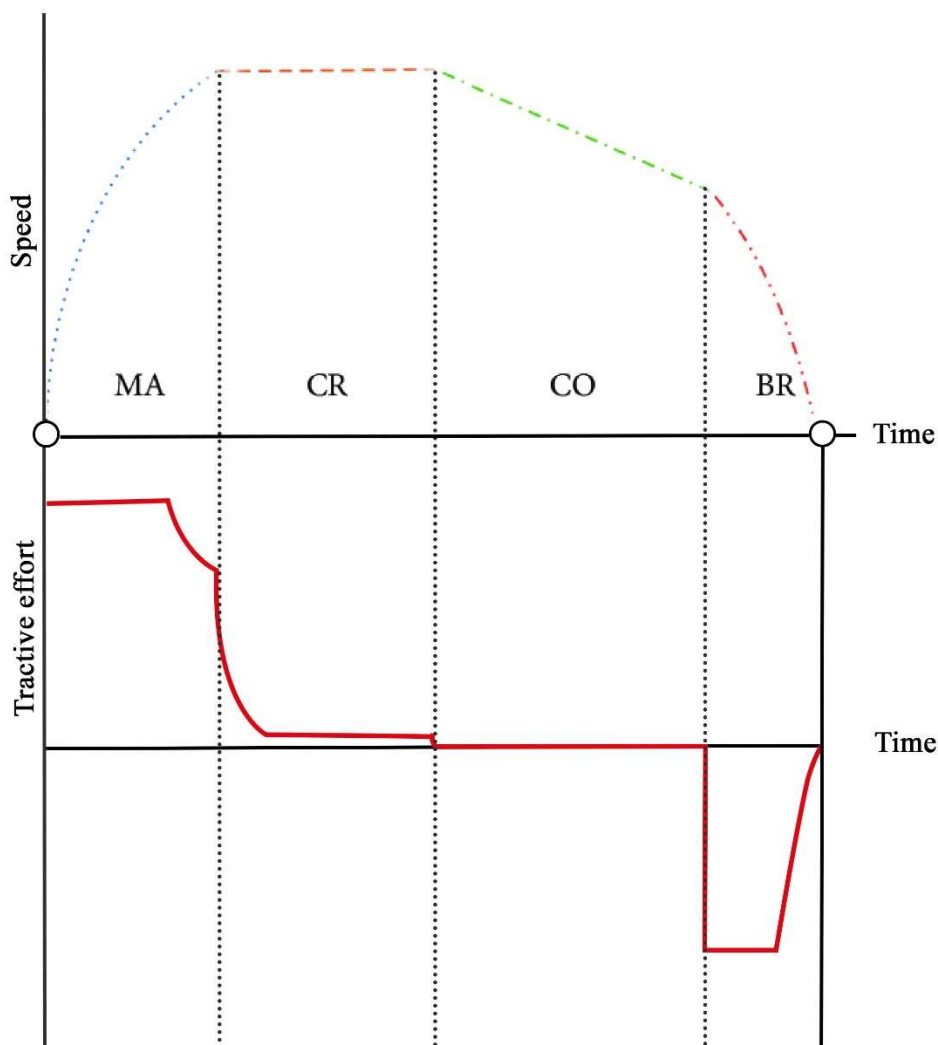


Figura 19. Diagramma della forza di trazione corrispondente alle quattro fasi del movimento del treno

Per stimare la potenza di trazione P_T del veicolo, avendo andamento della forza di trazione, sarebbe sufficiente moltiplicare la velocità istantanea nella forza corrispondente per tracciare il grafico di P_T . Per calcolare il consumo di energia si dovrebbe integrare la potenza di trazione istantanea nel tempo, più l'energia necessaria per il sistema ausiliario.

$$P_T \text{ or } P_{out} = v \cdot F_T$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

dove η è l'efficienza del componente di trazione, inclusi motore, convertitore, trasformatore, pantografo, eccetera e I_A è la corrente assorbita dai componenti di sistema ausiliario.

$$P_A = V \cdot I_A$$

$$E = \int P_{in} dt + \int P_A dt$$

La Figura 20 mostra una curva di efficienza per un componente (ad es. convertitore) parametrizzato per valori normalizzati di P_{load} (potenza di ingresso al componente) e P_{max} (potenza massima del componente). Per semplicità si può assumere un valore medio per l'efficienza del componente. A causa dell'alimentazione in serie di componenti della trazione, dalla catenaria alla ruota, i valori di efficienza devono essere moltiplicati tra loro. Perciò:

$$\eta = \eta_{axle\ gear} \times \eta_{motor} \times \eta_{motor\ inverter} \times \dots \times \eta_{pantograp}$$

Oltre ai dispositivi di trazione, il modello include anche gli ausiliari del treno. Sebbene gli ausiliari consumano stagionalmente una quantità diversa, ma si presume che il consumo ausiliario definito sia costante per la durata del ciclo di guida.

$$P_A = V \cdot I_A$$

$$E = \frac{1}{\eta} \int P_T dt + P_A t$$

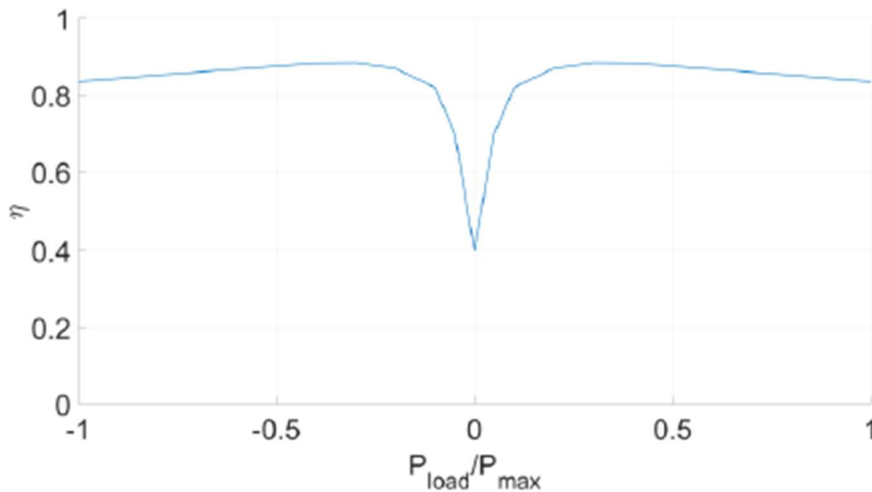


Figura 20. Curva di efficienza (Fonte: OPEUS_D01.2, 2017)

Considerando o non un sistema di accumulo di energia (ESS) per raccogliere energia dissipata durante la frenata, l'integrazione della potenza di trazione dovrebbe essere applicata proprio sulla parte positiva del diagramma, esattamente prima che il veicolo inizi a frenare quando l'accelerazione diventa negativa.

La parte di energia recuperata nei veicoli equipaggiati da ESS durante la frenata, può essere calcolata moltiplicando la potenza di trazione dissipata (parte negativa del diagramma di potenza) per efficienza di carica (η_{charge}) e tempo richiesto per la ricarica completa di ESS. A causa del flusso di energia all'indietro

dalle resistenze di frenatura al dispositivo di accumulo dell'energia, la potenza di trazione durante la frenata ($v \cdot F_T^-$), si moltiplica per l'efficienza di carica invece di dividersi per essa. L'efficienza di carica è la moltiplicazione dell'efficienza dei componenti da cui è stata trasferita l'energia dissipata.

$$\eta_{charge} = \eta_{axle\ gear} \times \eta_{motor} \times \eta_{inverter} \times \eta_{ESS}$$

$$\eta_{ESS} = \eta_{chopp} \times \eta_{Capacitor}$$

Se la potenza di trazione durante la frenata è superiore alla capacità massima di ESS, la potenza aggiuntiva verrà dissipata dalle resistenze di frenatura. Supponendo che lo stato di piena carica e lo stato di piena scarica del dispositivo ad ogni suo coinvolgimento, equazione E per il veicolo ferroviario urbano con ESS, cambi alla seguente equazione.

$$P_{in} = P_{Tin} + P_A - P_{ESS}$$

$$E_{maxESS} = \eta_{charge} \cdot v \cdot F_T^- \cdot \Delta t_{charg}$$

$$E = \int P_T dt + P_A t - E_{maxESS}$$

Come si può notare, questo metodo richiede una conoscenza molto dettagliata dell'accelerazione, velocità e posizione istantanea del treno, della morfologia di linea (gradienti e curve) e delle funzionalità dei componenti di trazione. Tuttavia, prendendo in considerazione alcune ipotesi come l'accelerazione e la decelerazione costanti, e alcune approssimazioni come il valore di efficienza dei componenti e la quantità di coefficienti pertinenti, è possibile semplificare il metodo.

Strumenti di simulazione

A causa dei problemi di raccolta dei dati di modelli matematici tra cui difficoltà, precisione, tempo impiegato, disponibilità di dispositivi adattati e vari settori amministrativi di un sistema ferroviario, gli strumenti di simulazione sono le modalità più efficienti e utilizzate per stimare il consumo di energia. Uno degli strumenti ben calibrati e affidabili è il progetto OPEUS. OPEUS "Modelling and strategies for the assessment and OPTimisation of Energy USage aspects of rail innovation", mira a sviluppare una metodologia di simulazione e uno strumento di modellizzazione di accompagnamento per valutare, migliorare e ottimizzare il consumo di energia dei sistemi ferroviari, con particolare attenzione all'innovazione a bordo [5]. Il consorzio OPEUS è composto da due importanti partner accademici (Newcastle University e Rostock University), un produttore di veicoli ferroviari (Stadler Rail Valencia), un fornitore leader di sistemi di accumulo di energia (SAFT Technologies) e due associazioni (UITP e UIC) che rappresentano un mix di imprese ferroviarie, gestori dell'infrastruttura, autorità locali e operatori dei trasporti pubblici [6].

Lo strumento di simulazione OPEUS si basa su MATLAB e SIMULINK di Mathworks con interfacce utente opzionali in Microsoft Excel. L'obiettivo principale dello strumento di simulazione è il calcolo del consumo di energia per vari veicoli ferroviari azionati elettricamente e i loro componenti, nonché il calcolo del profilo di velocità basato su profili di binari definiti [7].

Il grafico in Figura 21 illustra gli input richiesti e gli output risultanti dello strumento di simulazione.

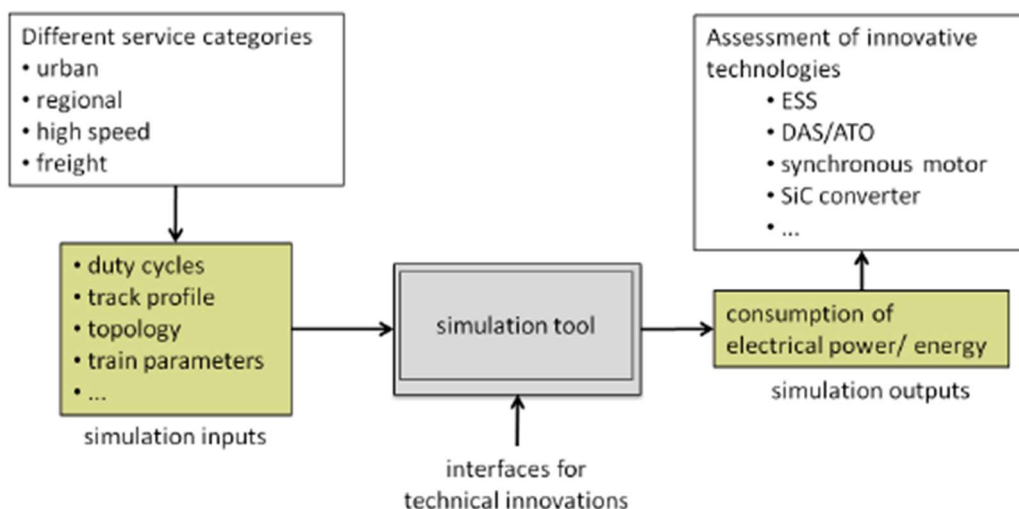


Figura 21. Strumento di simulazione – Overview (Fonte: OPEUS_D01.2, 2017).

I risultati dell'output sono composti dal consumo di energia e dalla perdita di energia nei componenti di trazione che sono essenziali per studiare le innovazioni tecniche come DAS ed ESS. L'utente oltre a selezionare le caratteristiche del veicolo e dell'infrastruttura, la velocità del profilo e la tabella oraria nell'input di simulazione, è in grado di applicare la modalità stagionale per caratterizzare il consumo ausiliario, lo spegnimento parziale dei componenti di trazione e il tipo di batteria a bordo per caratterizzare ESS.

2.3 Applicazione a un caso di studio

Al fine di testarne la fruibilità all'interno della piattaforma di calcolo dei consumi energetici urbani, il modello cinematico viene applicato a scopo dimostrativo su una linea della rete tranviaria della città di Roma: la linea 8, avente un'estensione di circa 5.45 km, che collega il quartiere di Monteverde (Casaletto), in posizione collinare, con il Centro storico (piazza di Torre Argentina).

Le caratteristiche principali della linea sono riassunte nella Tabella 2:

Tabella 2. Caratteristiche della linea

Apertura della linea	23/03/1998
Terminali	Casaletto - piazza Venezia
Orari di funzionamento	da domenica a giovedì 5:10 - 24:00, da venerdì a sabato 5:10 - 3:00
Corse giornaliere	450 partenze, ogni 5 minuti
Lunghezza della linea	5450 m
Fermate totali	15 per direzione
Velocità commerciale	12 km / h
Veicoli in servizio	18
Tipo di tram	Fiat Alstom Roma2
Passeggeri x Km / anno offerti sulla linea	270 milioni

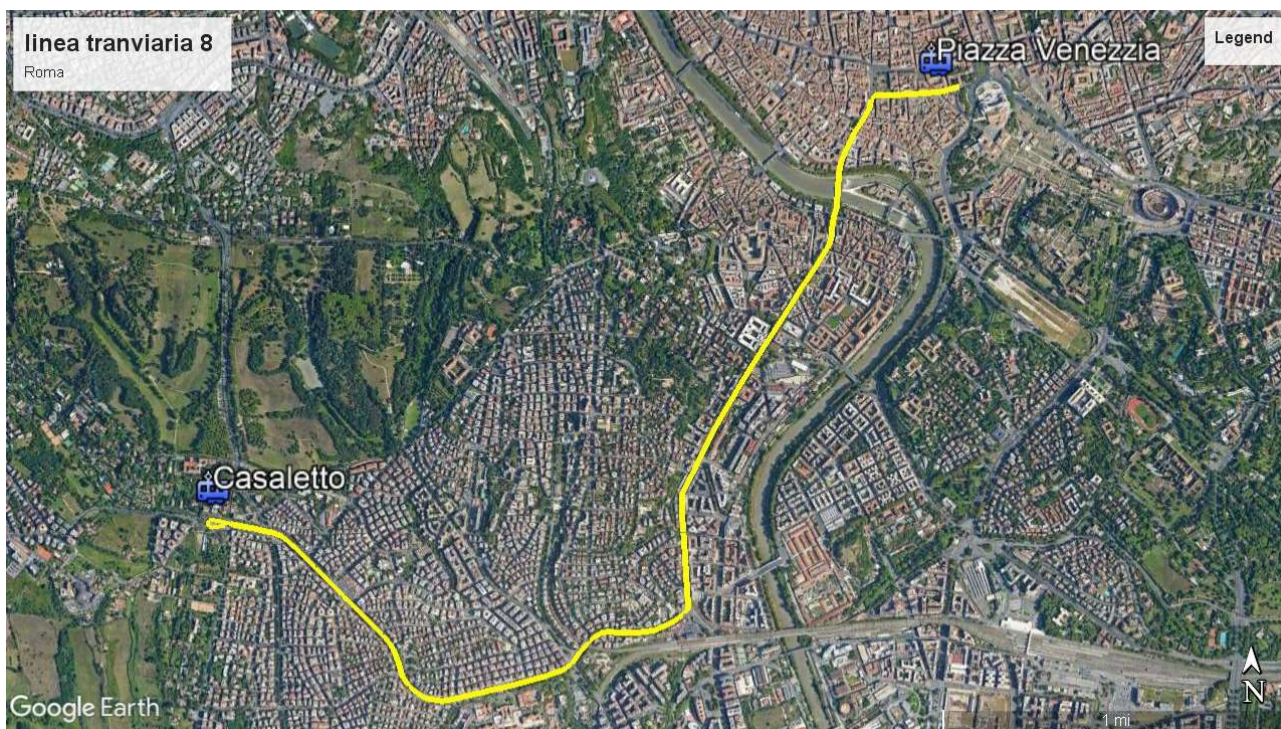


Figura 22. Percorso della linea tranviaria 8.

La linea è esercita con vetture articolate di massa in servizio pari a 56t e lunghezza 33m, dotate di 4 motori alimentati da linea aerea con tensione 600V a corrente continua. Le caratteristiche principali delle vetture sono sintetizzate nella Tabella 3.

Tabella 3. Caratteristiche delle vetture

Grandezza	Misura
Lunghezza	33000 mm
Larghezza	2 400 mm
Altezza	3 500 mm
Capacità	56 posti a sedere; 184 posti in piedi
Quota del piano di calpestio	350 mm
Scartamento	1 445 mm
Interperno	8 450 mm
Passo dei carrelli	1 750 mm
Massa in servizio	56 t
Massa a vuoto	39 t
Rodiggio	2' Bo' Bo' 2'
Diametro ruote motrici	680 mm
Diametro ruote portanti	680 mm
Potenza continuativa	712 kW
Velocità massima omologata	70 km/h
Alimentazione elettrica da linea aerea	600 V CC
Tipo di motore	n. 4

Il modello cinematico utilizza la traiettoria del treno per calcolare la potenza alla ruota e, successivamente, la potenza assorbita alla catenaria e, infine, il consumo totale di energia.

La traiettoria del treno è definita dai diagrammi di accelerazione (a), velocità (v) e distanza percorsa (x) nel tempo.

I consumi energetici vengono quindi calcolati utilizzando la seconda legge di Newton, imponendo che la trazione eguagli le resistenze al moto e l'accelerazione del convoglio:

$$F_T = ma + F_R$$

dove F_T è la forza di trazione e F_R è la resistenza al moto.

Il modello calcola le diverse componenti delle resistenze applicando le relazioni riportate in Tabella 4.

Tabella 4. Definizione delle componenti della funzione di resistenza al moto

Resistenza	Funzione
Resistenza aerodinamica	$F_a = 0.5 \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$
Resistenza al rotolamento	$F_r = f \cdot m \cdot g$
Resistenza dovuta alla pendenza	$F_g = mg \sin \alpha$
Resistenza in curva	$F_c = 0.04 F_g \cdot D$

Secondo le equazioni precedenti, la forza di trazione viene calcolata tramite seguente equazione.

$$F_T = ma + F_a + F_r + F_g + F_c$$

La Tabella 5 specifica tutte le variabili necessarie per calcolare il consumo energetico finale dei servizi di trasporto urbano su ferro con questo modello.

Tabella 5. Definizione dei coefficienti del modello cinematico per il calcolo del consumo di energia

Variabile	Descrizione	UdM
E	Consumo energetico	[Wh]
P_{in}	Potenza input o potenza nella catenaria	W
P_{out}	Potenza output o potenza alle ruote	W
F_T	Forza di trazione	[N]
F_R	Resistenza alla guida totale	[N]
m	Massa del veicolo (carico) = m_t (massa di tara) + m_l (carico di merci o passeggeri)	[kg]
a	Accelerazione	[m/s ²]
v	Velocità del veicolo	[m/s]
W	Peso totale del veicolo (carico)	[t]
n	Numero di assi	
f	Coefficiente di attrito tra rotaia e ruota che varia tra 0,001 e 0,01	
K	Coefficiente di massa per resistenza aerodinamica	
C_d	Coefficiente di resistenza aerodinamica	
α	Angolo della livelletta (in gradienti)	
G	Pendenza in percentuale (positivo in salita e negativo in discesa)	[%]
η	Efficienza dei componenti di trazione	
I_A	Corrente assorbita dai componenti del sistema ausiliario	[A]
V	Tensione della linea aerea	[V]
η_{charge}	Efficienza della ricarica del sistema di accumulo dell'energia (ESS)	
E_{maxESS}	Capacità massima del sistema di accumulo dell'energia ESS	[Wh]
Δt_{charge}	Tempo richiesto per la ricarica completa dell'ESS	[s]
t	Tempo di funzionamento	[s]
A	Area della sezione frontale del veicolo	[m ²]
D	Raggio di curva	[m]
ρ	Densità dell'aria (1,225)	kg/m ³
g	Accelerazione di gravità (9,82)	m/s ²

Utilizzando i valori dei coefficienti suggeriti da AREMA [4] si ottiene la seguente formula, valida per il maggior numero di treni per stimare la resistenza al moto totale.

$$F_R = 2.67W + 88.96n + 9.95fWv + 22.26Kv^2 + 88.96WG$$

L'applicazione del modello alla linea 8 del tram fornisce i risultati rappresentati nelle figure seguenti. Nel calcolo si è assunto che i veicoli percorrano binari in piano con coefficiente di attrito = 0,01, coefficiente di massa = 0,3 e massa in servizio pari a 56 tonnellate.

Il grafico velocità-tempo rappresentato nella Figura 23 è relativo al percorso del tram in direzione da Piazza Venezia a Casaletto. In fase di accelerazione, il veicolo applica un'accelerazione di 1 m/s^2 e la riduce gradualmente fino a zero, proseguendo a velocità costante. In corrispondenza di un incrocio o di una fermata, il veicolo applica una decelerazione costante pari a $-1,2 \text{ m/s}^2$.

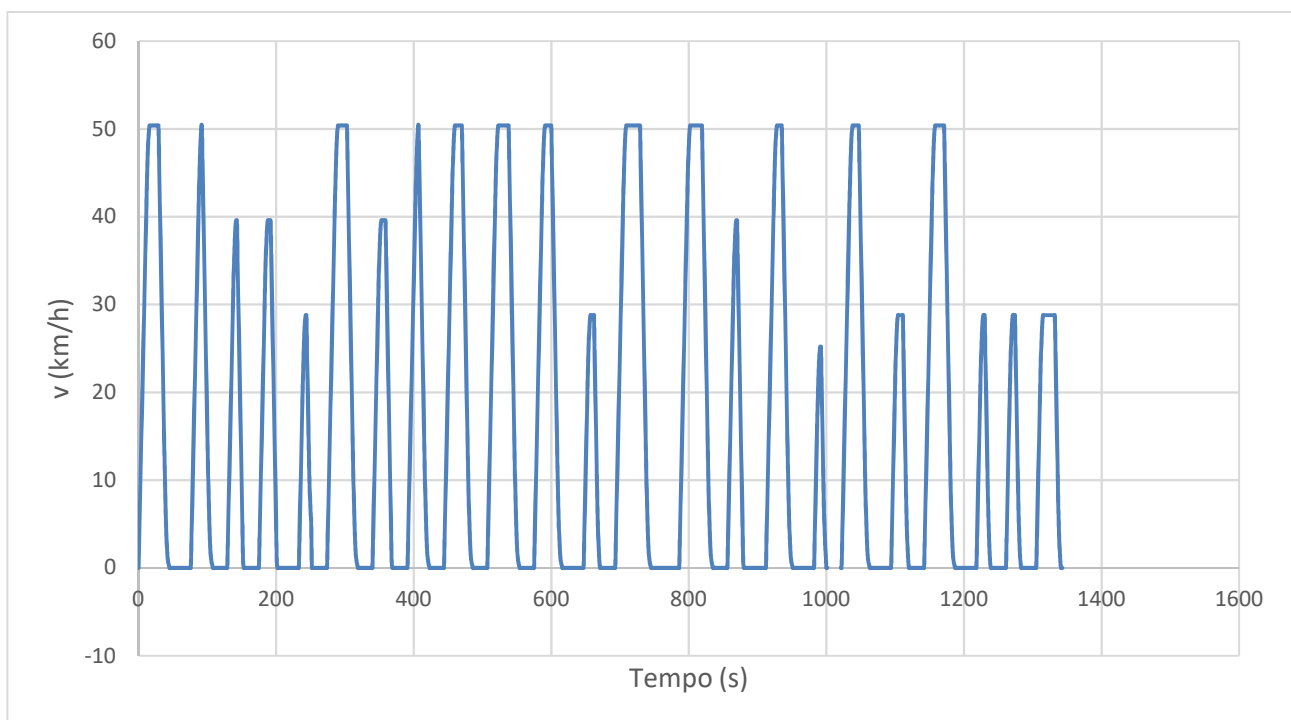


Figura 23. Diagramma di velocità di una vettura tranviaria della linea 8 (direzione Casaletto).
Note: La vettura percorre un anello di svolta di 200 m al capolinea Casaletto alla fine del suo percorso.

Il tempo percorso (22.4 minuti) viene calcolato sommando la durata dei tempi di ciascuna sezione, cui vengono aggiunti più 20s di tempo di sosta alle fermate e 30s di sosta alle intersezioni.

Integrando numericamente si ottiene il diagramma di marcia riportato in Figura 24.

Il consumo totale di trazione è dato alla somma dei consumi energetici corrispondenti ad ogni accelerazione e frenata del veicolo (illustrati in Figura 27), pari a 29.64 kWh, ovvero 106.71 MJ.

Assumendo che l'efficienza di trazione sia pari all'80%, si calcola l'energia in ingresso per ciascuna corsa, pari a 37.05 kWh.

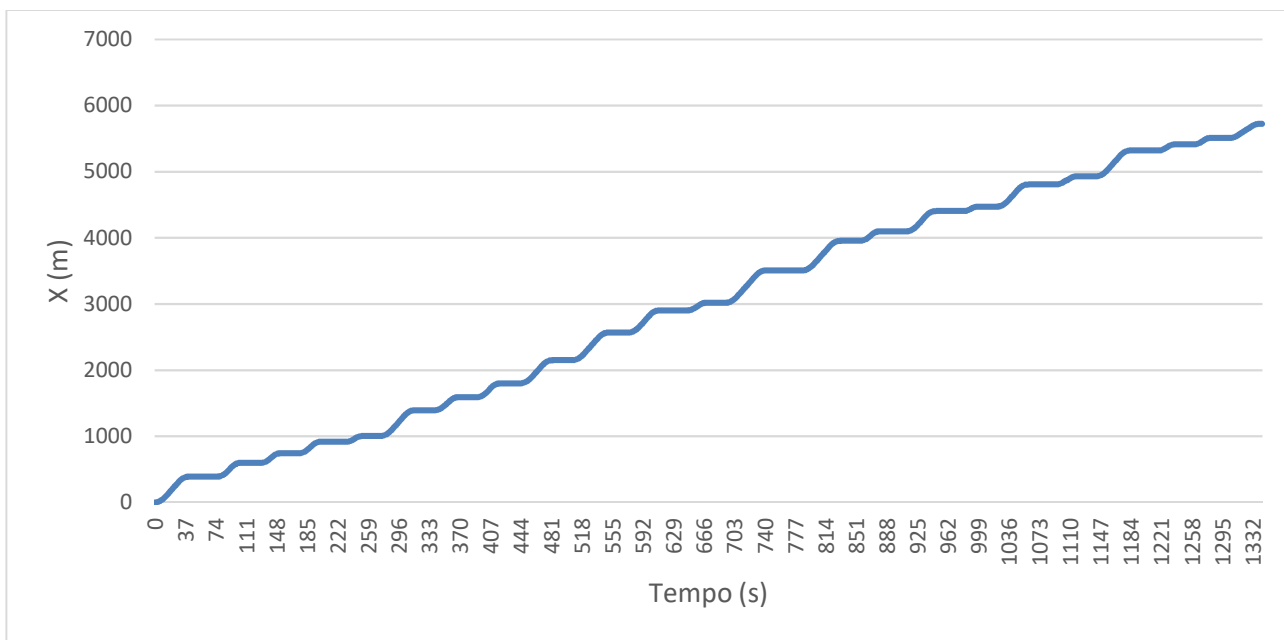


Figura 24. Diagramma di marcia di una vettura tranviaria della linea 8 (direzione Casaletto).

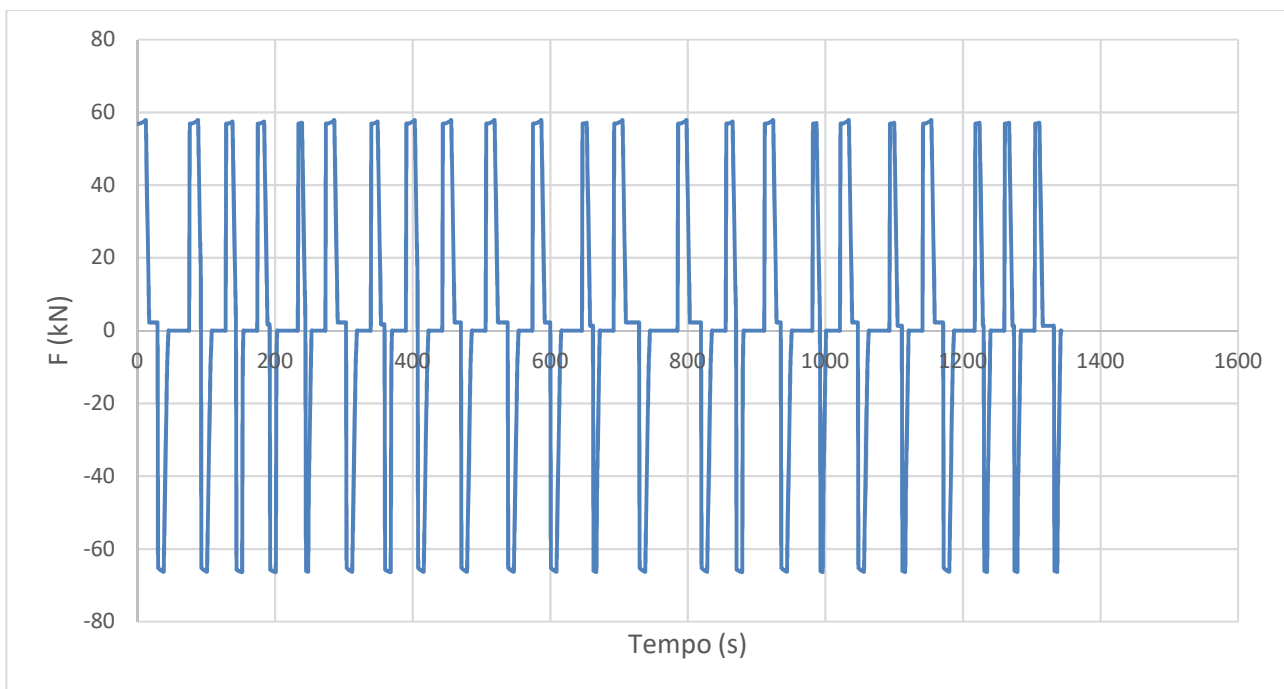


Figura 25. Diagramma di trazione di una vettura tranviaria della linea 8 (direzione Casaletto).

Note: Il maggior consumo di energia avviene durante la fase di accelerazione e questi picchi sono la ragione principale del sovraccarico a breve termine delle stazioni di rettifica.

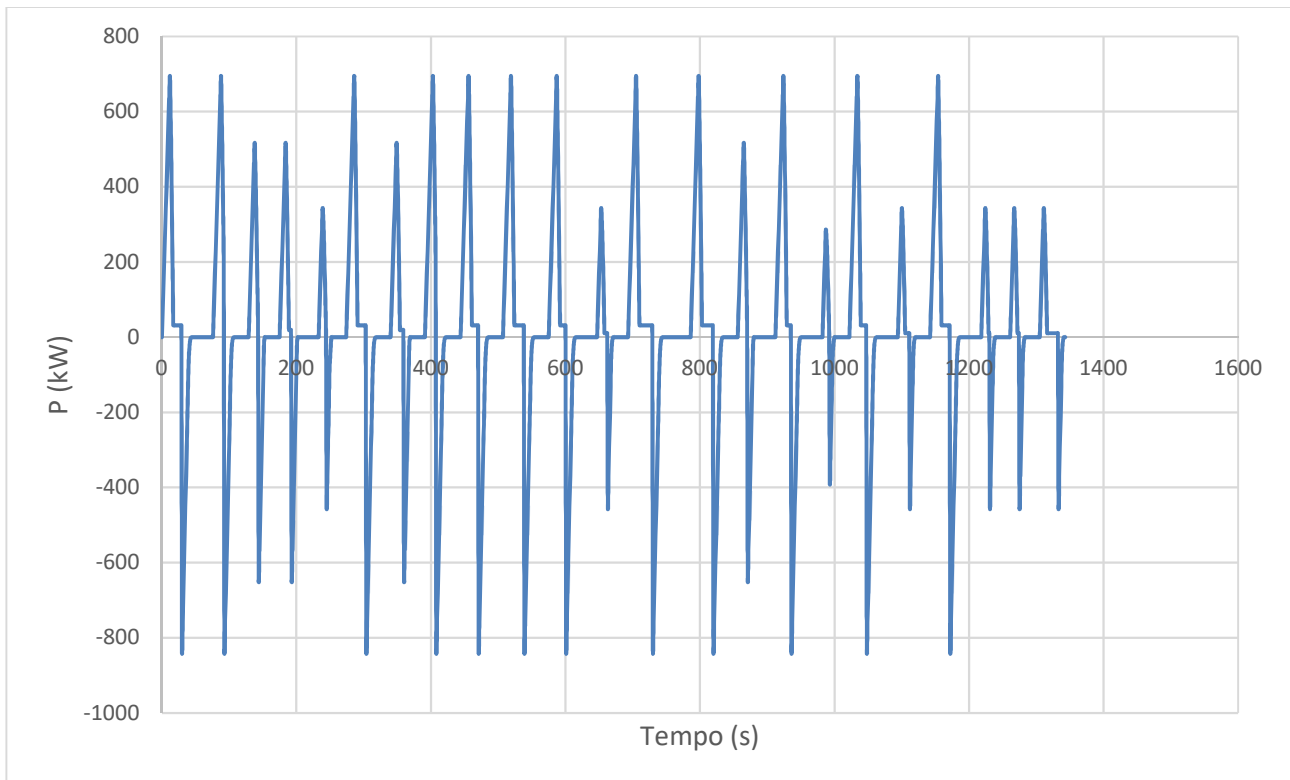


Figura 26. Diagramma di potenza di una vettura tranviaria della linea 8 (direzione Casaletto).
Note: Il diagramma è risultato dalla moltiplicazione della velocità istantanea (Figura 23) per la forza di trazione corrispondente (Figura 25).

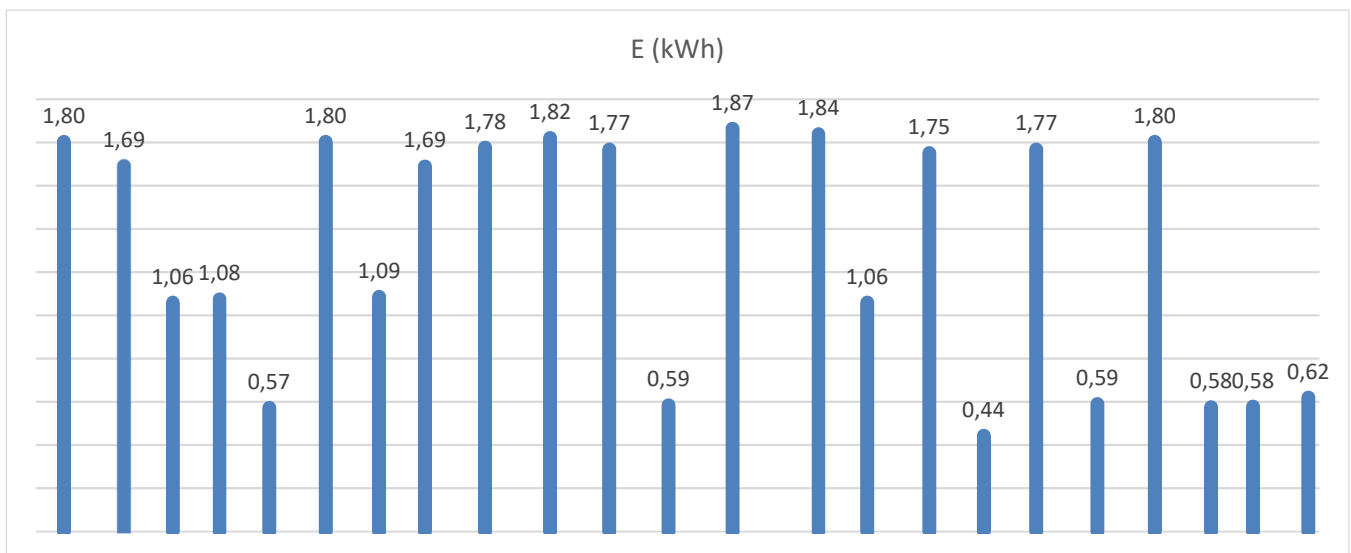


Figura 27. Diagramma di consumi corrispondente ad ogni accelerazione di una vettura tranviaria della linea 8 (direzione Casaletto).

3 Conclusioni

Il presente rapporto tecnico ha fornito un inquadramento delle problematiche ambientali e dei metodi per la stima dei consumi energetici dei sistemi di trasporto pubblico in ferrovia. L'analisi dello stato dell'arte si è concentrato in particolare sul metodo della potenza elettrica e sul metodo cinematico e sui metodi di simulazione per la loro implementazione.

Il modello di calcolo dei consumi prescelto è il metodo cinematico, che utilizza la traiettoria del treno per calcolare la potenza alla ruota e, conseguentemente, la potenza assorbita alla catenaria e il consumo totale di energia. La traiettoria del treno include i diagrammi di accelerazione, velocità e distanza percorsa rispetto al tempo. Applicando la seconda legge di Newton, il modello determina la forza di trazione richiesta ai motori di trazione per superare le resistenze di guida e imporre le accelerazioni richieste al veicolo nel suo diagramma di marcia. Moltiplicando l'integrale delle forze per le velocità si ottiene la potenza di trazione.

Nel rapporto tecnico sono quindi definite le variabili di input e di output e sono stati determinati i valori delle costanti e dei coefficienti necessari per l'applicazione del modello.

Al fine di testarne la fruibilità all'interno della piattaforma di calcolo dei consumi energetici urbani, il modello cinematico è stato applicato a scopo dimostrativo su una linea della rete tranviaria della città di Roma: la linea 8, avente un'estensione di circa 5.45 km, che collega il quartiere di Monteverde (Casaletto), in posizione collinare, con il Centro storico (piazza di Torre Argentina).

Il consumo totale di trazione per percorrere una singola tratta della linea, calcolato mediante integrazione dei consumi energetici corrispondenti ad ogni fase di accelerazione e decelerazione del veicolo è pari a 29,64 kWh, ovvero 106,71 MJ. Stimando che l'efficienza di trazione è pari all'80%, l'energia in ingresso per ciascuna corsa è pari a 37,05 kWh, ovvero 133.39 MJ.

Noto il programma di esercizio della linea, comprendente 450 corse, è immediato il calcolo del consumo giornaliero di energia per la linea.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] Wardrop, A. "MTRAIN User's Manual". Version 89A, State Rail. New South Wales, 1989, Australia.
- [2] Edstrand, J. "Calculation method for powering a tramway network". Master of science thesis, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2012, Göteborg, Sweden.
- [3] MIGLIORINI, C. RICCI, S. TOMBESI, E "Analisi e valutazione delle strategie di guida ecologica dei treni per la formazione del personale di condotta", INGEGNERIA FERROVIARIA, Vol 10, pp. 727-760, 2017.
- [4] The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA), Practical guide to railway engineering," <http://www.arema.org/publications/pgre/>.
- [5] L. Pröhl, "OPEUS Deliverable DO1.1 - OPEUS simulation methodology, "EU-project OPEUS (S2R-OC-CCA-02-2015), 2017.
- [6] OPEUS Project <http://opeus-project.eu/>
- [7] L. Pröhl, "OPEUS Deliverable DO2.1 - OPEUS simulation methodology, "EU-project OPEUS (S2R-OC-CCA-02-2015), 2017.

5 Appendice

Gaetano Fusco è professore associato di Trasporti presso l'Università di Roma "La Sapienza", dove insegna *Traffic Engineering and Intelligent Transportation Systems*. Dal 1992 al 2005 è stato ricercatore presso la stessa Università. Nel 2014 ha conseguito l'abilitazione come professore ordinario.

È esperto tecnico-scientifico del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca e membro del Consiglio direttivo del Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL) dell'Università di Roma "La Sapienza". È coordinatore scientifico di numerosi progetti di ricerca finanziati da parte di società private ed enti pubblici e, in particolare, responsabile scientifico delle valutazioni di impatto sulle politiche dei trasporti della Commissione Europea, Direzione DG TREN, poi DG MOVE, svolte in un consorzio coordinato dalla società PricewaterhouseCoopers.

È autore di circa 100 pubblicazioni scientifiche sulla letteratura nazionale ed internazionale inerenti varie tematiche dei sistemi di trasporto, quali la progettazione delle reti di trasporto, la logistica e la pianificazione dei trasporti, la modellazione e la stima della domanda di trasporto, la teoria del deflusso veicolare, ma prevalentemente focalizzate sulle metodologie di applicazioni dei Sistemi di Trasporto Intelligenti, quali la regolazione semaforica, i sistemi di informazione all'utenza, la stima delle condizioni di traffico.

Stefano Ricci è Professore Ordinario di Trasporti all'Università di Roma La Sapienza, dove insegna *Railway Transport; Maritime Transport e Tecnica ed economia dei trasporti*. È Presidente del Consiglio d'Area Didattica dell'Ingegneria dei Trasporti, Direttore del Master di Secondo Livello in Ingegneria delle Infrastrutture e dei Sistemi Ferroviari e Direttore della rivista scientifica "Ingegneria Ferroviaria". Svolge attività di ricerca nell'ambito dei progetti finanziati dalla Comunità Europea (DG TREN, Research e INFSO) e nazionali nel settore trasporti. Le sue aree di specializzazione sono: pianificazione dei trasporti, esercizio e sicurezza ferroviaria, valutazione ambientale del sistema dei trasporti, esercizio del trasporto pubblico, trasporto marittimo e intermodale. Ha di recente collaborato nei seguenti progetti europei: AEROTRAIN, ASSETS4RAIL, CAPACITY4RAIL, CLEANER-DRIVE, DYNOTRAIN, ECORAILS, ELEDRIE, EURNEX, HEROE, INWAPO, IN2RAIL, NEAR2, OPTIYARD, PANTOTRAIN, RACAM, RIFLE, RUN2RAIL, SELCAT, SESAMO, TILEMATT, UTOPIA, VITE. È autore di oltre 190 pubblicazioni scientifiche.

Chiara Colombaroni è Ricercatore e Professore aggregato di Trasporti all'Università di Roma La Sapienza, dove insegna *Programming for Transport Systems*. Nella medesima Università, ha conseguito la Laurea in Ingegneria dei trasporti nel 2003, la Laurea Magistrale in Ingegneria dei sistemi di trasporti nel 2006 e il dottorato di ricerca in Infrastrutture e Trasporti nel 2011. Nel 2013 è stata Ricercatore e Professore aggregato presso l'Università Niccolò Cusano di Roma, dove ha insegnato *Tecnica ed Economia dei Trasporti e Tecnologie per il Trasporto Sostenibile*.

Le sue attività di ricerca sono rivolte alla pianificazione dei trasporti e alla modellazione dei trasporti, in particolare la teoria del deflusso veicolare, i modelli comportamentali di guida, i sistemi di controllo del traffico, la progettazione di rete, la sicurezza stradale, l'ottimizzazione del posizionamento dei container nei terminal intermodali, l'uso dei Big data in mobilità.

Filippo Carrese è ingegnere dei trasporti e dottorando di ricerca in Infrastrutture e trasporti presso l'Università di Roma La Sapienza. La sua attività di ricerca verte sulle applicazioni del concetto di accessibilità nei sistemi di trasporto, sia in relazione alla mobilità dei passeggeri che alla distribuzione delle merci.

Mohammad Vajihi è Ricercatore e Dottorando di ricerca all'ultimo anno del corso di dottorato in Infrastrutture e Trasporti presso l'Università di Roma La Sapienza. Ha conseguito la Laurea in Ingegneria Civile nel 2014 all'Università degli Studi Roma Tre e la Laurea Magistrale in Ingegneria dei sistemi di trasporti nel 2017 all'Università di Roma La Sapienza. Le sue attività di ricerca sono rivolte alle strategie per lo sviluppo sostenibile nei sistemi ferroviari urbani, con particolare riguardo all'efficienza energetica nel

sistema tramviaria, alla generazione di energia da fonti rinnovabili, all'eco-driving e all'uso della ferrovia per la distribuzione di merci urbane.

Ha collaborato con il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti per indagare gli effetti dell'applicazione di metodologie di definizione dei requisiti di sicurezza, applicati a casi reali nelle città italiane. Ha condotto presso l'Università TU Berlin una ricerca metodologica sul trasporto ferroviario ad alta efficienza energetica nel sistema ferroviario urbano a Berlino, e ha in programma lo svolgimento di attività di ricerca sul comportamento umano e l'analisi dello stile di guida presso il Digital Rail Traffic Lab di TU Delft, Olanda.