



Elettrificazione del trasporto pubblico locale: valutazione e risultati per il caso dell'Aquila

Lo studio dimostra la fattibilità tecnico-economica dell'elettrificazione di alcune linee del servizio di Trasporto Pubblico Locale dell'Aquila, progetto ambizioso e dai risvolti ambientali ed economico-sociali interessanti, e traccia un efficace percorso valutativo di ausilio alle aziende di trasporto pubblico interessate all'introduzione di flotte a trazione elettrica

DOI 10.12910/EAI2015-056

■ V. Fabrizi, S. Orchi, F. Orteni, G. Valenti, M.P. Valentini

L'elettrificazione del parco veicoli (e-Mobility) è oggi considerata come una valida opzione per affrontare le difficili sfide poste per la mobilità sostenibile. Gran parte della spinta verso l'e-Mobility è in questo momento dettata dall'esigenza di decarbonizzare il trasporto stradale, attualmente responsabile in Italia di circa il 28% delle emissioni complessive di CO₂ legate agli usi finali di energia, e di ridurre la dipendenza dai prodotti petroliferi con il contestuale sviluppo delle energie rinnovabili.

Questo processo di trasformazione non è limitato solo ai veicoli privati ma riguarda anche gli autobus del servizio di Trasporto Pubblico Locale (TPL), che rappresenta la principale alternativa disponibile per risolvere la criticità della mobilità urbana.

Il passaggio dal bus convenzionale ad uno elettrico non è immediato, soprattutto se le aziende del TPL non sono coinvolte attivamente nel

processo di cambiamento e se non sono assistite nel valutare i vantaggi di queste nuove tecnologie.

Le difficoltà economiche in cui versano oggi gran parte delle aziende italiane del TPL non consentono gli investimenti necessari per un rinnovo del parco circolante, tra i più vecchi in Europa. Naturalmente questo problema si presenta con maggiore forza nel processo di elettrificazione del servizio che necessita da un lato di un maggiore investimento iniziale, per la realizzazione delle infrastrutture di ricarica e per la copertura dell'extra costo dei veicoli stessi, dall'altro di un'adeguata integrazione tecnologica ed organizzativa.

In un periodo come questo è quanto mai indispensabile disporre di elementi sufficienti a definire un quadro completo e oggettivo sulle diverse scelte tecnologiche ed, inoltre, di convincenti analisi costi/benefici per valutare la convenienza delle diverse ipotesi di realizzazione.

L'articolo si propone pertanto di esaminare la fattibilità tecnico-economica del passaggio dalla trazione convenzionale a quella elettrica in un caso molto concreto, quello di due linee di trasporto pubblico nella città dell'Aquila, con l'obiettivo più generale di supportare i processi decisionali delle aziende di TPL nella scelta e valutazione tra soluzioni alternative e in uno scenario di medio-lungo termine di graduale elettrificazione del trasporto. Lo studio è stato svolto nell'ambito del Progetto di Ricerca di Sistema Elettrico promosso dal Ministero dello Sviluppo Economico, Accordo di Programma ENEA-MISE, Piano Annuale di Realizzazione 2013/14, Progetto C.4 - Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità.

Contact person: Maria Pia Valentini
mariapia.valentini@enea.it



FIGURA 1 I veicoli a confronto nello studio: (a sinistra) un Cacciamalesi TCC635L in servizio all'Aquila, (a destra) il minibus Gulliver Tecnobus operativo nel Centro Ricerche ENEA Casaccia

L'attività descritta fa seguito a un precedente studio, focalizzato su due diversi sottoinsiemi della rete di trasporto pubblico di Roma¹, in cui si dimostrava che, sull'intero arco della vita utile dei mezzi, considerando anche i benefici ambientali conseguenti, l'elettrificazione di una rete di traspor-

to pubblico è economicamente conveniente, specie sfruttando le opportunità offerte dai sistemi di ricarica rapida, grazie alle quali è possibile ridurre i costi complessivi di investimento (come somma dei costi di acquisto dei veicoli elettrici e di installazione dei sistemi di ricarica ai capolinea o

alle fermate). In quella fase, erano stati utilizzati valori di consumi specifico dei mezzi desunti da letteratura, senza approfondire le reali condizioni di operatività dei veicoli. Il caso di applicazione in esame, invece, ha previsto una consistente quota di attività dedicata a questo importante aspetto.

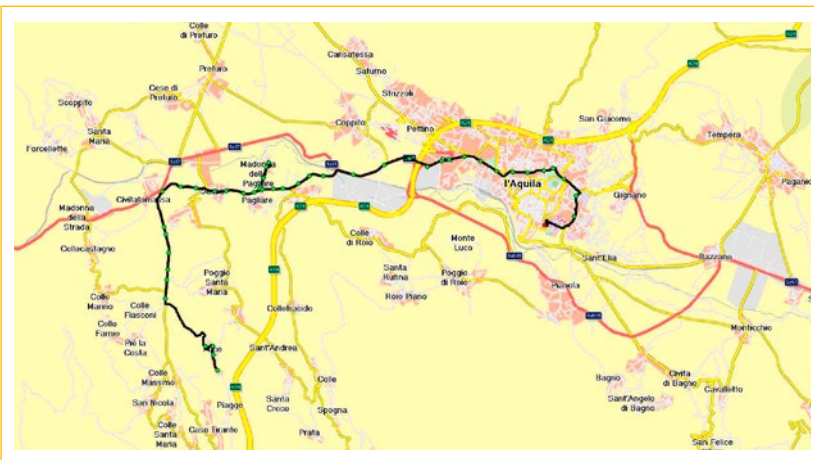


FIGURA 2 Percorso della linea "12 A" dell'Azienda Mobilità Aquilana dell'Aquila



FIGURA 3 Percorso della linea "10" dell'Azienda Mobilità Aquilana dell'Aquila

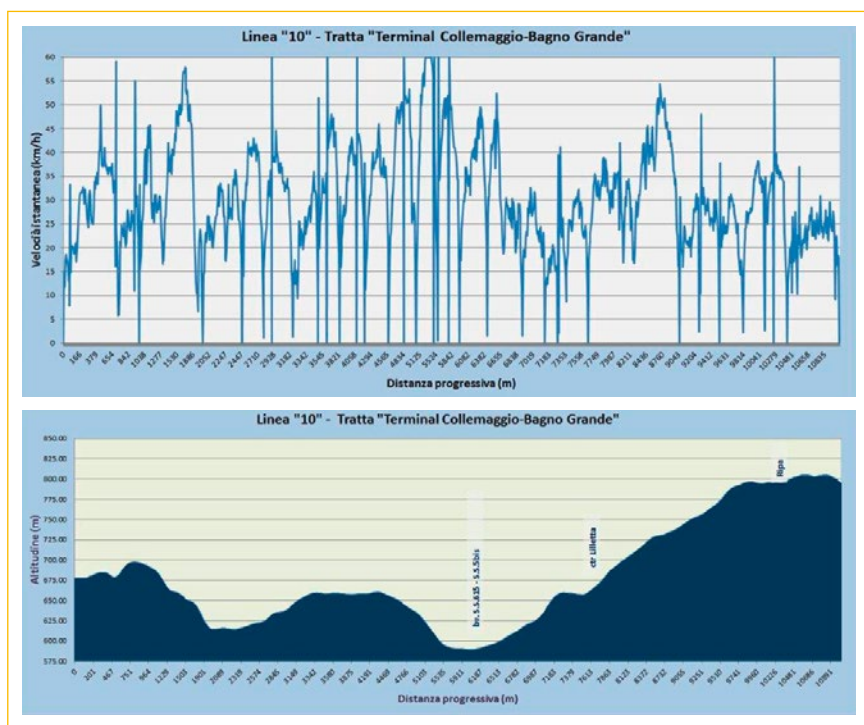


FIGURA 4 Sopra: parametri cinematici del percorso di andata della linea “10”: velocità istantanea. Sotto: parametri cinematici del percorso di andata della linea “10”: altitudine

Come caso di studio sono state selezionate alcune linee del servizio di trasporto pubblico nel Comune dell’Aquila, la cui Amministrazione ha aderito all’implementazione di progetti dimostrativi di Smart Cities, all’interno dei quali rientrano iniziative di elettrificazione del trasporto su strada e, congiuntamente, di diffusione di sistemi ICT applicati ai trasporti, per una gestione ottimizzata e più efficiente dell’offerta. Le linee di trasporto pubblico su cui effettuare l’analisi di elettrificazione sono state individuate sulla base della dimensione dei mezzi attualmente utilizzati dall’Azienda Mobilità Aquilana (AMA) dell’Aquila per effettuare il servizio: sono state

infatti selezionate due linee a bassa frequentazione servite da veicoli di ridotte dimensioni (Cacciamali TC-C635L), così da poter sfruttare dati relativi a precedenti rilevazioni sul minibus Gulliver della Tecnobus in dotazione al Centro Ricerche ENEA Casaccia (Figura 1).

Le due linee collegano il Terminal di Collemaggio, adiacente al centro storico dell’Aquila, con le frazioni Foce di Sassa alla periferia ovest (linea “12A”) con un percorso di circa 11 km (Figura 2), e Bagno Grande alla periferia sud-est (linea “10”) con un percorso di circa 22 km (Figura 3).

Tali percorsi si completano con le tratte di trasferimento del veicolo dal deposito aziendale ai capolinea,

e viceversa, previsti ad ogni inizio e fine turno del personale di guida.

Il nuovo caso di studio, molto differente da quello esaminato l’anno precedente per condizioni di esercizio e tipologia di veicoli utilizzati, ha dato modo di estendere le verifiche di fattibilità dell’elettrificazione ad altri contesti che non linee in servizio prettamente urbano.

La metodologia di analisi ha previsto il confronto fra i dati di consumo acquisiti durante una campagna di rilevamento nelle reali condizioni di esercizio del veicolo Cacciamali, appositamente effettuata all’Aquila con la fattiva e preziosa collaborazione dell’AMA, e i risultati delle simulazioni relative alle prestazioni del Gulliver Tecnobus nelle medesime condizioni di esercizio.

La campagna di rilevamento, basata su misure di posizione geografica e velocità istantanea, e le successive operazioni di filtraggio e *smoothing* delle serie dei dati di posizione e velocità fornite dal ricevitore GPS, hanno permesso la definizione e caratterizzazione dei profili di marcia ed dei profili altimetrici di ciascuna tratta (vedi Figura 4, a titolo esemplificativo). I dati tecnici dei minibus, le informazioni sul numero di passeggeri trasportati ed il set di profili costituiscono gli input fondamentali e strutturali del modello di simulazione dinamica finalizzato alla stima del fabbisogno energetico del minibus elettrico nelle reali condizioni di esercizio ed alla verifica della compatibilità delle prestazioni del veicolo in termini sia di potenza impegnata che di energia elettrica resa disponibile dalle batterie con le caratteristiche del servizio.

Le simulazioni della trazione in elettrico sono state rese possibili grazie

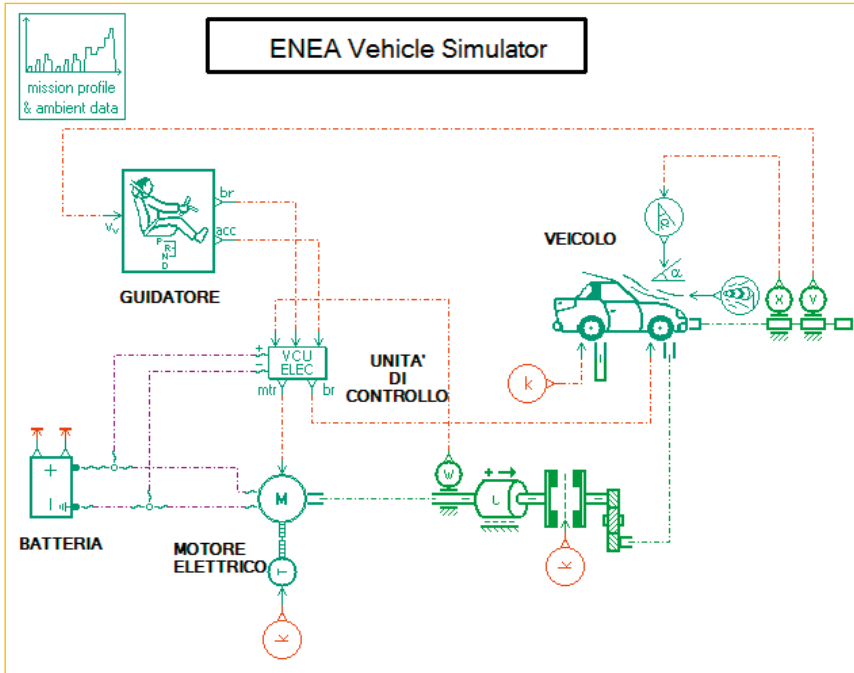


FIGURA 5 Schema funzionale del modello di simulazione

alla messa a punto di un software *ad-hoc*, calibrato utilizzando i dati della campagna sperimentale realizzata in passato nel Centro Ricerche ENEA Casaccia con il Gulliver Tecnobus.

Il modello di simulazione del bus è stato interamente sviluppato da ENEA in ambiente Simulink, secondo lo schema funzionale riportato in Figura 5.

Si tratta di un modello di simulazione con approccio di tipo “zero-dimensionale” in grado di calcolare il consumo energetico a partire dai dati tecnici dell’autobus e dall’effettivo ciclo di marcia realizzato dall’autobus durante il servizio di linea [1],[2],[3].

La simulazione comincia con l’inizializzazione del ciclo di marcia

che il modello dovrà riprodurre. Tutti i dati sono in funzione del tempo e per ogni istante sono forniti i valori di velocità del veicolo, pendenza stradale, massa del veicolo (che può variare durante la missione a causa di salite e discese dei passeggeri), potenza degli organi ausiliari (che può variare durante la giornata, es. compressore per apertura e chiusura porte, impianto per l’aria condizionata ecc.). Tutti i parametri di input sono utilizzati per calcolare le resistenze al moto, il numero di giri del motore oltre che per simulare una ricarica durante il reale funzionamento del veicolo.

Per stimare il consumo energetico istantaneo ed integrale è necessario innanzitutto calcolare la forza

di trazione applicata alle ruote, necessaria al movimento del veicolo. Tale valore è somma di quattro diversi termini [3]: forza d’inerzia, resistenze di attrito dei pneumatici, resistenze aerodinamiche, pendenza stradale.

Una volta nota la potenza richiesta alle ruote per svolgere la missione, tale potenza è riportata alla trasmissione, poi al motore e infine alle batterie attraverso l’applicazione dei valori di rendimento nei diversi passaggi, caratteristici del veicolo. Il modello di calcolo [1] dei parametri in batteria ha come input la corrente assorbita o erogata e come uscita lo stato di carica, la tensione e la temperatura. La relazione fra lo stato di carica e la corrente erogata dipende dal tipo di batteria. Ad esempio, per le batterie tradizionali al piombo acido, quali quelle montate sul veicolo in dotazione all’ENEA ed utilizzato per la calibrazione del modello, la relazione non è lineare, come invece accade per le più recenti batterie agli ioni di litio.

Altro fattore che influenza la capacità delle batterie (e quindi l’autonomia del veicolo) è la temperatura esterna e nel simulatore è presente un algoritmo che modifica i valori di resistenze interne alla batteria al variare della temperatura esterna.

Il modello di calcolo restituisce, *step by step*, i valori di consumo energetico del veicolo elettrico, la potenza impegnata e lo stato di carica della batteria, rendendo possibile il dimensionamento del sistema di trazione necessario per il profilo di missione assegnato.

	Configurazione originale	Configurazione modificata
Tecnologia batteria	Piombo acido	LiFePO ₄
Capacità nominale	585 Ah	100 Ah
Tensione nominale di cella	2	3,2 V
Celle in serie	36	128
Celle in parallelo	1	1
Tensione nominale	72	409,6 V
Energia nominale	42,12	40,96 kWh
Potenza massima	24 kW	80 kW

TABELLA 1 Specifiche del Sistema di accumulo del Tecnobus Gulliver U520esp, nella configurazione originale e modificata

Scenario di base	Azienda	Collettività
Valore Attuale Netto (VAN)	€ 9.095	€ 3.473
Rapporto Beneficio/Costo (B/C)	1,05	1,02
Tasso Interno di Rendimento (TIR)	7,5%	4,3%

TABELLA 2 Indicatori di redditività dell'impiego del bus elettrico

Fonte: elaborazione ENEA su dati ENEA[4], Ministero Sviluppo Economico[5], AEEG[6], ASSTRA[7], Agenzia delle dogane[8], European Commission-DG Move[9], ISPRA[10]

I risultati delle simulazioni per il caso dell'Aquila hanno evidenziato che, per portare a compimento la missione assegnata, è necessario aumentare la potenza disponibile (fino a circa 80 kW) ma non la capacità del sistema di accumulo rispetto ai valori del Gulliver attualmente in commercio (Tabella 1); infatti, l'impiego di batterie agli ioni di litio comporta una riduzione di peso del veicolo e un maggiore recupero di energia in frenata.

Inoltre, per venire incontro agli elevati assorbimenti di energia dovuti ai particolari e impegnativi profili cinematici delle missioni analizzate, si deve prevedere la possibilità di ricaricare le batterie

ulteriori mezzi.

In sostanza, con i dovuti accorgimenti tecnologici e gestionali, si è dimostrata la possibilità tecnica di sostituire gli attuali veicoli ad alimentazione diesel con veicoli elettrici di analoghe prestazioni.

La fattibilità economica di tale sostituzione è stata verificata per due diversi soggetti interessati:

- l'Azienda di Trasporto, che si farebbe carico di notevoli oneri finanziari aggiuntivi nelle fasi di investimento rispetto all'acquisto di un nuovo veicolo convenzionale, beneficiando però di una sostanziale riduzione dei costi operativi durante la vita utile del mezzo;
- la collettività, in senso ampio,

durante le soste programmate nel corso del servizio giornaliero del veicolo, installando adeguati sistemi di erogazione di energia ad elevata potenza (50 kW); in alcuni casi è necessario anche prolungare leggermente i tempi di sosta o inserire nuove brevi soste ai capolinea (non oltre dieci minuti), senza che ciò, tuttavia, pregiudichi l'efficacia del servizio di trasporto o richieda l'impiego di

la quale dovrebbe sostenere anch'essa maggiori esborsi iniziali in conto capitale, a fronte di una riduzione sia delle spese correnti – più contenuta che per l'Azienda² – sia dei costi delle esternalità ambientali.

In entrambi i casi, l'analisi ha dato risultati positivi, evidenziando che nell'arco della vita utile del veicolo è più conveniente ricorrere alla trazione elettrica piuttosto che al motore diesel, nonostante la necessità di impiegare pacchi batteria di notevole potenza e di installare sistemi di ricarica rapida ad elevata intensità di corrente.

In Tabella 2 sono riportati i risultati delle analisi economiche, riferite alla sostituzione di un veicolo diesel con un veicolo elettrico potenziato in relazione alle esigenze del servizio all'Aquila e all'installazione di due sistemi di ricarica rapida in corrispondenza dei terminali della linea oggetto dello studio. Si sottolinea che nell'analisi si è ipotizzato un utilizzo dei sistemi di ricarica condiviso da più veicoli elettrici eventualmente impiegati anche su altre linee della rete del trasporto pubblico aquilano; più precisamente l'investimento è stato ripartito su cinque mezzi.

La redditività economica potrebbe addirittura migliorare in un possibile scenario di ulteriore aumento dei prezzi dell'energia; anche una riduzione degli attuali prezzi di listino dei veicoli, legata a una auspicabile diffusione sul mercato della trazione puramente elettrica, contribuirebbe a incrementare il rapporto fra benefici e costi.

Peraltro è consigliabile un impiego intensivo dei mezzi, al fine di garantire un rientro sufficientemente veloce degli investimenti iniziali che altrimenti potrebbe non verificarsi; per questo specifico aspetto i servizi di trasporto pubblico su percorsi periurbani offrono più opportunità rispetto a quelli realizzati in ambito strettamente urbano.

Conclusioni

Lo studio dimostra che l'introduzione di veicoli elettrici nei servizi di trasporto pubblico locale è fattibile sia sotto il profilo tecnico sia sotto il pro-

filo economico, anche in contesti particolarmente onerosi per le condizioni di esercizio dei veicoli in termini di percorrenze e profili plano-altimetrici. In particolare, la fattibilità tecnica in condizioni sfavorevoli è sostenuta dai recenti progressi nelle prestazioni sia delle batterie, che aumentano l'autonomia e la potenza dei veicoli, sia dei sistemi di ricarica, che consentono il rifornimento energetico in tempi sempre più brevi. Gli investimenti aggiuntivi per l'acquisto dei veicoli e per l'installazione delle stazioni di ricarica sono compensati nel corso della vita utile del veicolo dai risparmi sul costo dell'energia, che incidono più si-

gnificativamente proprio in condizioni di utilizzo intensivo dei veicoli. È tuttavia da osservare che l'introduzione di veicoli elettrici richiede alcune modifiche nell'esercizio dei veicoli stessi, *in primis* la necessità di effettuare la ricarica delle batterie durante le soste programmate ai capolinea; tali esigenze potrebbero comportare la variazione di alcuni termini contrattuali sulle mansioni dei dipendenti delle Aziende di Trasporto Pubblico.

Valentina Fabrizi, Silvia Orchi, Fernando Ortenzi, Gaetano Valenti, Maria Pia Valentini
 ENEA, Dipartimento Tecnologie Energetiche,
 Laboratorio sistemi e Tecnologie
 per la Mobilità e l'Accumulo

bibliografia

- [1] M Ceraolo (2000), "New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries", IEEE transactions on power systems 15-4
- [2] M Conte, A Genovese, F Ortenzi, F Vellucci, "Hybrid battery-supercapacitor storage for an electric forklift: a life-cycle cost assessment", *Journal of Applied Electrochemistry* (2014) 44:523-532
- [3] A Alessandrini, F Filippi, F Orecchini, F Ortenzi, "A new method for collecting vehicle behaviour in daily use for energy and environmental analysis", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, *Journal of Automobile Engineering*, November 1, 2011 225: 1518-1530
- [4] F. Vellucci, G. Pede, A. Mariani, F. D'Annibale (ENEA) - Ricerca di Sistema Elettrico, " Sviluppo e realizzazione di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive", Report RdS/2012/087 (2012).
- [5] <http://www.sviluppoeconomico.gov.it/index.php/it/cittadino-e-consumatori/prezzi/mercati-dei-carburanti>
- [6] <http://www.autorita.energia.it/it/elettricitadistr.htm>
- [7] Commissione ASSTRA costi standard automobilistici "Un modello di calcolo del costo standard per il trasporto pubblico locale e regionale automobilistico", Roma 3 luglio 2013
- [8] Agenzia delle Dogane, nota RU 68241 del 27/06/2014
- [9] "Update of the Handbook on External Costs of Transport" Final Report, Ricardo-AEA/R/ED57769, gennaio 2014
- [10] <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/dati-transporto-stradale-1990-2013-2012/view>

letture consigliate

- Commissione Europea, "Orientamenti metodologici per la realizzazione delle analisi costi-benefici", Documento di lavoro n. 4 (2006)
- Unità di Valutazione, DG Politica Regionale e Coesione, Commissione Europea, "Guida all'Analisi Costi-Benefici dei progetti d'investimento" (2008)

note

1. Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/2013/131 "Scenari di elettrificazione della rete di trasporto pubblico a Roma – Il fabbisogno energetico"
2. Nell'analisi per la collettività non sono da prendersi in considerazione le voci che rappresentano una partita di giro e, in particolare, le accise sul prezzo dell'energia