Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Analisi di elettrificazione del TPL in contesti ITC: lo smart ring dell'Aquila

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

Report RdS/PAR2013/102

ANALISI DI ELETTRIFICAZIONE DEL TPL IN CONTESTI ITC: LO SMART RING DELL'AQUILA

S. Orchi , F. Ortenzi, G. Valenti, M.P. Valentini, V. Fabrizi (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2013
Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica
Progetto: Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità
Obiettivo: Studio della sensibilità della conversione in elettrico del trasporto pubblico
Responsabile del Progetto: Antonino Genovese., ENEA

Al Direttore Generale Angelo De Angelis, alla Responsabile del Servizio Movimento Patrizia Liberati e a tutto lo staff dell'AMA coinvolto nella campagna di acquisizione di dati e informazioni sul servizio di trasporto pubblico a L'Aquila esprimiamo l'apprezzamento e i ringraziamenti per l'ampia disponibilità e il costante impegno che ci hanno permesso di completare al meglio il lavoro

Indice

SOMMARIO 6
1. INTRODUZIONE 10
2. IL MODELLO DI SIMULAZIONE 11
2.1 INIZIALIZZAZIONE DEL PROFILO DI MISSIONE 11
2.2 CALCOLO DELLA COPPIA E DELLA POTENZA NECESSARIA AL MOTO 12
2.3 IL MODELLO DEL SISTEMA DI ACCUMULO 13
2.4 CALIBRAZIONE DEL MODELLO 16
3. IL CASO DI STUDIO 23
3.1 IL CONTESTO URBANO 23
3.2 LA RETE DI TRASPORTO PUBBLICO LOCALE 25
3.3 LA CAMPAGNA DI ACQUISIZIONE DEI DATI 27
4. VERIFICA DELLA FATTIBILITÀ TECNICA DI ELETTRIFICAZIONE 34
4.1 PREDIMENSIONAMENTO DEL VEICOLO E DEL SISTEMA DI RICARICA 34
4.2 VERIFICA MEDIANTE SIMULAZIONE 35
5. ANALISI COSTI BENEFICI 40
5.1 GENERALITÀ 40
5.2 APPLICAZIONE AL CASO DI STUDIO 41
6. CONCLUSIONI 50
7 APPENDICE: ANALISI DI SENSITIVITÀ DELLA ANALISI COSTI BENEFICI 50
7.1 ANALISI DI SENSITIVITÀ PER L'IMPRESA 51
7.2 ANALISI DI SENSITIVITÀ PER LA COLLETTIVITÀ 56
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 62

Indice delle figure

Figura 2-1:Il simulatore per veicoli elettrici sviluppato in Simulink ... 11
Figura 2-2: Schema a blocchi dell'inizializzazione della simulazione ... 12
Figura 2-3: Schema a blocchi del calcolo delle resistenze all'avanzamento del veicolo ... 13
Figura 2-4: Andamento della capacità delle batterie con la corrente erogata (HAZE HZY EV12-65) ... 14
Figura 2-5: Influenza della temperature ambiente sulla capacità della batteria (HAZE HZY EV12-65) ... 14
Figura 2-6: Il circuito equivalente delle batterie al piombo. ... 15
Figura 2-7: Schema a blocchi del modello di batteria sviluppato in SIMULINK ... 16
Figura 2-8: Tecnobus Gulliver in dotazione al Centro di Ricerca ENEA Casaccia ... 16
Figura 2-9: Disposizione generale del sistema di acquisizione dei dati ... 17
Figura 2-10: Distanza percorsa in funzione del tempo ... 18
Figura 2-11: Profilo di velocità istantanea in funzione del tempo ... 18
Figura 2-12: Confronto tra corrente erogata e corrente stimata in una delle missioni ... 19
Figura 2-13: Confronto tra potenza erogata e potenza stimata in una delle missioni ... 20
Figura 2-14: Corrente erogata al variare delle pendenza ... 20
Figura 2-15: Potenza erogata al variare delle pendenza ... 21
Figura 3-1: Temperatura media mensile a L'Aquila (meteolaquila.it) ... 23
Figura 3-2: L'Aquila, vista da Sud-Est (Google Earth) ... 23
Figura 3-3: La viabilità principale de L'Aquila ... 24
Figura 3-4: Il piazzale del terminal di Collemaggio ... 25
Figura 3-5: Il minibus Cacciamali TCC635L ... 27
Figura 3-6: Percorsi attuali delle linee "10" e "12 A" ... 27
Figura 3-7: Percorsi per il trasferimento del minibus dal deposito ai capolinea ... 29
Figura 3-8: Il minibus zavorrato ... 30
Figura 3-9: Profili di marcia e altimetrici della linea 12A ... 31
Figura 3-10: Profili di marcia e altimetrici della linea 12A ... 32
Figura 3-11: Profili di marcia e altimetrici delle tratte di trasferimento dal deposito ai capolinea ... 33
Figura 4-1: Esempio di motore elettrico in alternate trifase da 80 kW a 400V ... 34
Figura 4-2: I moduli da 100 Ah(insieme a quelli da 30 e 60 Ah) utilizzati nelle simulazioni. ... 35
Figura 4-3: Stazione di ricarica in corrente continua con protocollo CHADEMO prodotta dalla Circutor ... 35
Figura 5-1: Variazione annua prezzo energia elettrica (%) ... 43
Figura 5-2: Variazione annua prezzo industriale del gasolio (%) ... 44
Figura 5-3: Costi esterni della produzione di energia elettrica, confronti europei, Fonte EEA 2008 ... 46
Figura 5-4: Fattori di emissione del parco elettrico italiano, elaborazione ENEA su dati ISPRA ... 46
Figura 5-5: Confronto del VAN economico per l'azienda nei vari scenari ... 49
Figura 5-6: confronto del VAN Economico per la collettività nei vari scenari ... 49
Figura 7-1: Impresa-Scenario Base ... 51
Figura 7-2: Impresa-Scenario A_ Investimenti ... 52
Figura 7-3: Impresa-Scenario B_Consumi ... 53
Figura 7-4: Impresa-Scenario C_Prezzi ... 54
Figura 7-5: Impresa-Scenario D_Sussidi ... 55
Figura 7-6: Confronto dei flussi netti degli scenari dell'Impresa ... 56
Figura 7-7: Collettività-Scenario Base ... 57
Figura 7-8: Collettività-Scenario A_Investimenti ... 58
Figura 7-9: Collettività-Scenario B_Consumi ... 59
Figura 7-10: Collettività-Scenario C_Prezzi ... 60
Figura 7-11: Confronto flussi netti degli scenari della Collettività ... 61

Indice delle tabelle

Tabella 2-1: Specifiche del TecnoBus Gulliver U520esp 16
Tabella 2-2: Valore percentuale dell'errore 19
Tabella 2-3: Corrente erogata (Ah) al variare della pendenza del percorso e della massa del veicolo 21
Tabella 2-4: Consumo specifico (kWh/km) al variare della pendenza e della massa del veicolo 21
Tabella 2-5: Caratteristiche dei bus elettrici della sperimentazione in Portogallo 22
Tabella 2-6: Percorrenze e consumi medi dei Gulliver in servizio urbano in Portogallo 22
Tabella 3-1: Le linee urbane che servono il territorio di L'Aquila 26
Tabella 4-1: Specifiche del Sistema di accumulo del Tecnobus Gulliver U520esp modificato 35
Tabella 4-2: Esercizio invernale 36
Tabella 4-3: Esercizio estivo 36
Tabella 4-4: Legenda tratte degli esercizi invernale ed estivo 37
Tabella 4-5: Esercizio invernale modificato 38
Tabella 4-6: Esercizio estivo modificato 38
Tabella 5-1: Dati tecnico-economici utilizzati per l'analisi di convenienza economica 42
Tabella 5-2: Costi esterni unitari dei principali inquinanti del trasporto terrestre in Italia (€/tonn.) 44
Tabella 5-3: Costi ambientali a km per Cacciamali in servizio all'Aquila 45
Tabella 5-4: SCENARIO DI BASE per l'Impresa 47
Tabella 5-5: SCENARIO DI BASE per la Collettività 47
Tabella 5-6: Indicatori di redditività dell'acquisto del bus elettrico 47
Tabella 5-7: Confronto indicatori sintetici ACB per l'azienda nei vari scenari 48
Tabella 5-8: Confronto indicatori sintetici ACB per la collettività nei vari scenari 49
Tabella 7-1: Impresa-Scenario Base 51
Tabella 7-2: Impresa-Scenario A_ Investimenti 52
Tabella 7-3: Impresa-Scenario B_Consumi 53
Tabella 7-4: Impresa-Scenario C_Prezzi 54
Tabella 7-5: Impresa-Scenario D_Sussidi 55
Tabella 7-6: Collettività-Scenario Base 56
Tabella 7-7: Collettività-Scenario A_Investimenti 58
Tabella 7-8: Collettività-Scenario B_Consumi 59
Tabella 7-9: Collettività-Scenario C_Prezzi 60

Sommario

L'attività condotta nel secondo anno di ricerca rappresenta il naturale proseguimento ed approfondimento delle analisi effettuate nel corso del precedente periodo di ricerca, relative alla fattibilità tecnico-economica dell'elettrificazione dei servizi di Trasporto Pubblico Locale.

I risultati del primo anno, relativi ad uno studio focalizzato su due diversi sottoinsiemi della rete di trasporto pubblico di Roma[1], avevano dimostrato che, sull'intero arco della vita utile dei mezzi, considerando anche i benefici ambientali conseguenti, l'elettrificazione di una rete di trasporto 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 istallazione dei sistemi di ricarica ai capolinea o alle fermate). In quella fase, lo studio aveva utilizzato valori di consumi specifico dei mezzi desunti da letteratura, senza approfondire le reali condizioni di operatività dei veicoli.

La presente analisi, invece, ha previsto una consistente quota di attività dedicata a questo importante aspetto.

Come caso di studio sono state selezionate alcune linee del servizio di trasporto pubblico nel Comune de l'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'AMA de l'Aquila per effettuare il servizio: sono state infatti selezionate due linee servite da veicoli di ridotte dimensioni (Cacciamali TCC635L), così da poter sfruttare dati relativi a precedenti rilevazioni sul minibus Gulliver della Tecnobus in dotazione al C.R. ENEA Casaccia (vedi figura seguente)

I veicoli a confronto nello studio:
un Cacciamali TCC635L in servizio a l'Aquila, il minibus Gulliver Tecnobus operativo nel C.R. Enea Casaccia

Più specificatamente, le linee selezionate sono la 10 e la 12A: la prima ha un percorso di circa 11 km sulla tratta Terminal Collemaggio- Bagno Grande; la seconda ha una lunghezza di circa 22 km nella tratta Terminal Collemaggio – Foce di Sassa. La figura seguente indica i percorsi completi delle linee prescelte.

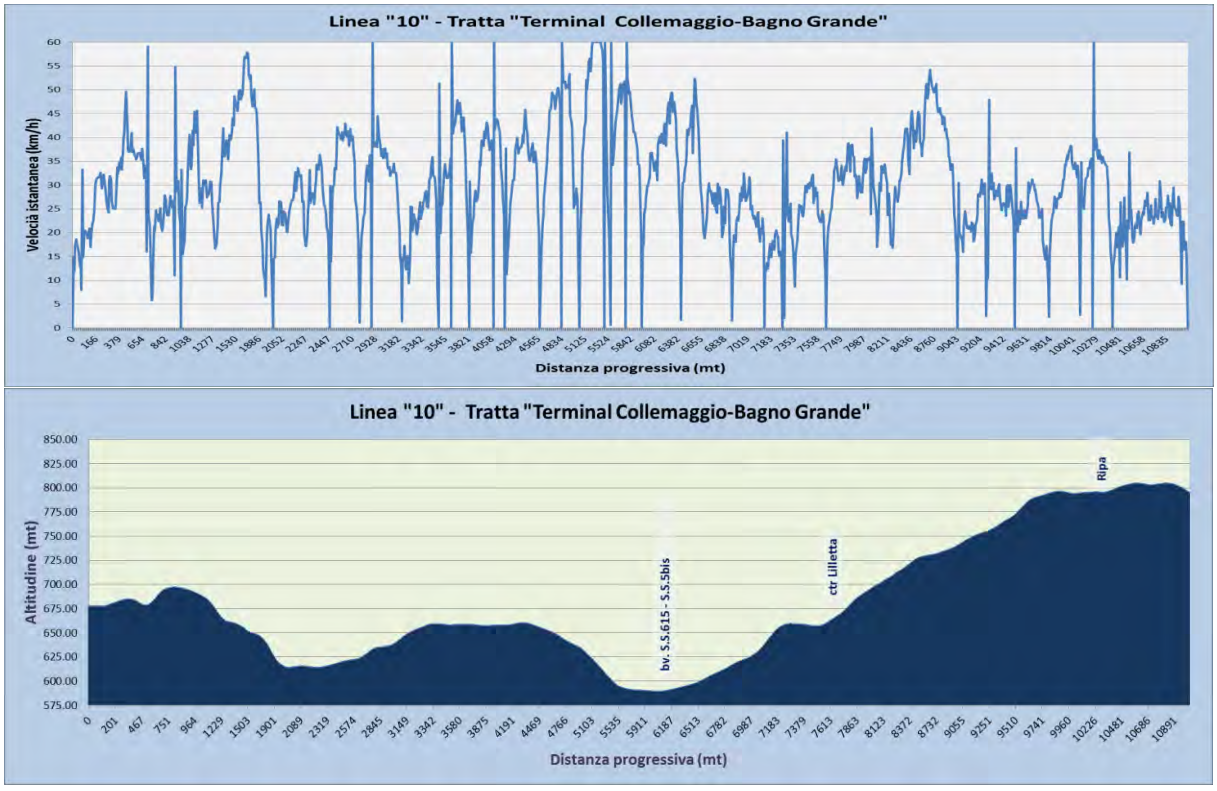
[1] Lo studio precedente era stato realizzato in collaborazione con l'Università La Sapienza di Roma

Percorsi delle linee “10” e “12 A” dell’AMA de l’Aquila

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 dal 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 a l’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. Ciò ha richiesto che durante la campagna di rilevamento fossero acquisiti con adeguata strumentazione anche tutti i dati necessari a ricostruire il profilo cinematico realizzato durante le missioni di servizio (vedi fig. seguente a titolo esemplificativo).



Parametri cinematici del percorso di andata della linea “10”

Le simulazioni della trazione in elettrico sono state rese possibili grazie alla messa a punto di un software *ad hoc*, calibrato utilizzando i dati della campagna sperimentale realizzata in passato nel C.R. ENEA Casaccia con il Gulliver Tecnobus; il modello informatizzato restituisce, *step by step*, i valori di consumo 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.

I risultati delle simulazioni hanno evidenziato che, per portare a compimento la missione assegnata, è necessario aumentare la potenza del motore e la capacità del sistema di accumulo del veicolo elettrico rispetto ai valori del Gulliver attualmente in commercio; l'impiego di batterie agli ioni di litio, tuttavia, fa sì che questo non comporti un aumento di peso del veicolo ne' una riduzione di capacità dello stesso.

Specifiche del Sistema di accumulo del Tecnobus Gulliver U520esp modificato

Tecnologia Batteria	LiFePO4
Capacità nominale	100 Ah
Tensione nominale di cella	3.2V
Celle in serie	128
Celle in parallelo	1
Tensione nominale	409.6
Energia nominale	40.96 kWh

Inoltre, per venire incontro agli elevati assorbimenti di energia dovuti ai particolari ed impegnativi profili cinematici delle missioni analizzate, si deve prevedere la possibilità di ricaricare le batterie 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, senza che ciò, tuttavia, pregiudichi l'efficacia del servizio di trasporto.

In sostanza, con i dovuti accorgimenti tecnologici e gestionali, si dimostra 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, 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'Azienda[2] – 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 notevoli capacità e di installare sistemi di ricarica rapida ad elevata intensità di corrente.

[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

Indicatori di redditività dell'acquisto del bus elettrico

Scenario di base	Impresa	Collettività
VAN	€ 9.095	€ 3.743
B/C	1,05	1,02
TIR	7,5%	4,3%

Fonte: elaborazione ENEA

La redditività economica potrebbe addirittura migliorare in un non improbabile scenario di ulteriore aumento dei prezzi dell'energia e se una maggiore diffusione sul mercato della trazione puramente elettrica facesse ridurre i prezzi di listino attuali, indubbiamente elevati rispetto a quelli relativi ai mezzi convenzionali.
Viceversa, è necessario garantire un impiego intensivo dei mezzi, al fine di garantire un rientro sufficientemente veloce degli investimenti iniziali che altrimenti potrebbe non verificarsi; si sottolinea come, per questo aspetto, i servizi di trasporto extraurbani sia preferibili a quelli urbani, sovvertendo un luogo comune secondo cui i veicoli elettrici siano utilizzabili solo in ambito urbano. Naturalmente ciò si rende possibile tecnicamente solo grazie ai progressi nelle prestazioni dei veicoli a batteria e dei sistemi di ricarica.

1. Introduzione

L'attività condotta nel secondo anno di ricerca rappresenta il naturale proseguimento ed approfondimento delle analisi effettuate nel corso del precedente periodo di ricerca, relative alla fattibilità tecnico-economica dell'elettrificazione dei servizi di Trasporto Pubblico Locale.
I risultati del primo anno, relativi ad uno studio focalizzato su due diversi sottoinsiemi della rete di trasporto pubblico di Roma3, avevano dimostrato che, sull'intero arco della vita utile dei mezzi, considerando anche i benefici ambientali conseguenti, l'elettrificazione di una rete di trasporto 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 istallazione dei sistemi di ricarica ai capolinea o alle fermate). In quella fase, lo studio aveva utilizzato valori di consumi specifico dei mezzi desunti da letteratura, senza approfondire le reali condizioni di operatività dei veicoli.
La presente analisi, invece, ha previsto una consistente quota di attività dedicata a questo importante aspetto.
Come caso di studio sono state selezionate alcune linee del servizio di trasporto pubblico nel Comune de l'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 ridotta dimensione dei mezzi attualmente utilizzati dall'Azienda, così da poter utilizzare studi pregressi relativi alle performance di veicoli elettrici di analoghe dimensioni, specificatamente bus Gulliver della Tecnobus.
Il nuovo caso di studio, molto differente dal precedente per condizioni di esercizio, ha dato modo di estendere le verifiche di fattibilità dell'elettrificazione ad altri contesti che non linee in servizio prettamente urbano.
Le attività, svolte interamente da personale ENEA, si sono articolate nelle seguenti fasi:

- contatti con l'Azienda di Trasporto Pubblico de l'Aquila e selezione, fra le linee attualmente in esercizio, di quelle più adatte ad essere servite da un mezzo elettrico di piccole dimensioni;
- rilevamento su campo dei profili cinematici delle linee selezionate e dei relativi consumi energetici dei mezzi attualmente impiegati;
- messa a punto di un software per la simulazione dei consumi energetici di un mezzo elettrico in relazione alle caratteristiche del veicolo e del profilo cinematico della missione assegnata;
- verifica mediante simulazione dei consumi di un veicolo Gulliver in esercizio sulle linee di trasporto selezionate a l'Aquila;
- dimensionamento del sistema di accumulo del veicolo in funzione della richiesta energetica e della possibilità di utilizzare sistemi di ricarica rapida in coincidenza delle soste previste durante l'esercizio;
- analisi di convenienza economica della sostituzione di veicoli attualmente in uso con veicoli elettrici di analoghe prestazioni.

Più nel dettaglio, sono state selezionate due linee di trasporto a bassa frequentazione che effettuano un servizio misto urbano ed extraurbano, collegando il centro cittadino con due zone periferiche; per entrambe le linee sono stati esaminati i programmi di esercizio dei veicoli impiegati, sia nel periodo scolastico che in quello di chiusura delle scuole.
L'analisi economica è stata realizzata sia per l'Azienda di Trasporto che per la collettività, esaminando i valori in gioco nei due casi ed effettuando una analisi di sensitività sulle grandezze da quantificazione più incerta.
Il presente rapporto dà conto del lavoro svolto e dei risultati conseguiti

[3] Lo studio era stato realizzato in collaborazione con l'Università La Sapienza di Roma

2. Il modello di simulazione

In funzione delle analisi effettuate nel corso del secondo anno di ricerca, è stato messo a punto un modello di simulazione degli assorbimenti energetici e dello stato di carica di veicoli elettrici durante predefinite missioni su strada.
Il modello è stato interamente sviluppato da ENEA in ambiente Simulink, secondo lo schema funzionale di seguito riportato.

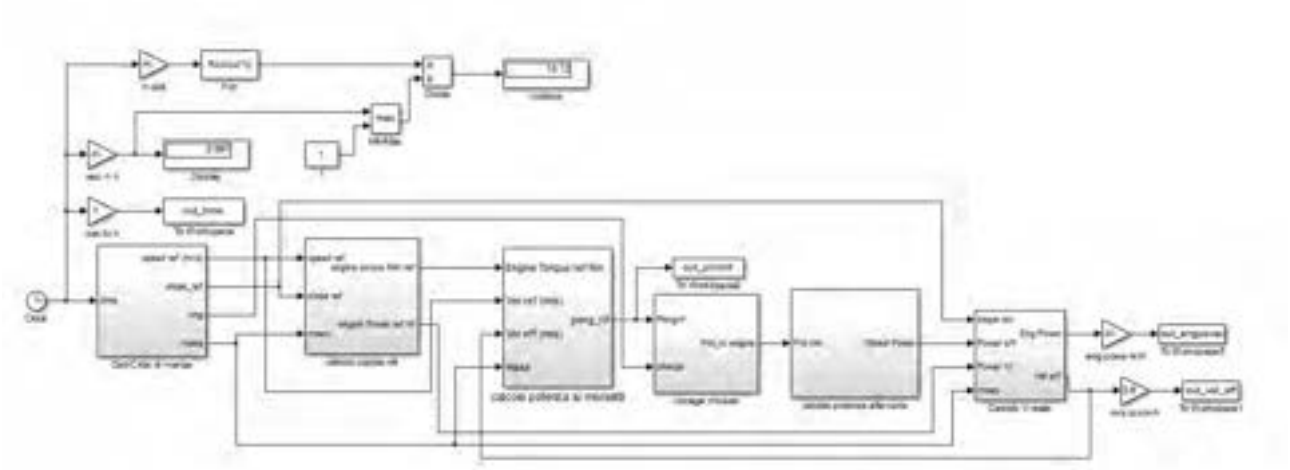


Figura 2-1:Il simulatore per veicoli elettrici sviluppato in Simulink

È un modello fenomenologico zerodimensionale e in bibliografia se ne riportano i dettagli [1] [2] [3] .
Per l'esecuzione delle simulazioni e per il calcolo del consumo energetico e dell'autonomia di un veicolo sono necessarie due tipologie di informazioni:

- Informazioni relative al profilo di missione;
- Informazioni relative al veicolo.

Nei successivi paragrafi saranno forniti maggiori dettagli in merito a tali dati.

2.1 Inizializzazione del profilo di missione

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 saranno forniti i valori di:

- Velocità del veicolo;
- Pendenza;
- Ricarica (se presente durante la sosta o eventualmente durante il moto);
- 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, apertura e chiusura porte ecc.)

In Figura 2-2 è riportato lo schema a blocchi del modulo di caricamento della missione del veicolo.

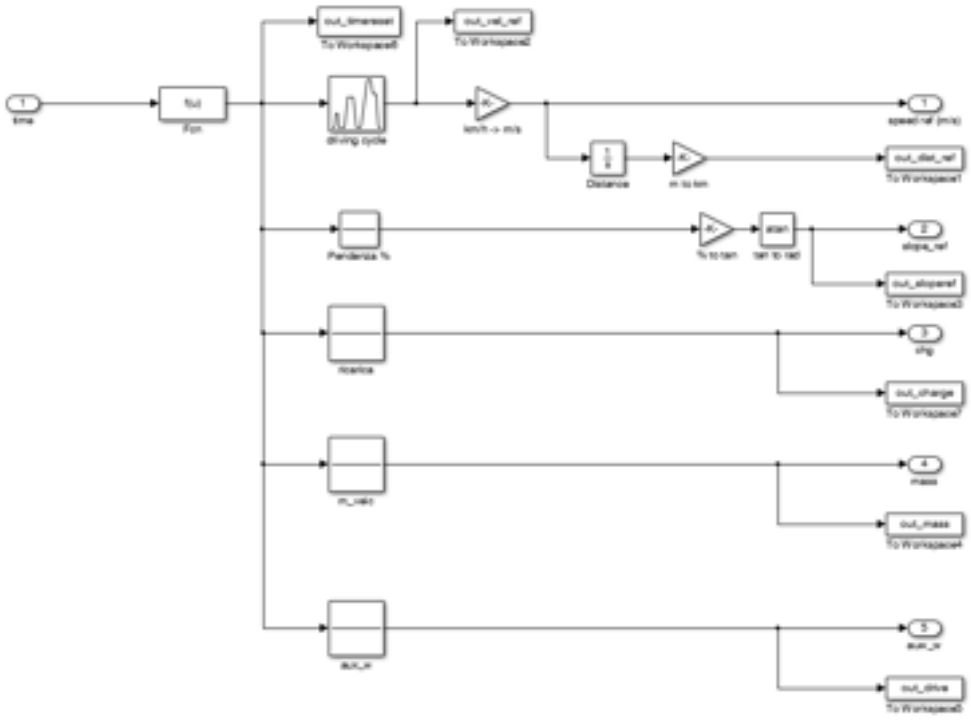


Figura 2-2: Schema a blocchi dell'inizializzazione della simulazione

Tutti i parametri ricavati sono utilizzati per calcolare le resistenze al moto, il numero di giri del motore oltre che a simulare una ricarica durante il reale funzionamento del veicolo.

2.2 Calcolo della coppia e della potenza necessaria al moto

Per stimare il consumo energetico istantaneo ed integrale è necessario innanzitutto calcolare la forza di trazione applicata alla ruote necessaria al movimento del veicolo . Tale valore è somma di 4 diversi termini :

- Forza d'inerzia;
- Resistenze di attrito dei pneumatici;
- Resistenze aerodinamiche;
- Pendenza stradale.

In formula:

$$F_w = m_c \cdot a + m \cdot g \cdot f \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} C_x \cdot A \cdot V^2 + m \cdot g \cdot \sin(\alpha).$$

Il termine inerziale contiene un valore della massa che tiene conto anche delle inerzie rotanti del veicolo:

$m_c = k_m \cdot m$,

con

$$k_m = 1 + \frac{\left(I_w + I_p \tau_p^2 + \eta_t I_e \tau_p^2 \tau_c^2\right) / r_w^2}{m}$$ con:

I_w : momento di inerzia delle ruote;

I_p : momento di inerzia del differenziale (ponte);

τ_p : rapporto di trasmissione del differenziale (ponte);

η_t : rendimento di trasmissione;

I_e : momento di inerzia del motore;

τ_c : rapporto di trasmissione del cambio.

Tali valori sono molto diversi da veicolo a veicolo ed esistono correlazioni sperimentali che approssimano il valore k_m ; tuttavia tale valore si differenzia molto poco dal valore unitario (2-3%).

Per quanto riguarda la resistenza al rotolamento si è utilizzata una relazione del coefficiente f di tipo quadratico:

$f = f_0 + f_1 \cdot V^2$. In cui f_0=0.013 e f_1=6.5e^{-6} possono ritenersi in prima approssimazione costanti al variare del veicolo.

Il termine relativo alle resistenze aerodinamiche contiene invece il coefficiente di resistenza longitudinale (C_x) e trasversale del veicolo, che sono invece molto legati al tipo di veicolo simulato, in particolar modo alla sagoma della sezione, alla lunghezza, al materiale impiegato per la scocca.

Il coefficiente di forma Cx assume valori variabili fra 0.27 fino 0.8 e più per autocarri telonati.

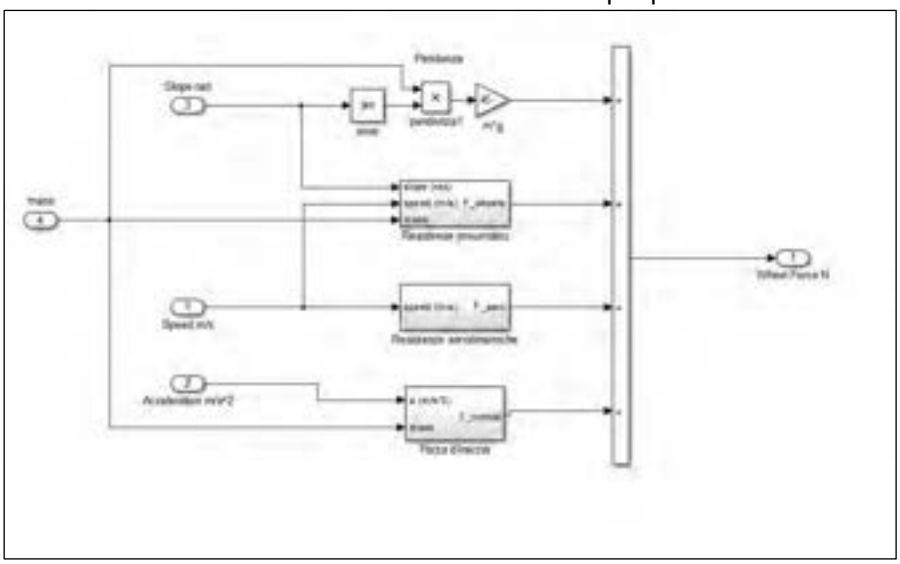


Figura 2-3: Schema a blocchi del calcolo delle resistenze all'avanzamento del veicolo

Si può notare che per il calcolo della forza di trazione e quindi della coppia ($T = F_W \cdot R_{ruota}$) e della Potenza ($P = F_W \cdot V$) è necessaria oltre alla conoscenza delle caratteristiche del veicolo, dei valori della pendenza, velocità e accelerazione, tutti dati cinematici noti a partire dalla conoscenza del ciclo di marcia.

2.3 Il modello del Sistema di accumulo

Una volta nota la potenza richiesta alle ruote per svolgere la missione, tale potenza andrà riportata alla trasmissione, poi al motore e infine alle batterie; per fare ciò è necessario applicare i valori di rendimento nei diversi passaggi, caratteristici del veicolo.

Il rendimento dell'azionamento (motore più inverter) ha un valore che si aggira attorno allo 0.8, leggermente minore per motori in corrente continua e generalmente non molto distante da 0.83 per quelli in alternata.

Il modello di calcolo [1] dei parametri in batterie avrà come input la corrente assorbita o erogata e come uscita lo stato di carica, la tensione e la sua temperatura. Nel caso di batteria al piombo acido, Lo stato di carica ha un andamento non costante con la corrente erogata. Ne deriva che per alte correnti medie erogate la capacità diminuisce mentre avviene il contrario se la batterie viene scaricata lentamente.

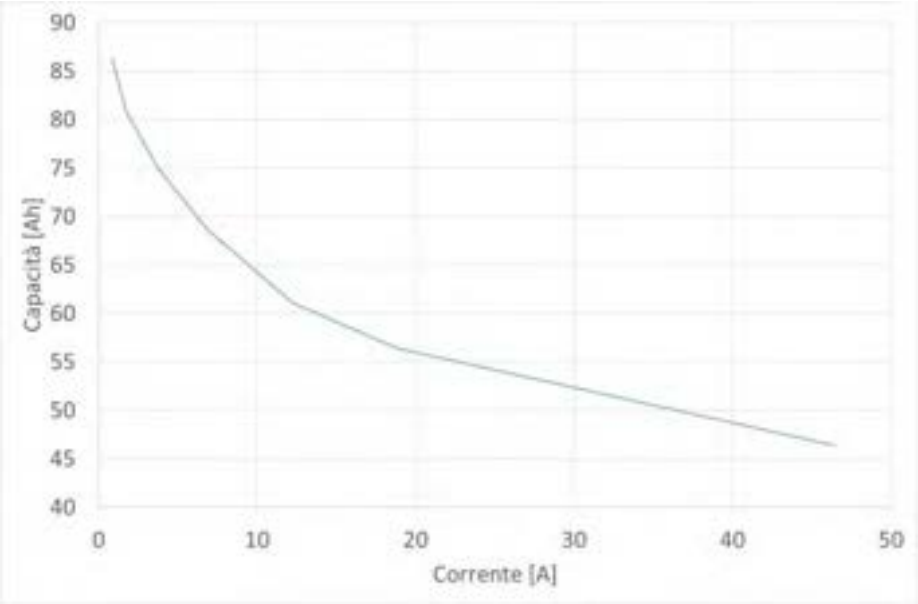


Figura 2-4: Andamento della capacità delle batterie con la corrente erogata (HAZE HZY EV12-65)

In Figura 2-4 è riportato l'andamento della capacità della batteria ACCU HZY 60 Ah al variare della corrente erogata; si può notare come il valore della capacità è riferito ad una scarica di 5 ore, equivalenti a 12 A. la capacità quindi può variare moltissimo in base all'utilizzo che ne viene fatto.
Altro fattore che influenza la capacità delle batterie (e quindi l'autonomia del veicolo) è la temperatura delle stesse.

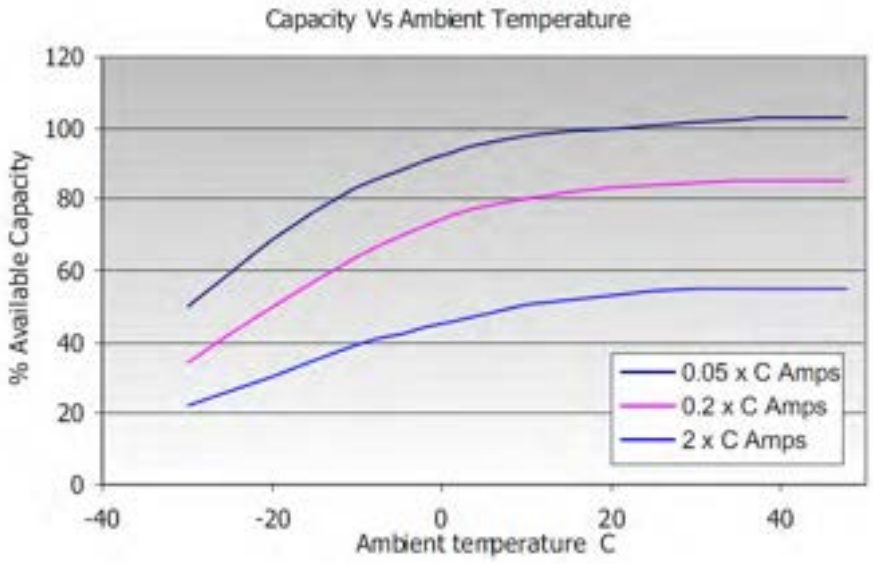


Figura 2-5: Influenza della temperature ambiente sulla capacità della batteria (HAZE HZY EV12-65)

Anche qui l'influenza della temperatura non è trascurabile e per temperature sotto lo zero la capacità comincia a scendere rapidamente.
Questi due fenomeni sono tenuti in considerazione utilizzando delle mappe all'interno del simulatore in modo da tener conto sia di una differente corrente media erogata rispetto al valore nominale, sia di una temperatura di esercizio lontana da quella di riferimento (che in genere è di 23 °C).
Il circuito elettrico della batteria è rappresentato come un generatore di forza elettromotrice in serie con una resistenza e un circuito RC, come in Figura 2-6.

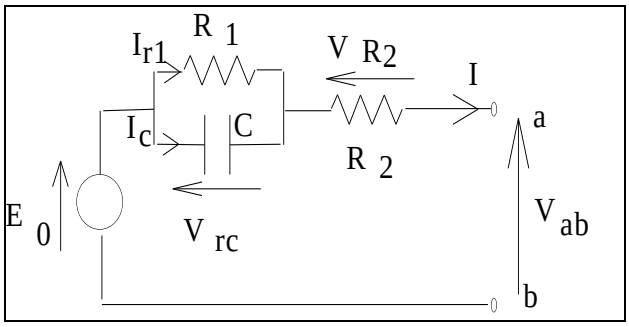


Figura 2-6: Il circuito equivalente delle batterie al piombo.

Per ottenere tutti i valori riportati in figura è però necessario testare ogni batteria con delle prove specifiche su un ciclatore. Le equazioni che vengono utilizzate per calcolare la tensione di batteria e le correnti in ogni singolo ramo del circuito sono[4]:

$$V_{ab} = E_0 - I_{R1} \cdot R_1 - I \cdot R_2 \qquad \text{Eq. 1;}$$

$$\frac{dI_{R1}}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left(I - I_{R1}\right); \qquad \text{Eq. 2}$$

dove $\tau = R_1 \cdot C$.

Sebbene il modello sviluppato sia in grado di simulare le batterie al piombo come riportato in Figura 2-6, una buona approssimazione si può ottenere rappresentando la batteria come un generatore di forza elettromotrice e una resistenza in serie semplificando di molto la calibrazione del modello di batteria ed utilizzando semplici correlazioni empiriche per il calcolo della resistenza interna.

Per il calcolo della temperatura della batteria (per simulare l'influenza della stessa sulla capacità) si sono utilizzate le seguenti relazioni:

$$C_\theta \frac{d\theta}{dt} = P_{Loss} + \frac{\left(\theta - \theta_a\right)}{R_\theta} \qquad \text{Eq. 3}$$

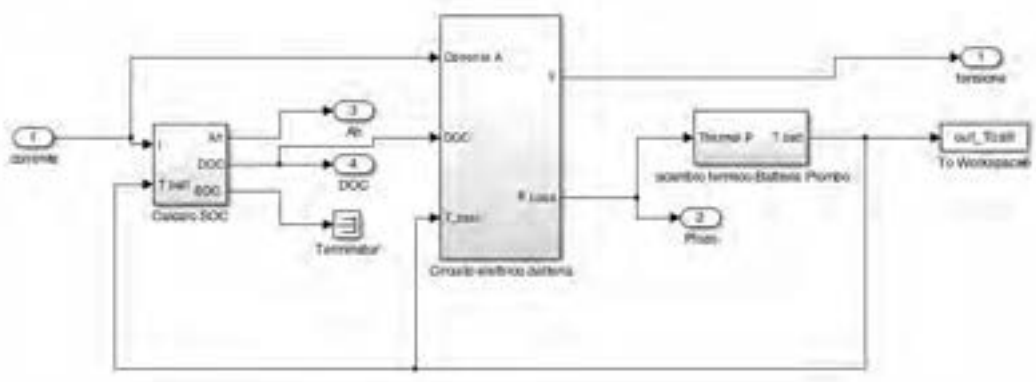
Dove :

C_θ : è la capacità termica (~20000);

θ : è la temperature dell'elettrolita;

P_{Loss} : Calore generato internamente alla batteria;

R_θ : Resistenza termica (~0.6).



[4] Ceraolo M (2000) New Dynamical Models of Lead–Acid Batteries", IEEE transactions on power systems 15-4

Figura 2-7: Schema a blocchi del modello di batteria sviluppato in SIMULINK

In figura 2.7 si riporta lo schema a blocchi sviluppato in SIMULINK per il modello di batteria al piombo acido. Nel caso di batteria agli ioni di litio, invece, il comportamento è abbastanza differente: l'influenza della corrente erogata sulla capacità è molto minore e in alcuni casi può ritenersi costante, l'influenza della temperatura ha un comportamento simile e il circuito elettrico equivalente rimane lo stesso di quella al piombo acido , nella simulazione del veicolo equipaggiato con batterie al litio quindi non ci saranno differenze per quanto riguarda il modello ma sono valori differenti di input.

2.4 Calibrazione del modello

Per la validazione e calibrazione del modello di simulazione è stato utilizzato il caso di un minibus elettrico prodotto dalla Tecnobus: il Gulliver U520esp, di cui si riporta di seguito un'immagine.

Figura 2-8: Tecnobus Gulliver in dotazione al Centro di Ricerca ENEA Casaccia

Tale veicolo infatti, per una precedente sperimentazione interna al Centro di Ricerca ENEA Casaccia, ha effettuato per diversi mesi un servizio di trasporto a chiamata all'interno del centro. Il bus è stato monitorato da un sistema di acquisizione dati da GPS e da presa diagnostica, in modo che tutti i parametri energetici fossero acquisiti.
I dati del veicolo utili al modello sono riportati nella Tabella **2-1** sottostante

Tabella 2-1: Specifiche del TecnoBus Gulliver U520esp

Peso a vuoto	3900 kg
Capacità batterie	585 Ah
Corrente max scarica	1 C
Corrente max carica	0.2 C
Frenata a recupero	No
Tensione batteria	72 V
Rendimento azionamento elettrico	77.5%
Motore elettrico	CC 24kW max
Raggio ruota	0.365 m

I dati di input relativi al profilo cinematico provengono dalla campagna sperimentale svolta nel Centro di Ricerca Enea Casaccia. Le strumentazioni installate a bordo del veicolo hanno consentito la registrazione di una serie di grandezze necessarie al modello, come la velocità istantanea del veicolo, la distanza percorsa, e una serie di informazioni relative allo stato della batteria, quali la corrente erogata, la potenza erogata e una stima della sua carica residua. Tali misurazioni sono state acquisite ogni mezzo secondo. Sono state

inoltre acquisite le informazioni relative alla posizione istantanea del veicolo, quali la latitudine, longitudine e altitudine attraverso un ricevitore GPS. Queste ultime misure sono invece acquisite ogni secondo. Infine sono state registrate le informazioni relative al tempo. Tutte le informazioni sono state immagazzinate in un Database.
I dati acquisiti sono relativi a 55 giorni di attività della navetta Gulliver all'interno del Centro di Ricerca Enea. Tuttavia i dati relativi a 23 giorni, a causa di un eccessivo numero di acquisizioni "saltate" e/o per la mancanza di un numero sufficiente di acquisizioni giornaliere, non sono stati utilizzati per le nostre analisi.

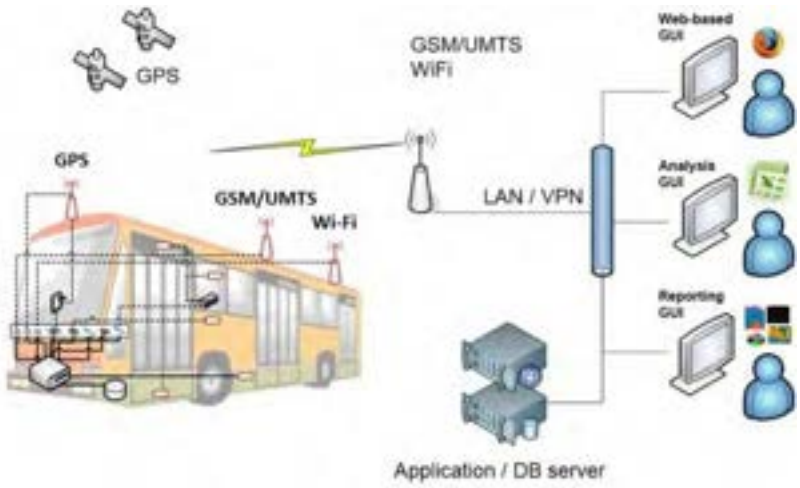


Figura 2-9: Disposizione generale del sistema di acquisizione dei dati

Il passo successivo all'acquisizione dei dati consiste nelle operazioni preliminari necessarie, quali la correzione di valori mancanti (registrati con il valore convenzionale di -999). Tali valori sono stati sostituiti con il valore medio tra il valore precedente e quello successivo.
Per eliminare rilevazioni fuori scala e oscillazioni locali poco significative ai fini dell'analisi da condurre è stato poi applicato un filtro digitale alla maggior parte delle serie di dati e più specificatamente a: velocità, intensità di corrente (A), tensione (V), altitudine e distanza percorsa fra una fermata e la successiva. Un filtro consiste nel trasformare una serie in un'altra simile alla prima, con delle caratteristiche specifiche che ne rendono più semplice e/o più verosimile l'interpretazione statistica. In particolare è stato applicato il filtro *passa basso (* tipo Butterworth) che consente il passaggio di frequenze al di sotto di una soglia detta frequenza di taglio, individuata da due parametri variabili fra 0 e 1 (wp = *passabanda* e ws = *stopbanda*) che nel caso in oggetto sono stati posti rispettivamente pari a 0.5 e 0.6, valori che garantiscono la semplificazione della sequenza senza rinunciare all'evidenza dei fenomeni più rilevanti.
Le figure sottostanti riportano delle registrazioni tipiche acquisite durante una delle giornate di lavoro e sottoposte al filtraggio.

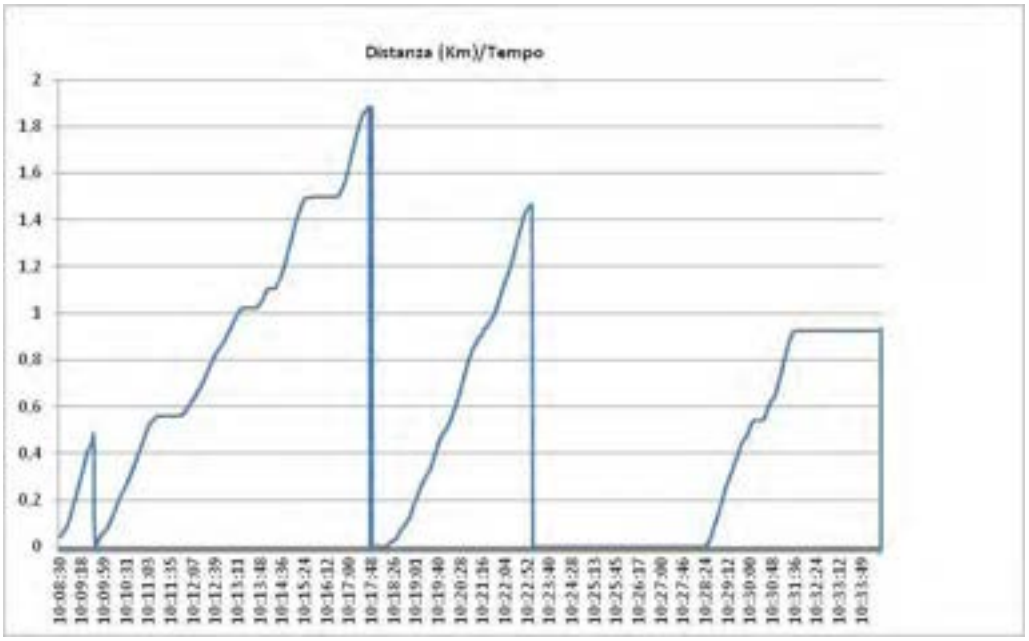


Figura 2-10: Distanza percorsa in funzione del tempo

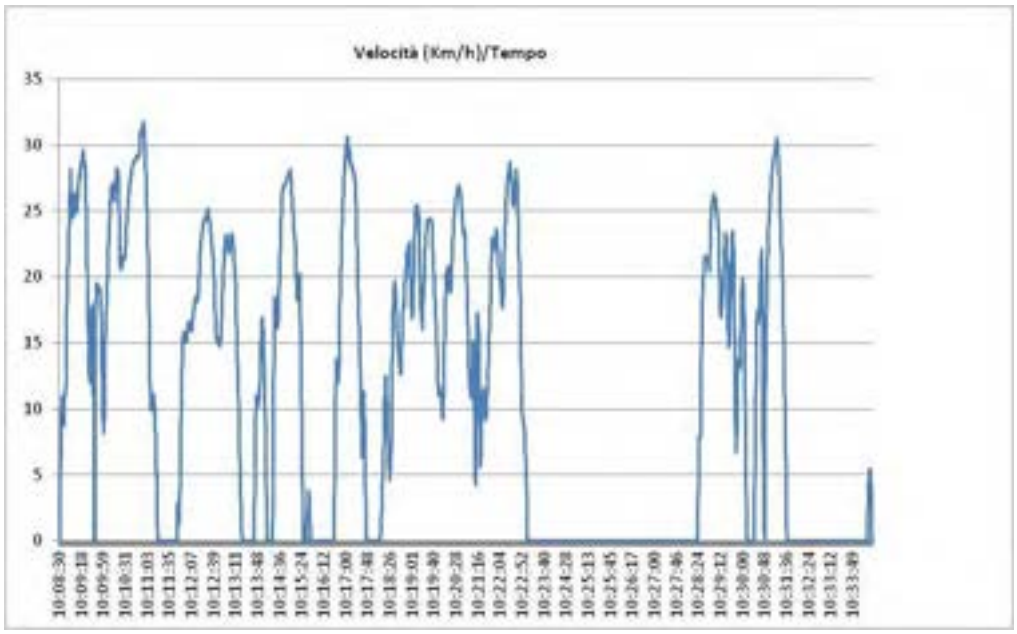


Figura 2-11: Profilo di velocità istantanea in funzione del tempo

Una volta terminata la fase di controllo e correzione dei dati, si è passati alla fase di calibrazione del modello. La calibrazione è una fase necessaria per impostare il valore di alcune variabili del modello, di cui non è noto l'esatto valore. Senza un'opportuna calibrazione non si ha la certezza che il modello possa simulare correttamente il fenomeno in esame.
In tale fase si procede al confronto iterativo tra osservazioni sperimentali e valori modellati.
Abbiamo ritenuto il modello adeguatamente calibrato quando l'errore percentuale misurato sull'Ampere e sui kWh ha raggiunto valori sufficientemente bassi. Tali valori percentuali sono riportati nella Tabella 2-2 sottostante. Significativo poi l'ausilio di opportune rappresentazioni grafiche.
Uno dei parametri incogniti era quello relativo all'assorbimento degli apparecchi ausiliari. Considerando la totalità dei dati di input, i valori degli ausiliari che permettono di ottenere errori percentuali più bassi sull'Ampere e sui kWh sono quelli pari a 850 e 900.

Tabella 2-2: Valore percentuale dell'errore

Err % Ampere	Err % Kwh	Valore Ausiliari (Watt)
-2,38	-1,12	800
-1,14	0,15	850
-0,01	1,32	900
1,42	2,76	950
2,65	4,01	1000
3,99	5,37	1050
5,26	6,66	1100
6,49	7,92	1150
7,87	9,31	1200
9,16	10,62	1250
10,47	11,95	1300

Anche graficamente possiamo notare che, una volta impostato il corretto valore di assorbimento degli ausiliari, il modello riesce a rappresentare bene il fenomeno in esame. Considerando una delle missioni svolte all'interno del Centro Casaccia ecco ciò che il modello riesce a cogliere:

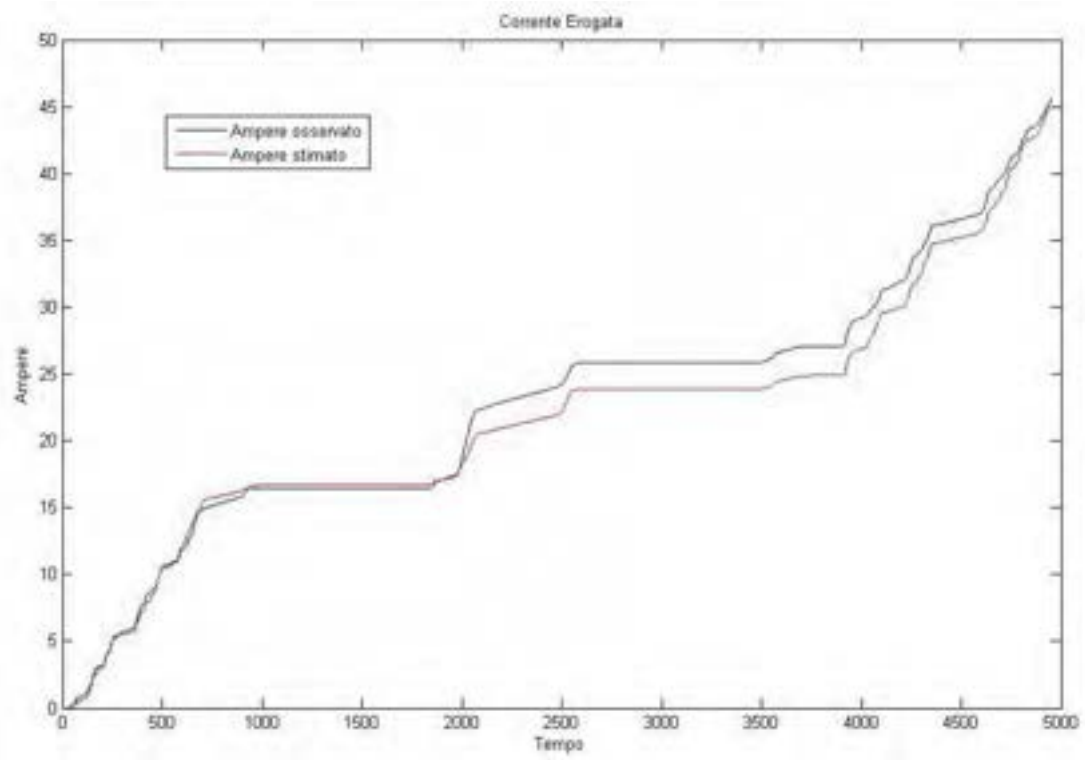


Figura 2-12: Confronto tra corrente erogata e corrente stimata in una delle missioni

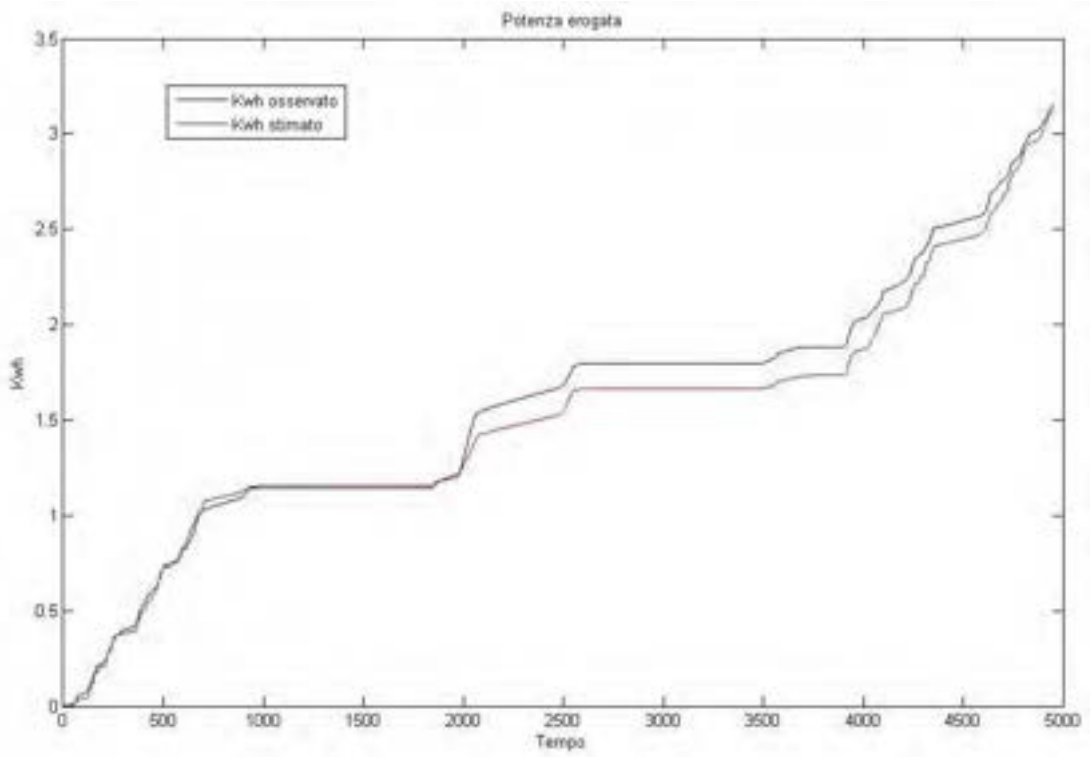


Figura 2-13: Confronto tra potenza erogata e potenza stimata in una delle missioni

Inoltre, si è voluto verificare la sensibilità del modello ad alcune variabili particolarmente significative nella stima dei consumi energetici del veicolo, quali la pendenza e la massa del veicolo.
Come era da attendersi, il modello stima consumi sensibilmente crescenti al crescere della pendenza del percorso e all'aumentare della massa del veicolo. Considerando una delle missioni svolte nel Centro Casaccia, supponiamo di aumentare via via la pendenza del percorso e la massa del veicolo: la corrente erogata ed i consumi crescono di conseguenza, come evidenziato nei grafici e nelle tabelle seguenti.

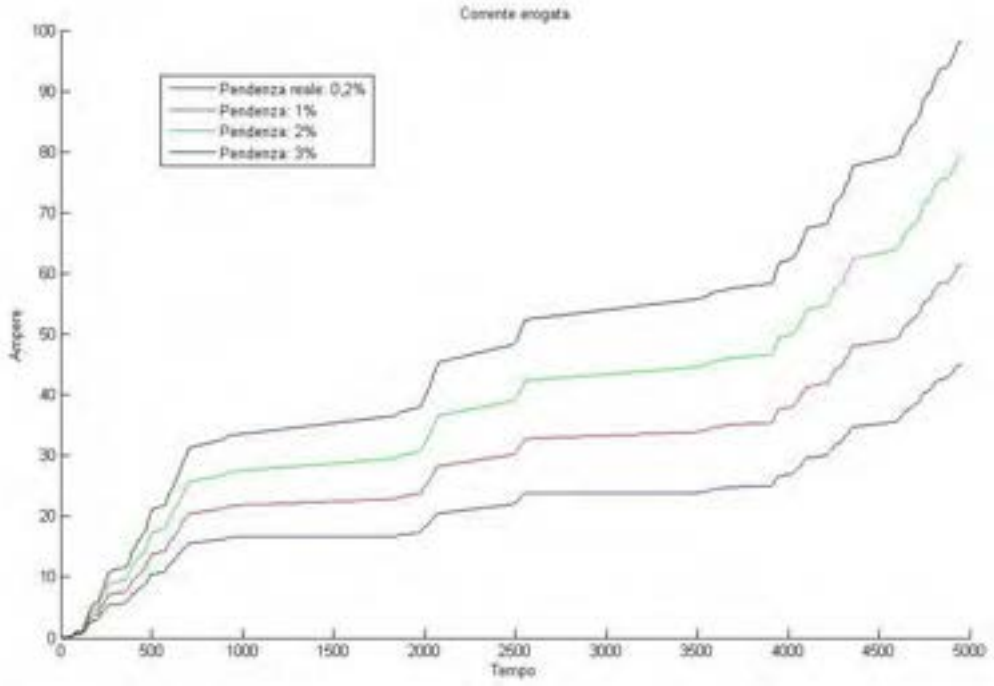


Figura 2-14: Corrente erogata al variare delle pendenza

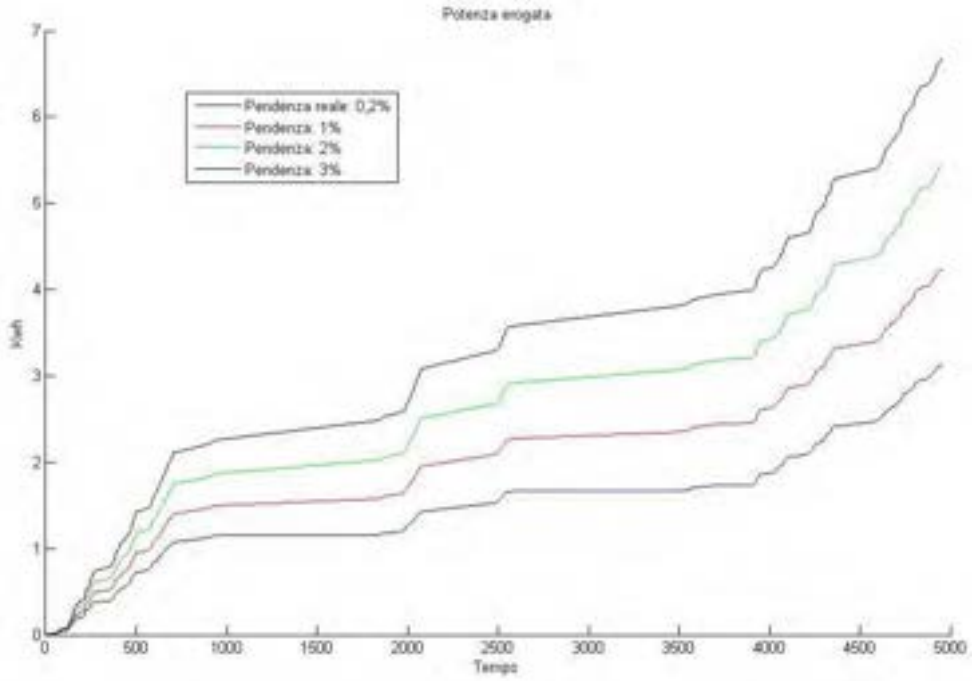


Figura 2-15: Potenza erogata al variare delle pendenza

Tabella 2-3: Corrente erogata (Ah) al variare della pendenza del percorso e della massa del veicolo

		Pendenza			
		0,2%	1%	2%	3%
Massa	3.900 kg	44,97	61,36	79,29	98,30
	4.000 kg	45,50	62,66	81,08	100,63
	4.100 kg	46,55	63,97	82,88	102,96
	4.200 kg	47,45	65,28	84,68	105,30

Tabella 2-4: Consumo specifico (kWh/km) al variare della pendenza e della massa del veicolo

		Pendenza			
		0,2%	1%	2%	3%
Massa	3.900 kg	0,39	0,53	0,69	0,84
	4.000 kg	0,40	0,54	0,70	0,86
	4.100 kg	0,41	0,56	0,71	0,88
	4.200 kg	0,41	0,57	0,73	0,90

Passando da una pendenza dello 0.2% ad una dell' 1%, il consumo aumenta di circa il 36%, aumento che diventa del 75% se si passa ad una pendenza del 2%, e del 115% passando invece ad una pendenza del 3%.

I risultati delle simulazioni appaiono in linea con i rilevamenti effettuati in Portogallo durante l'esercizio di una flotta dimostrativa di bus elettrici: da Settembre 2001 e per due anni e mezzo la Direzione Generale dei Trasporti Interni del Governo Portoghese ha finanziato un'azione dimostrativa di elettrificazione del Trasporto Pubblico Locale utilizzando anche veicoli Gulliver della Tecnobus (l' OREOS 55H della Gepebus).

Due Gulliver alimentati con batterie al piombo (sostituibili in pochi minuti) hanno svolto servizio per periodi variabili fra i quattro e i sei mesi, in ben 24 città portoghesi, percorrendo più di 74.000 km nel complesso. Le caratteristiche dei veicoli della sperimentazione portoghese sono riportate nella Tabella 2-5 seguente

Tabella 2-5: Caratteristiche dei bus elettrici della sperimentazione in Portogallo

Modello veicolo	**Gulliver**
Manufacturer	Tecnobus
Selling price	150 000€
Capacity	14 standing + 8 seating places
Length	5.30m
Width	2.07m
Maximum Speed	33 km/h
Batteries autonomy	4 to 6 hours
Time required for replacing the Batteries	4 minutes

A seguito della sperimentazione, tre importanti città portoghesi, Coimbra, Portalegre and Bragança, hanno adottato alcuni veicoli elettrici per il servizio di trasporto pubblico all'interno dei loro centri storici; diverse altre città stanno gradualmente seguendo questo esempi. Attualmente 18 Gulliver effettuano regolare servizio in 6 città portoghesi. Realizzando le prestazioni riassunte nella seguente Tabella 2-6[5].

Tabella 2-6: Percorrenze e consumi medi dei Gulliver in servizio urbano in Portogallo

Città	Percorrenza giornaliera media [km]	Consumo specifico medio [kWh/100 km]	Percorrenza annuale [km]	Consumo annuale [kWh]
Coimbra	80	111	22,400	24,860
Portalegre	140	103	39,200	40,380
Bragança	205	80	57,400	45,900
Viseu	215	83	60,200	50,000
Viana do Castelo	73	71	19,050	13,500

Come si evince dai valori in tabella, il consumo specifico medio oscilla fra 70 e 110 kWh/km (circa) , mostrando una certa variabilità in funzione del contesto e della missione assegnata e, anche, una buona corrispondenza con il valori di consumo calcolati mediante la simulazione sul percorso interno alla Casaccia, tenuto presente che, in questo caso, la frequenza delle fermate era piuttosto bassa rispetto a quella dei bus in servizio urbano nei centri storici.

[5] Non sono disponibili i dati relativi al servizio effettuato a Funchal

3. Il caso di studio

3.1 Il contesto urbano

L'attività di ricerca è stata condotta utilizzando come caso di studio il servizio svolto dai minibus dell'AMA (Azienda per la mobilità aquilana) che gestisce il trasporto pubblico locale a L'Aquila.

L'Aquila ha circa 72.000 abitanti ed è situata nell'omonima conca sulle sponde del fiume Aterno, ad un'altitudine di 721 metri sul livello del mare che la rende terza tra i capoluoghi di provincia italiani più alti, dopo Enna e Potenza.

La posizione e la quota rendono il clima de L'Aquila più continentale che mediterraneo. In base alle medie climatiche ufficiali 1951-2000 pubblicate dall'ARSSA Abruzzo, relative alla stazione meteorologica urbana situata nel centro storico cittadino, la media annua delle temperature minime si attesta a +6,5 °C, la media annua delle massime a +17,3 °C, mentre la temperatura media annua è pari +11,9 °C.

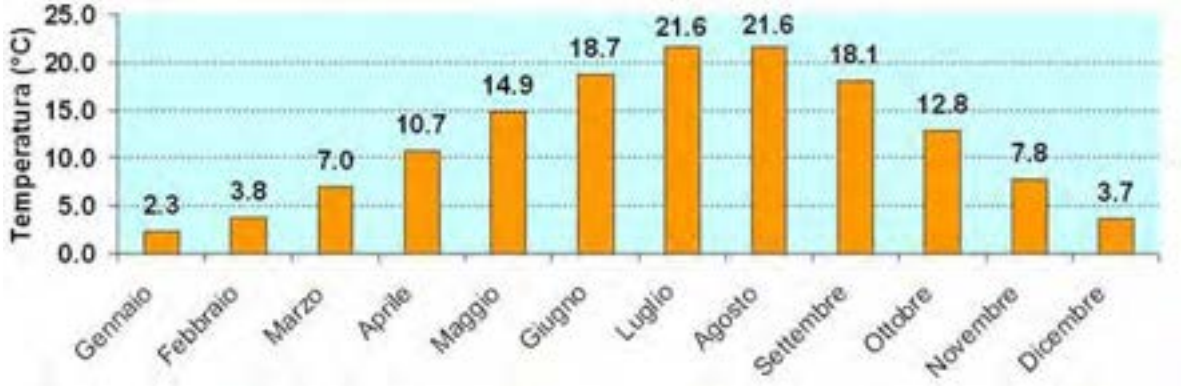


Figura 3-1: Temperatura media mensile a L'Aquila (meteolaquila.it)

L'Aquila possiede una superficie comunale di 467 km² che, su scala nazionale, la pone al nono posto per ampiezza. Proprio a causa dell'estensione del territorio sparso su una zona montuosa interna, L'Aquila dispone di una rete stradale e di servizi di trasporto pubblico di amministrazione molto complessa ed estesa resa ancora più difficile dalla dispersione demografica della popolazione colpita dal recente sisma del 6 aprile 2009 che ha radicalmente mutato l'assetto insediativo della città.

Il tessuto urbano, che si estende in maniera disomogenea lungo la direttrice est-ovest parallelamente al corso del fiume, include 67 tra quartieri e frazioni. Il centro storico sorge su di un altipiano in posizione pressoché baricentrica rispetto alla conca; numerose sono le frazioni situate sul declivio o sulla sommità dei colli circostanti, tra cui è bene ricordare Aragno, Roio, Pianola, Bagno, San Giacomo, Sassa e Collebrincioni.

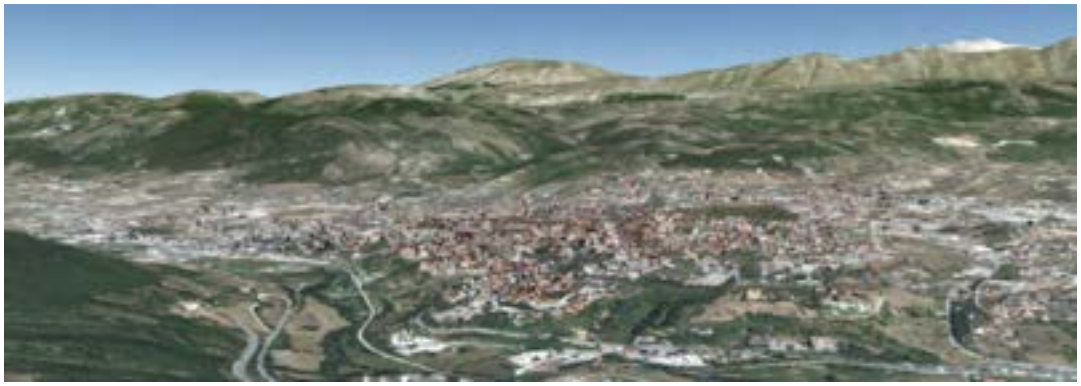


Figura 3-2: L'Aquila, vista da Sud-Est (Google Earth)

Come accennato in precedenza il tessuto urbano, a causa del sisma, ha assunto un assetto assai meno compatto e ben più articolato e frammentato del precedente, legato alla delocalizzazione nelle periferie e nei nuclei industriali non solo delle residenze, ma anche della maggior parte delle strutture pubbliche e private, con effetti rilevantissimi anche sulla mobilità urbana (aumento del traffico e del pendolarismo ecc.). La stessa struttura viaria della città non facilita un assetto così distribuito e la rilocalizzazione delle

attività terziarie ha prodotto, specie negli orari di apertura al pubblico degli uffici, una mobilità congestionata.
La nuova struttura insediativa, spiccatamente multipolare, comporta pertanto maggiori oneri sia per i singoli cittadini in termini di costi generalizzati di trasporto, che per la collettività, in termini di esigenze di potenziamento di elementi della rete che nel passato rivestivano un ruolo di media/scarsa importanza e di gestione di una estesa rete di trasporto pubblico in grado di garantire la reciproca coesione tra parti della città e di salvaguardare l'identità urbana del nuovo assetto della città.
Oltre all'autostrada la principale viabilità d'accesso alla città è costituita dalla: a)SS17 che attraversa il territorio comunale da est (direttrice Rieti – Terni) a ovest (direttrice Bazzano– Popoli – A25); b) SS80 per le provenienze da est (direttrice Teramo) e da nord (direttrice Barete – Amatrice); c)SS5bis e dalla Mausonia per le provenienze da sud (direttrice Ovindoli).
La viabilità principale è costituita da viale Corrado IV, nel quale confluiscono la SS17 per provenienze da est e la SS80, che si dirama nelle due strade che costeggiano il centro storico da sud, via XX settembre che dopo il sisma è a senso unico verso Collemaggio, e da nord, via della Croce Rossa.
Proseguendo su viale della Croce Rossa e poi su viale Antonio Panella si raggiunge la SR17 ter, meglio nota come tangenziale Est dell'Aquila, che permette il collegamento al casello di L'Aquila Est e la SS17 nei pressi di Bazzano, mentre da via XX Settembre si raggiunge la SS17 proseguendo su viale Francesco Crispi e via Porta Napoli. L'anello intorno al centro storico è completato da via Strinella che collega viale Panella con Collemaggio e grazie, ad una galleria, si riconnette alla SS17 tramite via della Crocetta.

Figura 3-3: La viabilità principale de L'Aquila

Altra viabilità di rilievo nelle aree centrali è costituita da viale Gran Sasso, viale Duca degli Abruzzi e viale Giovanni XXIII che collegano la zona nord e la zona sud della città costeggiando il centro storico a Ovest. Infine la tangenziale sud che ha inizio dalla variante sud della SS 17, ad ovest del capoluogo abruzzese, nei pressi di una zona commerciale. Da qui prosegue in direzione sud-est e, attraverso una galleria, supera il monte Luco, sfociando infine sulla SP 120 Mausonia in località Pianola.
Snodo principale del trasporto pubblico, nonché punto di arrivo e partenza a L'Aquila dei pullman in esercizio sulle linee extraurbane è il terminal di Collemaggio situato in prossimità del centro storico. Il complesso immobiliare, localizzato nel "vallone di Collemaggio", è costituito da tre livelli interrati al di sotto del piazzale di copertura ed è destinato alla sosta delle autovetture (n.° 720 posti) e dei pullman:
livello "-3" - superficie mq. 7.300 circa, altezza m. 3,00 destinato a parcheggio auto;
livello "-2" - superficie mq. 8.400 circa, altezza m. 3,05 destinato a parcheggio auto;
livello "-1" - superficie mq. 9.500 circa, altezza m. 4,90 destinato a Terminal linee extraurbane.
Sul piazzale di copertura (circa mq. 11.200) che si viene a creare al di sopra dei livelli interrati, livello "O", si svolge la viabilità di penetrazione ai livelli inferiori e la viabilità di collegamento con la rete urbana. Sul piazzale di copertura sono presenti inoltre i capolinea o le fermate di gran parte delle linee urbane del servizio di trasporto pubblico locale che permettono l'interscambio con le linee interregionali oppure con i mezzi privati, essendo il terminal dotato di un parcheggio sotterraneo.

Dalla stessa Autostazione si snoda il percorso pedonale meccanizzato per il collegamento del complesso con il centro storico della città. Tale percorso è costituito da una galleria pedonale lunga circa 500 metri dotata di 7 coppie di tappeti mobili di lunghezze e pendenze variabili alternate a tratti di raccordo pedonali.

Figura 3-4: Il piazzale del terminal di Collemaggio

Le linee di indirizzo del Piano Urbano della Mobilità (PUM), approvato dalla giunta Comunale nel 2012, prevedono la ridefinizione di 3 livelli di trasporto collettivo:
Ferrovia, con la realizzazione di nuove stazioni e di un servizio Servizio Ferroviario Territoriale sulla tratta Sassa-San Demetrio;
Metrobus, con l'introduzione di sistemi di trasporto su gomma a infrastrutturazione leggera comprendenti autobus moderni ed ecocompatibili, fermate progettate ad arte per un servizio confortevole in grado di stimolare l'uso del mezzo pubblico e sede protetta per agevolare la marcia dei mezzi;
Navette ecocompatibili, con l'impiego su due linee di nuovi minibus con motori a basse emissioni per garantire la riqualificazione e l'accessibilità del centro storico,

Lo scopo del PUM è di creare un sistema integrato di trasporto collettivo in grado di garantire la mobilità dei cittadini in un contesto urbano profondamente modificato dagli eventi sismici del 2009 ed in continua evoluzione. In particolare Ferrovia e Metrobus garantiranno l'accessibilità alle aree limitrofe al centro storico, mentre le navette contribuiranno alla rinascita delle aree più centrali della città, servendo strade e piazze di elevato pregio storico-artistico.

3.2 La rete di trasporto pubblico locale

L'AMA è la società del Comune dell'Aquila che gestisce le linee di trasporto pubblico locale nella città de L'Aquila. La struttura e la funzionalità della rete sono pesantemente condizionate dalla morfologia della città e dalle caratteristiche geometriche della rete stradale che costringono a percorsi tortuosi e all'adozione di mezzi convenzionali di capacità modesta o addirittura di minibus.
La struttura della rete è stata ulteriormente modificata a seguito del sisma, in conseguenza del quale, al fine di garantire i servizi essenziali ai nuovi quartieri residenziali, ai nuovi insediamenti scolastici sorti e alle sedi universitarie sono state incrementate le percorrenze fino a 4'102'836 chilometri annui, con un incremento di circa 800'000 chilometri rispetto alla rete storica.
Le linee sono caratterizzate da una frequenza mediamente non elevata e disomogenea da linea a linea con frequenza estremamente ridotta nei giorni festivi. Diverse linee dell'AMA, alcune delle quali esercite con minibus alimentati a gasolio, raggiungono persino delle piccole frazioni che si trovano in montagna e a chilometri di distanza dalla città.
Nella seguente Tabella 3-1 si riporta l'elenco delle linee con le principali fermate/località servite.

Tabella 3-1: Le linee urbane che servono il territorio di L'Aquila

Linea	Fermate principali
1-1R	Ingegneria Roio-Terminalbus-Leonardo Da Vinci-Ospedale-L'Aquilone/GDF
2-2U-2UT	Terminalbus-Stazione-università Coppito-Optimes-Centro Commerciale L'Aquilone
3-3R	Ospedale San Salvatore-Cansatessa-Terminalbus – Ingegneria Roio
4	Ospedale-Colle Pretara-Fontana Luminosa-Terminalbus
5	Gignano-terminalbus-Stazione-Ospedale Regionale
6D-6S	Paganica-Tempera-Terminalbus-L'Aquilone
M6-M6H	Base funivia-Paganica-Terminalbus-S.Gregorio-Ospedale S.Salvatore
M6B	Paganica paese-CASE Paganica2-via dell'Industria
M7A	Terminalbus-Tempera-Paganica-Filetto-Camarda
8	Fontegrossa-Terminal
9-M9	Terminalbus-S.Francesco-Collebrincioni-Aragno
10	Terminalbus-frazioni Bagno-Bagno Grande
11	Terminalbus-via XX Settembre-Stazione Fs-Roio-Ingegneria Monteluco-L'Aquilone
12	Terminalbus-Genzano-frazioni Sassa-Prata Peschiolo-Terminalbus
12A	Terminalbus-Pagliare-Sassa-Foce di Sassa
M12x	Collefracido-Ospedale San Salvatore
13	Terminalbus-Guardia di Finanza-aeroporto Preturo-frazioni Preturo-Menzano
14D	Cese di Preturo-Università Coppito-Università Optimes-centro commerciale L'Aquilone-Sassa Scalo
14S	Cese di Preturo-Sassa Scalo-centro comm.le L'Aquilone-Optimes-Coppito
15	Terminalbus-S.Vittorino – Arischia
16	Terminalbus-Monticchio-Cavalletto D'Ocre-Fossa
16A	Terminalbus-Picenze-San Gregorio
M17	NAVETTA UFFICI CENTRO STORICO
19	Terminalbus-Stazione Fs-Pile-Reiss Romoli-Università Coppito-Ospedale San Salvatore
Notturno	Viale Gran Sasso-> Zona Ovest

L'utilizzo del mezzo pubblico nella città dell'Aquila è superiore alla media nazionale e ai vertici della classifica dei Comuni virtuosi, con un 25 per cento di fruitori a fronte di una media che, nel resto del Paese, si attesta al 20 per cento.

I numeri che contraddistinguono il servizio TPL offerto dall'Azienda per la Mobilità Aquilana sono come segue:

Estensione del territorio servito (kmq)	500
Residenti nel territorio servito	72.000
Estensione della rete (km)	400
Numero di linee principali feriali (2013)	28
Numero di linee principali festive (2013)	7
Numero di autobus (2013)	93
Chilometri annui complessivi (2012)	4.169.930
Numero annuo di viaggiatori trasportati (2012)	4.133.908
Numero di dipendenti AMA (2013)	147
Ricavo dai biglietti (2013)	1,8 M€

Come già riportato in precedenza l'obiettivo del caso di studio è stato quello di valutare la fattibilità tecnica e la sostenibilità economica relative all'introduzione di flotte di minibus a trazione elettrica nella città de L'Aquila.

Lo studio si proponeva in particolare di verificare l'impiego di minubus elettrici in sostituzione dei minibus "CACCIAMALI TCC635L", con motori a combustione interna, attualmente utilizzati dall'AMA sulle due linee

a bassa frequentazione che collegano il Terminal di Collemaggio, adiacente al centro storico de L'Aquila, con le frazioni Foce di Sassa alla periferia ovest (linea "12A") e Bagno Grande alla periferia sud-est (linea "10").

Il minibus "Cacciamali TCC635L" con alimentazione a gasolio ha una lunghezza di 6,5 metri e una larghezza di 2,1 metri. Il modello Cacciamali TCC635L ha una potenza di 100 KW (cilindrata di 3908 cc) ed una capacità di 31 passeggeri con 13 posti a sedere.

Figura 3-5: Il minibus Cacciamali TCC635L

La linea "12 A" ha una lunghezza di circa 22 km nella tratta Terminal Collemaggio – Foce di Sassa. In questa tratta il percorso si sviluppa lungo via della Crocetta, via Cencioni, via Panella, viale della Croce Rossa, via Beato Cesidio, via Paolucci, via Piccinini,- la S.S.17 ovest, via Saragat, la S.S.584 Genzano, Sassa, Palombaia, via Ponte San Giovanni e via Piagge. Il percorso della tratta Foce di Sassa-Terminal Collemaggio è lungo invece poco meno di 20 km e si snoda lungo via Ponte San Giovanni, Palombaia, Sassa, la S.S.584 Genzano, via Saragat, la S.S.17 ovest, viale Corrado IV, viale della Croce Rossa, via Panella, via Cencioni e via della Crocetta.

La linea "10" ha un percorso di circa 11 km sulla tratta Terminal Collemaggio- Bagno Grande che passa per via Francesco Crispi, via Porta Napoli, via Pratelle S.Antonio, la s.s.615, la s.s. 5 bis, la ctr.lilletta (Cominio), il MAP bagno, vallesindola e ripa. Il percorso inverso lungo circa 12 km passa per Ripa, Vallesindola, ctr.lilletta (Cominio), bv.bagno, via san Giuseppe, bv.pianola, MAP pianola, bv. Totani, via Pratelle S.Antonio, via Porta Napoli, via Francesco Crispi e il circuito Collemaggio.

Figura 3-6: Percorsi attuali delle linee "10" e "12 A"

3.3 La campagna di acquisizione dei dati

Come già evidenziato nelle sezioni precedenti una fase principale dello studio svolto è consistita nell'applicazione del modello di simulazione della dinamica di marcia del minibus elettrico per valutare la fattibilità tecnica di impiego per il servizio urbano di trasporto collettivo nella città dell'Aquila nelle diverse ipotesi di sistema di ricarica.

L'applicazione del modello di simulazione è stata, in particolare, finalizzata alla stima semplificata del fabbisogno energetico del minibus elettrico nelle reali condizioni di esercizio e alla verifica della compatibilità delle prestazioni del veicolo con le caratteristiche del profilo di missione e del profilo altimetrico per diversi scenari di ricarica parziale (% di ricarica durante la missione, numero di stazioni di ricarica)

Lo studio di fattibilità tecnica è stato preceduto da una campagna di monitoraggio per l'acquisizione di dati sul profilo di missione caratteristico del minibus Cacciamali TCC635 impegnato sulle linee "10" e "12 A". La campagna di monitoraggio, effettuata grazie alla speciale e preziosa collaborazione della direzione e del personale operativo dell'AMA, è stata svolta a più riprese inclusa la delicata fase di messa a punto e validazione della strumentazione di misura.

Per l'esecuzione della campagna di monitoraggio è stato preso in considerazione il programma di esercizio, sia invernale che estivo, predisposto dall'Ufficio Movimento dell'AMA che prevede giornalmente per uno stesso minibus servizi su entrambe le due linee e che include anche i trasferimenti del minibus dal deposito ai capolinea e viceversa. Il deposito dell'AMA è situato in prossimità della S.S.17 nella zona industriale della frazione Campo di Pile che si trova ad ovest rispetto al centro storico de L'Aquila.
Il programma di esercizio invernale prevede come inizio turno, alle ore 6:45 del mattino, il trasferimento del minibus dal deposito al capolinea Foce di Sassa. Il percorso di trasferimento Deposito-Foce di Sassa, che ha una lunghezza di circa 12 chilometri, si snoda lungo la SS17, attraversa la frazione di Sassa e Palombaia e prosegue su via Ponte San Giovanni e via Piagge.

Una volta raggiunto il capolinea di Foce di Sassa (ore 7:10), il minibus effettua la prima corsa sulla tratta Foce di Sassa-Terminal Collemaggio della linea "12 A". Successivamente dalle ore 8:00 alle ore 10:10 il minibus effettua due corse andata e ritorno sulla linea 10 che collega il terminal "Collemaggio" con la frazione Bagno Grande. Dopo una sosta di circa 70 minuti, il minibus effettua dalle ore 11:20 alle ore 12:25 una nuova corsa di andata e ritorno sulla linea "10". Alle ore 12:40 il minibus riparte per effettuare il servizio sulla tratta Terminal Collemaggio-Foce di Sassa della linea "12 A" per poi ritornare al deposito alle ore 13:50.

Nel pomeriggio alle ore 14:10 il minibus effettua uno spostamento di 9 km circa dal deposito al terminal "Collemaggio", poi effettua il servizio sulla tratta Terminal Collemaggio-Foce di Sassa della linea "12 A" e infine ritorna al deposito. La percorrenza giornaliera realizzata dal minibus nel programma di esercizio invernale è pari a circa 178 chilometri.

Il programma di esercizio estivo è decisamente più impegnativo in termini di percorrenze rispetto al programma di esercizio invernale. La distanza giornaliera percorsa dal minibus nel turno estivo ammonta a circa 246 chilometri.

Nel turno mattutino il programma di esercizio estivo rimane invariato rispetto a quello invernale, mentre nel turno pomeridiano, dopo aver raggiunto il terminal Collemaggio dal deposito la navetta effettua cinque corse andata e ritorno sulla tratta Terminal Collemaggio – Bagno Grande della linea "10" prima di ritornare al deposito.

Figura 3-7: Percorsi per il trasferimento del minibus dal deposito ai capolinea

Il percorso della tratta di trasferimento del minibus dal terminal Collemaggio al deposito è lungo circa 9 chilometri e passa per viale Collemaggio, viale Francesco Crispi, via Porta Napoli, via Pratelle, la strada statale 684 “tangenziale sud” con l’attraversamento della galleria Monteluco (lunga 1850 m), via Giovanni Gronchi e infine via Campo di Pile. Il percorso inverso dal Deposito al terminal Collemaggio include le stesse strade dell’andata.

Per il monitoraggio del minibus è stato messo a punto un dispositivo portatile con ricevitore GPS in grado di acquisire e registrare i dati con cadenza temporale di un secondo sulla posizione geografica (in termini di latitudine, longitudine e altitudine) e sulla velocità istantanea assunta dal minibus durante l’esercizio sulle linee “10” e “12 A”, inclusi i trasferimenti dal deposito ai capolinea e viceversa.

Per la definizione dei profili di missione sono state successivamente effettuate le operazioni di filtraggio e smoothing delle serie dei dati di posizione e velocità misurati a bordo per ciascuna tratta percorsa al fine di ridurre eventuali errori dovuti a varie cause.

Oggigiorno i comuni ricevitori GPS hanno un margine di errore di 10-20 metri, mentre quelli più recenti e accurati hanno un margine ancora più basso. I motivi sono molteplici e possono anche sommarsi tra loro:
ritardo atmosferico: il segnale dei satelliti rallenta attraversando l'atmosfera. Il sistema viene corretto con un calcolo di ritardo medio, che quindi non è preciso;
percorsi multipli: i segnali GPS possono venire riflessi da alti edifici o da montagne prima di raggiungere il ricevitore. Questo incrementa leggermente il tempo di arrivo;
orologio del ricevitore: l'orario del ricevitore GPS potrebbe non essere perfettamente sincronizzato con l'orologio atomico;
errori orbitali: i satelliti potrebbero essere leggermente fuori rotta;
geometria satellitare: più i satelliti cui si è collegati sono distanti tra loro, maggiore è l'accuratezza delle misurazioni. Viceversa, più sono raggruppati, minore potrebbe risultare la precisione;
numero dei satelliti visibili: più sono i satelliti “in vista” del ricevitore GPS, maggiore sarà la precisione di posizionamento. Edifici, montagne, interferenze elettromagnetiche e anche il denso fogliame degli alberi possono bloccare la ricezione del segnale provocando un errore di posizionamento o addirittura il mancato posizionamento.

Le operazioni di filtraggio e livellamento delle serie dei dati misurati, necessarie a limitare l'errore intrinseco del ricevitore GPS, hanno consentito di definire i profili di missione del minibus sui percorsi di andata e ritorno delle linee e sui percorsi che collegano il deposito ai capolinea.
Successivamente è stata messa a punto e applicata una procedura software in grado di generare i profili altimetrici degli itinerari associati a ciascuna tratta e ai percorsi di trasferimento dal deposito ai capolinea e viceversa. La procedura ha permesso di associare a ciascuna coppia di coordinate geografiche (latitudine e longitudine) espresse in WGS84 le altitudini fornite dal server di Google Earth, sicuramente più precise ed affidabili di quelle fornite dal ricevitore GPS. Anche i profili altimetrici sono stati in seguito sottoposti a operazioni di smoothing per attenuare gli errori nelle misure di latitudine e longitudine del ricevitore GPS.

In definitiva la campagna di monitoraggio, 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.
I dati tecnici del minibus, le informazioni sul numero di passeggeri trasportati e 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 e 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.
Nella Figura 3-9, Figura 3-10 e Figura 3-11 sono riportati i risultati finali del processo sopra descritto.
Le velocità medie sostenute dal minibus sulle linee “10” e “12A” è intorno ai 20 Km/h, mentre sui percorsi di trasferimento dal deposito ai capolinea è di poco superiore ai 30 km/h. I percorsi delle linee oggetto di studio sono piuttosto vari caratterizzati da tratti in salita e discesa. I capolinea di Foce di Sassa e Bagno Grande, rispettivamente della linea “12 A” e “10”, si trovano ad un’altitudine di poco superiore agli 800 metri. Per raggiungerli il minibus deve affrontare lunghi tratti in salita con pendenze piuttosto impegnative (7-8%). Anche i tratti per raggiungere il centro storico, posto su un altopiano a 720 metri sul livello del mare, sono caratterizzati da pendenze superiori al 3%.
Nel corso della campagna di monitoraggio sono state effettuate misure sui consumi di carburante realizzati dal minibus sia nelle condizioni di esercizio a vuoto che con zavorra a bordo equivalente a 14 passeggeri. Le misure riguardano l’intero percorso comprendente le tratte di andata e ritorno della linea 10 e le tratte di trasferimento dal deposito al terminal Collemaggio e viceversa.
Le misure indicano un incremento del consumo specifico di gasolio nel percorso con il minibus zavorrato intorno al 17% rispetto ai 0,28 litri/km (2,85 kwh/km) realizzati con il veicolo senza carico.

Figura 3-8: Il minibus zavorrato

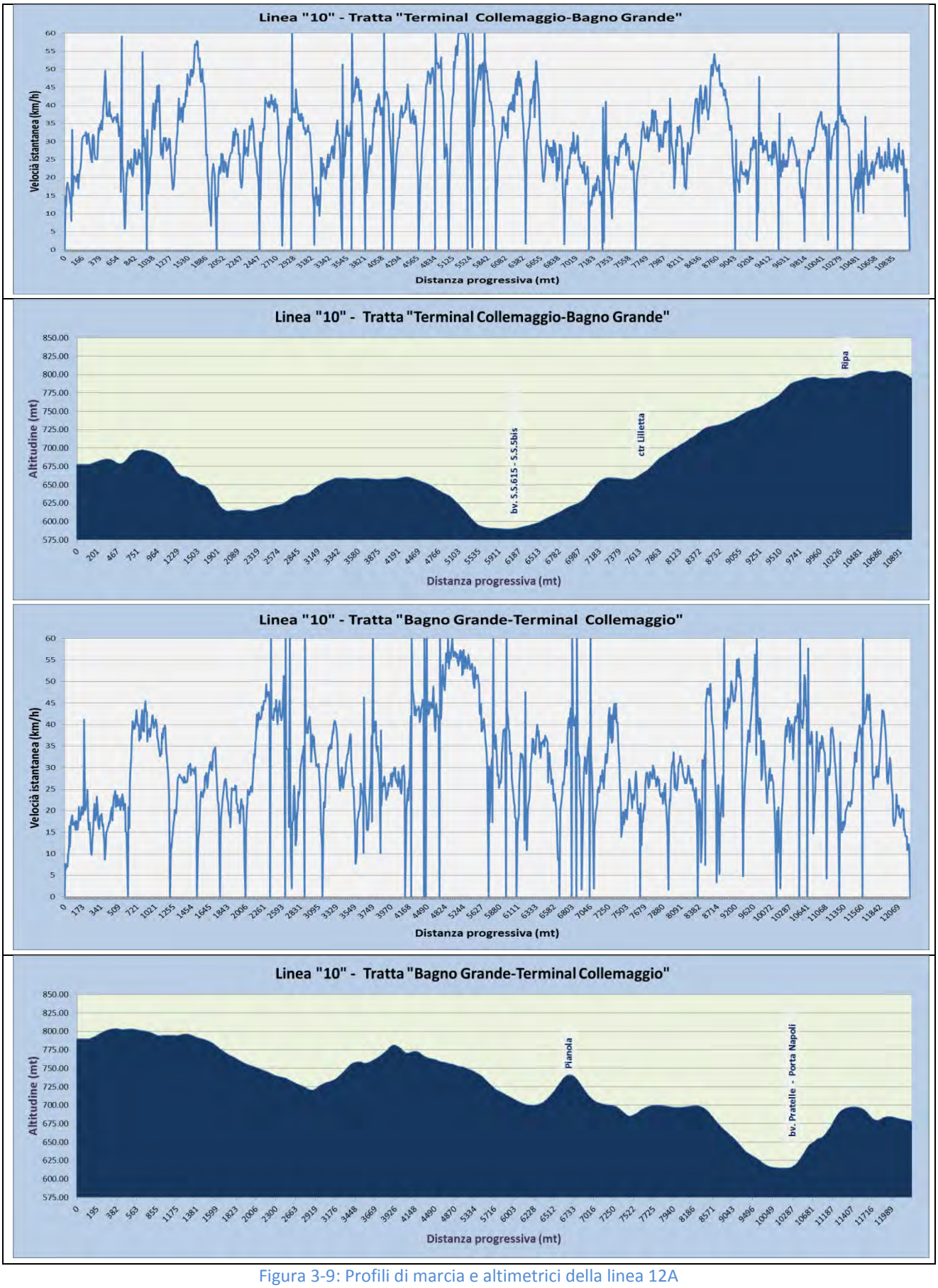


Figura 3-9: Profili di marcia e altimetrici della linea 12A

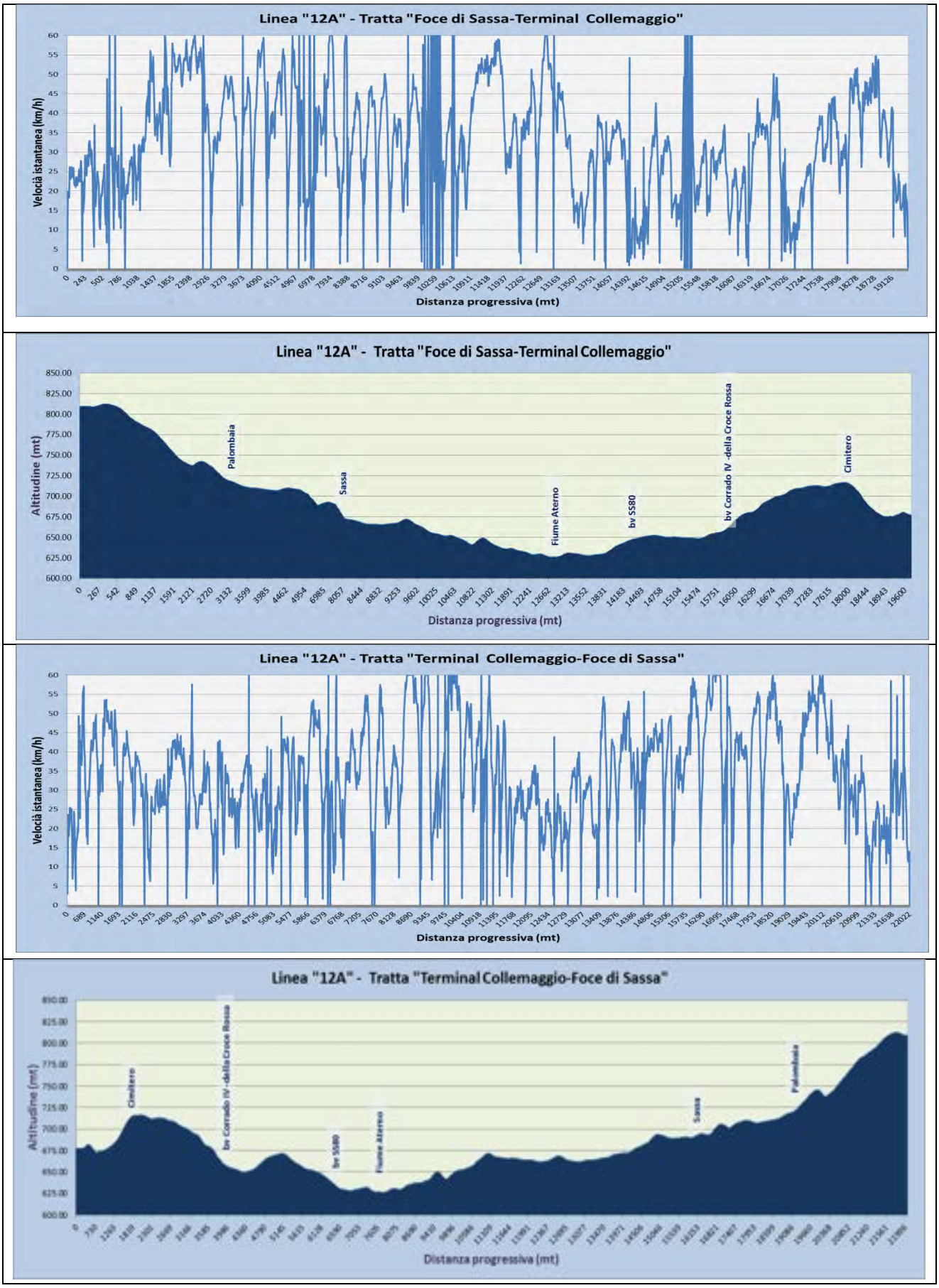


Figura 3-10: Profili di marcia e altimetrici della linea 12A

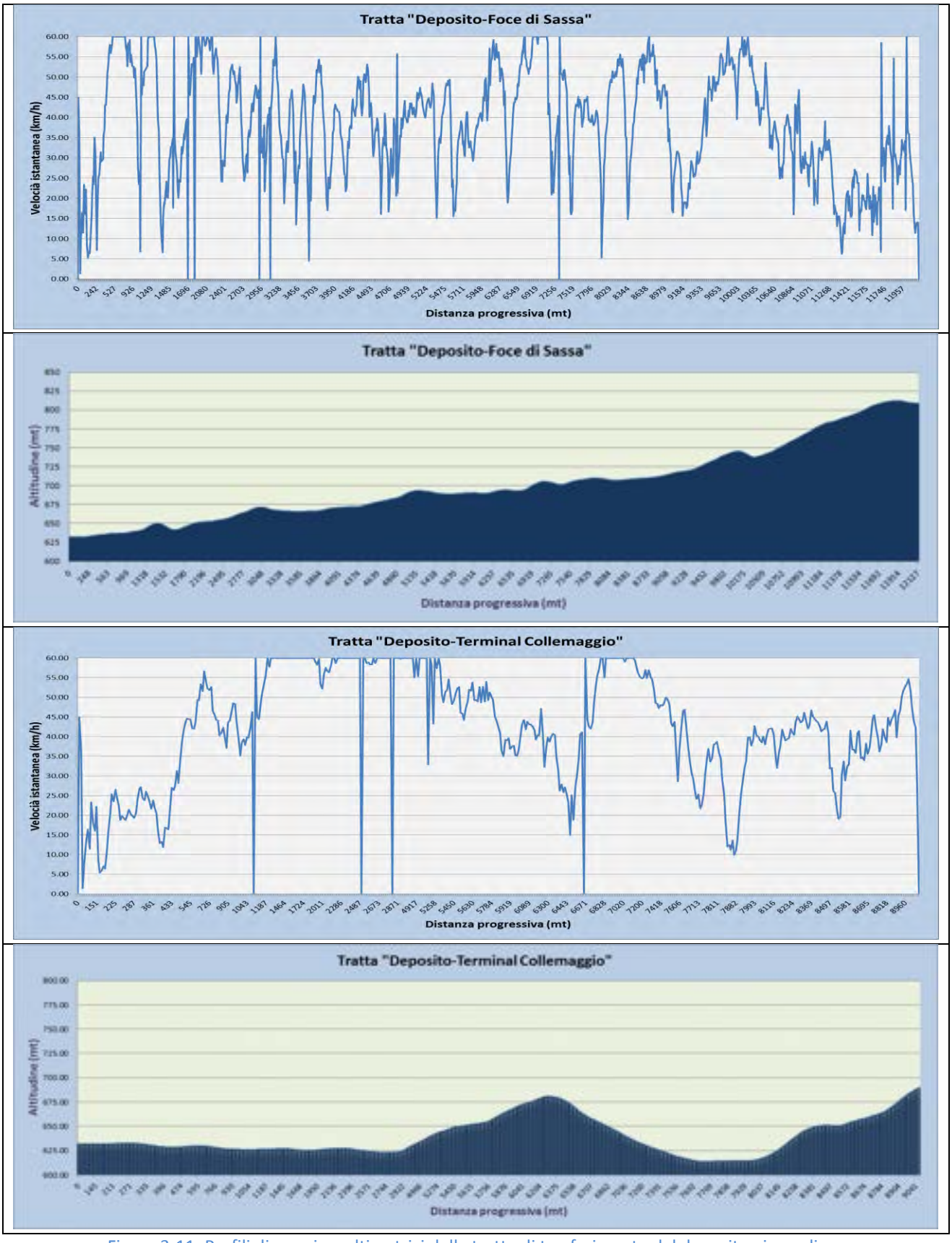


Figura 3-11: Profili di marcia e altimetrici delle tratte di trasferimento dal deposito ai capolinea

4. Verifica della fattibilità tecnica di elettrificazione

4.1 Predimensionamento del veicolo e del sistema di ricarica

Il caso di studio esaminato si riferisce a linee di trasporto pubblico servite da veicoli di modeste dimensioni ma di prestazioni piuttosto elevate, in grado di raggiungere velocità anche di 70 km/h e di superare forti pendenze come quelle presenti a L'Aquila.

Per tali missioni è ipotizzabile l'impiego di veicoli elettrici delle dimensioni del Tecnobus Gulliver già utilizzato per la calibrazione del modello di simulazione, purché siano apportate sostanziali modifiche al powertrain per poter garantire un profilo di velocità simile a quello del veicolo convenzionale attualmente in esercizio .

In più, il sistema di accumulo può essere dimensionato considerando la possibilità di effettuare delle operazioni di ricarica rapida durante le soste previste dal programma di esercizio reale ipotizzando l'istallazione di una o più stazioni di ricarica rapida in corrispondenza dei luoghi di sosta.

Per quanto riguarda il powertrain, dovendo riprogettare l'azionamento per raggiungere le velocità tipiche di una linea che percorre anche strade extraurbane, si è scelto un motore in grado di poter erogare una potenza di 80 kW. Tali potenze, con una tensione di link di 72V, come quella del Tecnobus Gulliver, richiedono correnti troppo elevate, all'incirca di 1110 A, quindi, dovendo scegliere un motore differente, si utilizzeranno tensioni più elevate in modo da riportare le correnti su valori accettabili.

La nuova tensione sarà di 400V e, di conseguenza, la corrente massima erogabile scenderà a 200 A.

Il nuovo motore sarà un motore in corrente alternata, considerato più efficiente del classico motore in corrente continua che è installato sui Tecnobus Gulliver U520 ESP.

Ne deriva un rendimento dell'azionamento (motore più inverter) leggermente più alto con un lieve miglioramento in termini di consumo energetico (Figura 4-1).

Descrizione | Dati tecnici | ⚓ Versione per barche

Motore elettrico asincrono AC trifase	N80		
Tensione nominale*	300Vdc	400Vdc	500Vdc
Potenza nominale	60kW	80kW	100kW
Regime nominale	2000rpm	2800rpm	3600rpm
Coppia massima	500Nm		
Lunghezza mm	410		
Diametro mm	320		
Rendimento massimo	92%		
Velocità massima	6000 rpm		
Raffreddamento	a liquido		
Protezione	IP65		

* tensione di alimentazione del controller

Figura 4-1: Esempio di motore elettrico in alternate trifase da 80 kW a 400V

Il sistema di accumulo subirà molte modifiche: si passerà da un pacco batterie al piombo acido da 585 Ah e 72V a un pacco batterie a di tipo (LiFePO4) con tensione di cella di 3.2V. Tale pacco avrà una capacità comparabile con quella al piombo, ma una tensione differente e correnti massime e minime molto maggiori.

Questo consentirà di erogare le correnti necessarie per avere gli 80 kW di potenza e di recuperare energia in frenata, cosa che attualmente sul Gulliver non era abilitata. Le celle sono raggruppate in moduli da 12.8 V (4 in serie) e sono distanziate in modo da poter essere raffreddate.

Figura 4-2: I moduli da 100 Ah(insieme a quelli da 30 e 60 Ah) utilizzati nelle simulazioni.

Tabella 4-1: Specifiche del Sistema di accumulo del Tecnobus Gulliver U520esp modificato

Tecnologia Batteria	LiFePO4
Capacità nominale	100 Ah
Tensione nominale di cella	3.2V
Celle in serie	128
Celle in parallelo	1
Tensione nominale	409.6
Energia nominale	40.96 kWh

Per quanto riguarda il sistema di ricarica, una soluzione in corrente continua, come quella che si ritiene praticabile nel presente studio, ha una potenza massima di 50 kW.
In Figura 4-3 si riporta una stazione di ricarica in corrente continua con protocollo CHADEMO prodotta dalla Circutor in grado di erogare 50 kW di potenza di ricarica e 125 A di corrente massima, che il pacco batterie è in grado poter accettare.

Figura 4-3: Stazione di ricarica in corrente continua con protocollo CHADEMO prodotta dalla Circutor

In prima approssimazione, si ipotizza l'istallazione di due stazioni di ricarica del tipo appena illustrato, una corrispondenza del Terminal bus centrale e l'altra presso il Deposito autobus.

4.2 Verifica mediante simulazione

Per verificare l'adeguatezza del sistema di trazione elettrica ipotizzato alle condizioni di esercizio nel caso di studio sono state effettuate delle simulazioni relative all'intero esercizio giornaliero, sia nel programma estivo che in quello invernale. Per ogni tratta dell'intero esercizio è stato calcolato il consumo in Kwh. Nelle

tratte interessate dalla presenza di passeggeri è stato considerato un pieno carico di 30 persone, per un peso pari a 5500 kg. E' presumibile che non sempre il bus Gulliver viaggerà a pieno carico, quindi i risultati si riferiscono ad una condizione limite. Per le tratte invece in cui il bus esce o rientra in deposito non è stata considerata la presenza di passeggeri e pertanto è stato considerato un peso pari a 3900 kg, corrispondente al peso a vuoto del veicolo. Da verifiche preliminari, considerando gli esercizi estivo e invernale attualmente in vigore, non risulta possibile portare a compimento, l'intero programma in quanto, nonostante l'effettuazione di ricariche rapide (parziali) durante le soste programmate, lo Stato di Carica (Soc) assume valori negativi, così come evidenziato nelle Tabella 4.2 e Tabella 4-3. E' opportuno invece che tale valore non scenda al di sotto del 20%. (Per l'identificazione delle tratte vedere la legenda in Tabella 4.4)

Tabella 4-2: Esercizio invernale

Orario inizio	Durata sosta da esercizio (min)	Durata giro (min)	Velocità (km/h)	Tratta	Metri	Massa	Consumo (kwh)	Consumo unitario (kwh/km)	Energia Ricarica (kWh)	kwh batt	SOC%
										40,96	100,00
06:50		00:20	36,39	"A1"	12.130	3.400	7,27	0,60		33,69	82,25
07:10		00:50	23,63	"B1"	19.688	5.500	10,41	0,53		23,28	56,84
08:00		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		14,49	35,38
08:25		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		8,64	21,09
sosta programmata	00:10								4,17	12,81	31,27
09:10		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		4,02	9,81
09:35		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		-1,83	-4,48
sosta programmata	01:15								42,79	40,96	100,00
11:25		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		32,17	78,54
11:50		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		26,32	64,26
sosta programmata	00:15								8,33	34,65	84,60
12:40		00:40	33,05	"B2"	22.032	5.500	15,69	0,71		18,96	46,30
13:20		00:35	20,75	"A2"	12.104	3.400	3,77	0,31		15,19	37,09
13:55		00:20	27,19	"D1"	9.064	3.400	4,78	0,53		10,41	25,42
14:15		00:45	29,38	"B2"	22.032	5.500	15,69	0,71		-5,28	-12,88
15:00				"A2"	12.104	3.400	3,77	0,31		-9,05	-22,09

Tabella 4-3: Esercizio estivo

Orario Inizio	Durata sosta da esercizio (min)	Durata giro (min)	Velocità (km/h)	Tratta	Metri	Massa	Consumo kwh	Consumo unitario (kwh/km)	Energia Ricarica (kWh)	kwh batt	SOC%
										40,96	100,00
06:45		00:25	29,20	"A1"	12.168	3.400	7,37	0,61		33,59	82,01
07:10		00:50	23,63	"B1"	19.691	5.500	10,53	0,53		23,06	56,30
08:00		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		14,27	34,84
08:25		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		8,42	20,56
sosta programmata	00:10								4,17	12,59	30,73
09:10		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		3,80	9,27
09:35		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		-2,05	-5,01
sosta programmata	01:15								43,01	40,96	100,00
11:25		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		32,17	78,54
11:50		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		26,32	64,26
12:25		00:20	28,08	"D2"	9.360	3.400	3,47	0,37		22,85	55,79
sosta programmata	01:20								18,11	40,96	100,00
14:05		00:15	39,84	"D1"	9.961	3.400	4,92	0,49		36,04	87,99
14:20		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		27,25	66,53
14:45		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		21,40	52,25
sosta programmata	00:40								19,56	40,96	100,00
16:00		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		32,17	78,54
16:25		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		26,32	64,26
sosta programmata	00:40								14,64	40,96	100,00
17:40		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		32,17	78,54
18:05		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		26,32	64,26
sosta programmata	00:20								12,50	38,82	94,78
19:00		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		30,03	73,32
19:25		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		24,18	59,03
sosta programmata	00:10								4,17	28,35	69,21
20:10		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		19,56	47,75
20:35		00:20	36,53	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		13,71	33,46
20:55				"D2"	9.360	3.400	3,47	0,37		10,24	24,99

Tabella 4-4: Legenda tratte degli esercizi invernale ed estivo

A1	Deposito-Foce
A2	Foce-Deposito
B1	Capolinea 12a -Terminal
B2	Terminal- Capolinea 12a
C1	Terminal- Capolinea 10
C2	Capolinea 10-Terminal
D1	Deposito-Terminal
D2	Terminal-Deposito

Risulta pertanto necessario inserire delle nuove soste e/o prolungare alcune delle già presenti per poter effettuare delle ricariche che consentano di portare a termine l'intero esercizio giornaliero. Si verifica mediante simulazione che piccole modifiche all'attuale programma di esercizio consentono lo svolgimento dell'intero programma di servizio, (vedi Tabella **4-5**, Tabella **4-6**).

Tabella 4-5: Esercizio invernale modificato

Orario inizio	Durata sosta da esercizio (min)	Durata giro (min)	Tratta	Metri	Massa	Consumo (kwh)	Consumo unitario (kwh/km)	Energia Ricarica (kWh)	kwh batt	SOC%
									40,96	100,00
06:50		00:20	"A1"	12.130	3.400	7,27	0,60		33,69	82,25
07:10		00:50	"B1"	19.688	5.500	10,41	0,53		23,28	56,84
08:00		00:25	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		14,49	35,38
08:25		00:35	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		8,64	21,09
sosta programmata da allungare	00:25							16,67	25,31	61,78
09:25		00:25	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		16,52	40,32
09:50		00:35	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		10,67	26,04
sosta programmata da diminuire	01:00							30,29	40,96	100,00
11:25		00:25	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		32,17	78,54
11:50		00:35	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		26,32	64,26
sosta programmata da allungare	00:25							14,64	40,96	100,00
12:50		00:40	"B2"	22.032	5.500	15,69	0,71		25,27	61,69
13:30		00:35	"A2"	12.104	3.400	3,77	0,31		21,50	52,49
Soste da inserire	00:20							12,5	34,00	83,01
14:25		00:20	"D1"	9.064	3.400	4,78	0,53		29,22	71,34
14:45		00:45	"B2"	22.032	5.500	15,69	0,71		13,53	33,03
15:30		00:30	"A2"	12.104	3.400	3,77	0,31		9,76	23,83

Tabella 4-6: Esercizio estivo modificato

Orario	Durata sosta da esercizio (min)	Durata giro (min)	Velocità (km/h)	Tratta	Metri	Massa	Consumo kwh	Consumo unitario (kwh/km)	Energia Ricarica (kWh)	kwh batt	SOC%
										40,96	100,00
06:45		00:25	29,20	"A1"	12.168	3.400	7,37	0,61		33,59	82,01
07:10		00:50	23,63	"B1"	19.691	5.500	10,53	0,53		23,06	56,30
08:00		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		14,27	34,84
08:25		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		8,42	20,56
sosta programmata da allungare	00:25								16,67	25,09	61,25
09:25		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		16,30	39,79
09:50		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		10,45	25,50
sosta programmata da diminuire	01:00								30,51	40,96	100,00
11:25		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		32,17	78,54
11:50		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		26,32	64,26
12:25		00:20	28,08	"D2"	9.360	3.400	3,47	0,37		22,85	55,79
sosta programmata	01:20								18,11	40,96	100,00
14:05		00:15	39,84	"D1"	9.961	3.400	4,92	0,49		36,04	87,99
14:20		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		27,25	66,53
14:45		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		21,40	52,25
sosta programmata	00:40								19,56	40,96	100,00
16:00		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		32,17	78,54
16:25		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		26,32	64,26
sosta programmata	00:40								14,64	40,96	100,00
17:40		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		32,17	78,54
18:05		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		26,32	64,26
sosta programmata	00:20								12,50	38,82	94,78
19:00		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		30,03	73,32
19:25		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		24,18	59,03
sosta programmata	00:10								4,17	28,35	69,21
20:10		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		19,56	47,75
20:35				"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		13,71	33,46
				"D2"	9.360	3.400	3,47	0,37		10,24	24,99

Per entrambi gli esercizi risulta necessario aumentare la prima sosta da 10 minuti a 25 minuti per consentire al veicolo di portare a termine la prima fase del servizio giornaliero. Per non modificare eccessivamente gli orari della mattina, e per far si che non aumentino eccessivamente i minuti di pausa, si

può pensare di ridurre la seconda sosta da 75 minuti a 60. Nell'esercizio invernale è necessario inoltre inserire ex novo una sosta pomeridiana per consentire una ricarica della batteria.
Con le modifiche così apportate il Soc, per entrambi gli esercizi, non scende mai al di sotto del 20%.
Nell'esercizio invernale così come riformulato rispetto a quello di origine, si prevedono 30 minuti in più di sosta, per un totale di 2 ore e 10 minuti. Le ore di esercizio risultano essere 7.
Nell'esercizio estivo invece le ore di sosta sono 4 ore e 35 minuti (non c'è variazione rispetto all'esercizio di origine) mentre le ore di esercizio risultano essere 9 ore e 15 minuti.

5. Analisi Costi Benefici

5.1 Generalità

L'Analisi Costi-Benefici (ACB) rappresenta lo strumento metodologico di riferimento per la valutazione dei vantaggi/svantaggi economici monetizzati relativi al confronto di un progetto rispetto ad investimenti alternativi oppure rispetto allo status quo "senza progetto". Tale procedura consente di desumere informazioni utili per la fase decisionale.

La valutazione relativa alla convenienza del progetto, si fonda su tre tecniche di diversa impostazione, che contabilizzano i costi/benefici a seconda sia del soggetto rispetto al quale occorre effettuare la valutazione (privato, pubblico) sia dei conseguenti obiettivi (profitto, benessere sociale, welfare) che si vogliono raggiungere, fornendo ognuna un diverso livello di informazione.

L'ACB finanziaria interessa maggiormente i privati e persegue l'obiettivo del profitto attraverso l'efficienza finanziaria in base ai prezzi di mercato, essa rappresenta la base di partenza per la successiva ACB economica, alla quale è maggiormente interessato il settore pubblico. Tuttavia, l'analisi economica è utile anche agli operatori privati che vogliano allargare l'orizzonte temporale osservato (progetti di lungo respiro) e vogliano misurare i benefici e i costi economici di diversi soggetti (surplus del consumatore/produttore) attraverso la stima del costo-opportunità dei fattori della produzione nonché della disponibilità a pagare (Willingness to Pay – WtP) dei potenziali utenti, seguendo i principi di efficienza economica. Per queste stime, potrà essere necessario adeguare i prezzi di mercato attraverso opportune correzioni fiscali e l'internalizzazione delle esternalità ed eventualmente, usare dei prezzi ombra, ossia, prezzi opportunamente depurati delle inefficienze del mercato (monopoli, barriere all'entrata, interventi dello Stato).

L'ACB sociale risponde a criteri di valutazione di natura puramente pubblica ed ha, come finalità, l'equità distributiva temporale e spaziale, quindi, il miglioramento del welfare. Questo tipo di analisi opera correzioni ai risultati in base all'attribuzione di diversi pesi distributivi (prezzi sociali) per i vari vantaggi e svantaggi legati all'investimento.

I progetti di investimento, oggetto di analisi, dispiegano i loro effetti in momenti temporali diversi, quindi i costi e i benefici associati, sono resi confrontabili tra loro attraverso l'operazione di attualizzazione. Si tratta di una procedura di calcolo che, sulla base di un tasso di sconto intertemporale (TdS) opportunatamente individuato, esprime il valore equivalente delle grandezze monetarie rispetto ad un medesimo riferimento temporale.

La valutazione dei costi-benefici in base alle tecniche sopra descritte, consente di estrarre degli indicatori sintetici circa l'opportunità e l'attuabilità del progetto e quindi, di definire un ordine di preferibilità tra più alternative. I criteri, dunque, su cui si baseranno le scelte sono:

- il rapporto dei benefici sui costi, entrambi attualizzati, auspicabilmente maggiore di 1;
- il Valore Attuale Netto (VAN) che attualizza i flussi netti futuri, auspicabilmente maggiore di 0;
- il Tasso Interno di Rendimento (TIR), ossia quel tasso che rende pari a 0 il VAN, dove quindi i benefici attualizzati uguaglieranno i costi attualizzati; è auspicabile sia maggiore del tasso di sconto;
- il Pay-back Period, infine, che permette di individuare il periodo di rientro dell'investimento iniziale.

Data la rigidità delle assunzioni operate nell'ambito dell'ACB rispetto a parametri, invece, piuttosto incerti, è opportuno accompagnare l'analisi stessa con una analisi di sensitività. Si tratta di individuare delle variabili critiche del progetto e ipotizzare delle opportune variazioni percentuali, in positivo e/o in negativo, rispetto ai valori di base. Le variazioni andranno applicate all'analisi sull'investimento una alla volta, mantenendo fissi gli altri parametri. Si potranno, così, valutare le variazioni degli indicatori economici e finanziari sintetici sopra descritti, rendendo meno arbitrario il giudizio sull'esito dell'investimento. Infine, l'analisi dei rischi, aggiunge informazioni sulla probabilità che si verifichino certi eventi, come appunto, le nostre ipotesi di variazione delle variabili critiche di progetto.

I principali limiti che incontra l'ACB sono relativi alla *misurabilità* della rispondenza dell'obiettivo alla massimizzazione del benessere sociale, alla *confrontabilità* di benefici che incidono diversamente sui vari soggetti e per i vari obiettivi, alla *monetizzazione* di grandezze non monetizzabili. Nonostante tali limiti, questo tipo di analisi rappresenta uno strumento estremamente efficace per fornire indicazioni quantitative circa la redditività, economica o finanziaria, di certi investimenti.

5.2 Applicazione al Caso di Studio

Nell'ottica del piano di ammodernamento della flotta degli autobus dell'azienda di trasporto pubblico locale AMA de L'Aquila, il progetto sottoposto ad ACB nel caso di studio del presente documento si riferisce all'acquisto di un bus elettrico quale investimento in alternativa all'acquisto di un bus tradizionale a combustione interna (C.I.) della stessa tipologia di quelli già utilizzati dell'AMA per le linea a domanda debole e, quindi, di ridotte dimensioni[6]. L'azienda dovrà valutare l'acquisto da effettuare in relazione al servizio da svolgere ed ai costi di investimento ed operativi nei due casi considerati.
L'analisi condotta per il confronto tra i due investimenti alternativi (bus elettrico o bus tradizionale), è stata sviluppata dal punto di vista economico. Partendo, quindi, dai dati finanziari a disposizione, sono state operate le opportune correzioni fiscali sui valori di prezzo e la stima dei costi esterni associati al progetto.
L'analisi economica condotta, ha messo a confronto esclusivamente i costi, quali elementi discriminanti dei due progetti, ponendo che i ricavi da tariffa rimangano uguali per le due alternative. Le voci analizzate sono: i costi di investimento (acquisto del bus e l'acquisto e l'installazione di due stazioni di ricarica veloce nel caso del veicolo elettrico) e i costi di esercizio (manutenzione, costo del vettore energetico, lubrificanti per il bus C.I. e ricambi delle batterie per il bus elettrico); non sono stati considerati, invece, i costi del personale di movimento, in quanto invarianti nei due casi.
Per la scelta del tasso di sconto da applicare al caso de L'Aquila, è stato fatto riferimento allo studio dell' Unione Europea[7] del 2008, per la valutazione degli investimenti pubblici cofinanziati dai Fondi Strutturali. Lo studio suggerisce in particolare un tasso di sconto economico pari al 5,5% per i Paesi della Coesione che si ritiene opportuno applicare all'impresa, in ragione della natura pubblica del servizio svolto dalla società aquilana e del fatto che la stessa, percepisce fondi pubblici per il servizio reso. Lo stesso studio, suggerisce un tasso di sconto economico per i Paesi in preadesione all'Unione Europea del 3,5% tasso che è stato preso come riferimento per l'ACB rivolta alla collettività, al fine di non penalizzare gli aspetti ambientali collegati alle esternalità altrimenti ulteriormente sottostimati da un più alto tasso di sconto.
I principali dati tecnico-economici relativi ai due progetti sono riassunti nella successiva Tabella **5-1**.
Per i due autobus è stata assunta una durabilità di 400.000 km. In base alle percorrenze annue sulle due linee esaminate nel presente studio (circa 65.200 km), il periodo osservato per la valutazione dell'investimento, è perciò, di circa 6 anni. Non trattandosi di un investimento infrastrutturale, l'anno dell'investimento coincide con il primo anno di operatività, convenzionalmente posto al 2014, al fine di circostanziare il prezzo dell'energia.

I costi d'investimento risultano essere molto onerosi per l'autobus elettrico, ciò è dovuto principalmente al prezzo d'acquisto di questa tipologia di mezzi, che è ancora molto elevato, in quanto il mercato non ha raggiunto ad oggi, una dimensione sufficiente a garantire una maggiore accessibilità economica alla tecnologia elettrica, nonostante il buon livello di maturazione tecnologica e le nuove opportunità legate alla ricarica rapida . Il prezzo di Listino 2015[8], inteso al netto dell'IVA per il Tecnobus Gulliver, infatti, suggerisce un prezzo che si aggira intorno ai 253.000€ (comprensivo del primo pacco batterie) a fronte di un prezzo di riferimento, per un bus a gasolio della taglia del Cacciamali TCC 635L, di circa 96.500€, al netto dell'IVA. Nell'analisi questi valori sono stati ridotti entrambi di un 15% per tenere conto degli sconti usualmente praticati alle Aziende di Trasporto dai concessionari delle case automobilistiche.
La tecnologia elettrica, necessita poi, nel caso di studio, di ulteriori investimenti rappresentati dalle stazioni di ricarica, che in questo caso sono due, e il ricambio dei pacchi batteria. Per quanto riguarda la stazione di ricarica è stato preso come riferimento un prezzo indicativo di circa 28.000€/ca, comprensivo dei costi di istallazione ed allacciamento alla rete elettrica; si tratta un costo alquanto elevato in considerazione delle particolari esigenze di potenza dell'impianto per poter fare fronte all'oneroso esercizio del veicolo nel caso di studio esaminato. Il prezzo è stato scorporato dell'IVA del 22% e diviso per cinque, in quanto si è ipotizzato potesse servire una piccola flotta di bus elettrici, pari appunto a 5 unità, immaginando che l'impiego di bus elettrici rientri all'interno di una strategia aziendale di ampio respiro.

[6] Si veda, in merito, la descrizione contenuta nel secondo capitolo
[7] Guida all'Analisi Costi-Benefici dei progetti d'investimento, 2008
[8] http://www.electricmobility.it/index.php/it/component/zoo/item/gulliver

Tabella 5-1: Dati tecnico-economici utilizzati per l'analisi di convenienza economica

		BEV	IC
		Gulliver Tecnobus	Caccialmali TCC 635L
INVESTIMENTI C/C			
Veicoli			
Prezzo veicolo (IVA esclusa)	*€*	215.050	82.025
Durabilità	*km*	400.000	400.000
Percorrenza media annua	*km*	65.200	65.200
Vita tecnica	*anni.*	6	6
Standard emissivo		EEV	Euro 5
Batterie			
Prezzo unit. batterie (IVA esclusa)	*€/kWh*	328	
Capacità pacco batterie	*kWh*	41	
Costo pacco batteria (IVA esclusa)	*€*	13.500	
Durabilità batterie Li-io	*km*	100.000	
Ricambi pacchi batteria	*n.*	4	
Stazioni di ricarica elettrica			
Costo acquisto&installazione (IVA esclusa)	*€/stazione*	28.000	
Stazioni di ricarica elettrica	*n. stazioni*	2	
Flotta veicoli elettrici	*n. veicoli*	5	
Costo complessivo stazioni per veicolo (IVA inclusa)	*€*	11.200	
COSTI DI ESERCIZIO			
Materiali di consumo e manutenzione			
Prezzo unitario energia *	*€/kWh-l*	0,161	1,057
Consumi energetici unitari	*kWh-l/km*	0,69	0,372
Percorrenza annuale	*km/anno*	65.201	65.201
Consumi energetici annuali	*kWh-l/anno*	45.266	24.268
Costo annuo lubrificanti	*€/anno*	0	680
Costo annuo materiali manutenzione	*€/anno*	4.409	8.818
Costo annuo personale manutenzione	*€/anno*	3.657	7.315

* Il prezzo dell'energia elettrica è quello fornito dall'AEEG-III trim 2014, utenti non domestici con potenza impegnata > 16,5 kW al netto delle imposte e dei costi fissi annui. Il prezzo del gasolio è quello fornito dalle rilevazione del Ministero dello Sviluppo Economico al 30.06.2014 al netto dell'iva e della parte di accisa rimborsata.

Fonte: elaborazione ENEA, su dati ENEA, Ministero Sviluppo Economico, AEEG, ASSTRA, Electrocmobility.

Le batterie montate sul bus sono agli ioni di litio (Li-Ion), il cui prezzo unitario di riferimento è di circa 400€/kWh[9]. Considerata l'energia necessaria per l'esecuzione del programma di esercizio, l'impegno finanziario per ogni pacco di batterie è di circa 14.000€ al netto dell'IVA. La durabilità assunta per ogni pacco batteria è, prudenzialmente, di 100.000 km, ciò significa che, per il caso di studio, la sostituzione deve avvenire dopo circa 18 mesi. Nel presente progetto è stato assunto l'acquisto di quattro pacchi batterie, piuttosto che solo dei tre strettamente necessari, per avere una riserva a disposizione in caso di emergenza.

Per quanto riguarda i valori residui dei beni acquistati alla fine dei 6 anni osservati, si è ipotizzato un valore pari al 10% del prezzo di acquisto per i bus, mentre per le batterie è stato assunto un valore residuo pari al

[9] Report RdS/2012/087

50% di quello di mercato nel momento della loro dismissione, dovuto alla possibilità di riciclare molta parte dei materiali utilizzati; nell'ultimo anno di analisi dovrà aggiungersi per intero il valore del pacco batteria di riserva ; per le stazioni di ricarica, avremo un valore economico residuo pari al costo storico al netto delle quote annuali di ammortamento.
Per quanto riguarda i costi di esercizio, la gestione del bus elettrico è molto meno onerosa rispetto a quella del bus a gasolio. I costi considerati come discriminanti nell' esercizio del bus elettrico rispetto a quello a combustione interna sono dati dai prezzi dei vettori energetici e dei lubrificanti, dal costo del materiale per la manutenzione e del rispettivo personale impiegato per la stessa.
Il prezzo dell'energia elettrica è stato calcolato come media dei prezzi rilevati dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG), alla data del 1 luglio 2014[10] relativo ad una utenza non domestica con una potenza impegnata superiore ai 16,5 kW; il prezzo per la quota energia è stato assunto al netto di oneri fiscali. Inoltre, in base a quanto stabilisce l'art. 52 del decreto legislativo n. 504/1995, il prezzo dell'energia elettrica è esente da accisa qualora sia impiegata per impianti o per l'esercizio di linee di trasporto urbano ed interurbano, questo è un elemento che, invece come si vedrà, pesa molto sul prezzo del gasolio per autotrazione. Il prezzo dell'energia elettrica negli ultimi 5 anni è aumentato ad un tasso medio annuo pari a circa il 3% (Figura **5-1**), quindi, al netto dell'effetto inflativo, è stato ipotizzato che il costo del vettore elettrico aumentasse del 2% all'anno, nel periodo osservato.
Per il gasolio si è fatto riferimento al prezzo medio rilevato dal Ministero per lo Sviluppo Economico al 30 giugno 2014[11] al netto dell'IVA e comprensivo della quota parte di accisa non rimborsata[12]. Per quanto riguarda l'evoluzione del prezzo del gasolio nel periodo considerato, è stato applicato il tasso medio annuo osservato negli ultimi 5 anni, pari all'8% circa (Figura **5-2**) che, depurato anch'esso dell'inflazione annuale, sarà del 7%. Si è ipotizzato, inoltre, che l'azienda di trasporto possa beneficiare di uno sconto del 10% sul prezzo alla pompa.

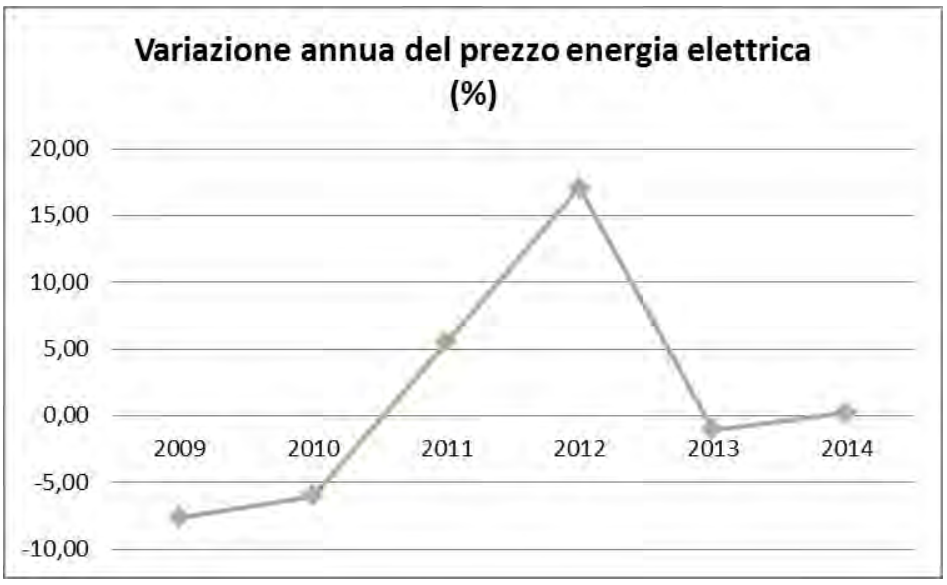


Figura 5-1: Variazione annua prezzo energia elettrica (%)
Fonte: elaborazione ENEA su dati AEEG

[10] http://www.autorita.energia.it/it/dati/condec.htm
[11] http://www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/prezzi_petroli/Struttura/Struttura_PI_2014_06_30.pdf
[12] Agenzia delle Dogane nota RU 68241 del 27/06/2014

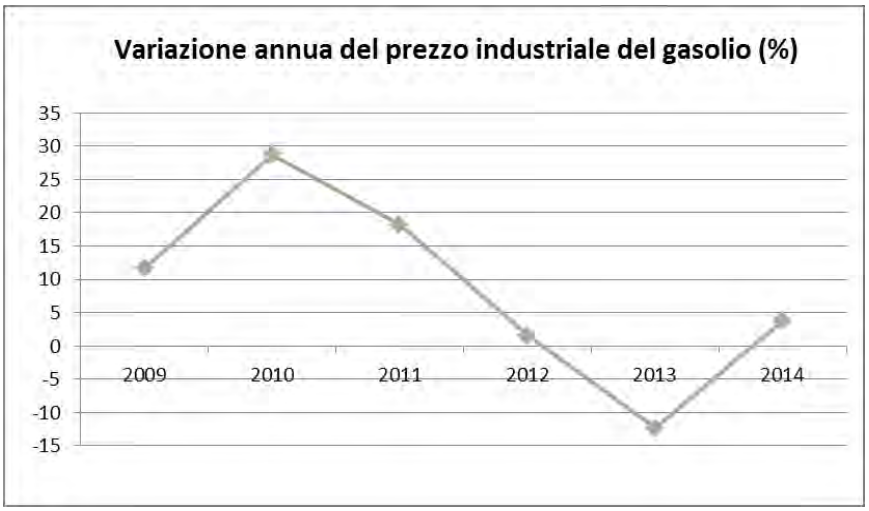


Figura 5-2: Variazione annua prezzo industriale del gasolio (%)

Fonte: elaborazione ENEA su dati Ministero Sviluppo Economico

Per i costi dei lubrificanti e della manutenzione del bus a gasolio, si è fatto riferimento a dati ASSTRA[13]. I costi relativi ai lubrificanti, ovviamente imputati in maniera esclusiva al bus a gasolio, sono stati calcolati per un consumo di circa 68 l/anno, ipotizzando un prezzo di 10 €/l al netto dell'IVA. Per i costi di manutenzione del bus elettrico, sia per il materiale che per il personale, in mancanza di riferimenti più precisi, è stato stabilito di attribuire una quota pari al 50% degli stessi costi imputati al bus a combustione interna.

Sulla base dei dati economici così raccolti, è stato elaborato lo scenario base dell'analisi costi-benefici, sia dal punto di vista dell'azienda di trasporto pubblico locale sia dal punto di vista della collettività. Gli elementi di distinzione tra le due analisi stanno fondamentalmente nella presenza delle accise non rimborsate all'interno del prezzo del carburante nella valutazione per l'impresa mentre invece nella valutazione per la collettività è stato considerato il prezzo al netto di tutte le imposte; inoltre in questo secondo caso sono stati considerati i costi delle esternalità connesse al consumo energetico.

Nel caso dell'alimentazione a combustione interna, la maggior parte degli impatti ambientali sono dovuti alle emissioni nocive in fase di esercizio del veicolo. Secondo le più recenti stime europee[14] i danni prodotti dalle principali emissioni nocive del trasporto terrestre per unità di tonnellata emessa, in Italia sono riconducibili ai valori riportati nella seguente Tabella **5-2**.

Tabella 5-2: Costi esterni unitari dei principali inquinanti del trasporto terrestre in Italia (€/tonn.)

Inquinante	Ambito	Valore_€2010/t
CO2	tutti	90
PM2.5	urbano	197.361
PM2.5	suburbano	50.121
PM2.5	rurale	24.562
NOx	tutti	10.824
VOC	tutti	1.242
SO2	tutti	9.875

Fonte: Elab. Enea su dati "Handbook of External costs of Transport", Gennaio 2014

[13] Commissione ASSTRA costi standard automobilistici "Un modello di calcolo del costo standard per il trasporto pubblico locale e regionale automobilistico", Roma 3 luglio 2013

[14] Update of the Handbook on External Costs of Transport, Gennaio 2014

Si osservi che, per alcune sostanze, il valore del danno è molto diversificato in funzione dell'ambito in cui si verifica l'emissione; infatti, per questi inquinanti risulta molto significativo il livello di sensibilità del contesto di emissione. Ciò si verifica in particolare, per il particolato (PM) che, anche per la frazione più sottile (< 2,5 μ), ovvero quella più dannosa per la salute degli esseri viventi, si concentra nel luogo di emissione senza diffondersi troppo nell'atmosfera mentre gli altri inquinanti possiedono maggiore capacità di dispersione per cui il contesto di emissione risulta meno dirimente ai fini della determinazione del danno potenzialmente prodotto.
Nel caso dei veicoli stradali a gasolio, le sostanze inquinanti più rilevanti sono proprio le polveri, insieme agli Ossidi di azoto (NOx), entrambi con gravi effetti sulla salute dell'uomo nell'intorno del luogo di emissione. Gli ossidi di azoto, inoltre, sono precursori dell'Ozono troposferico, la cui diffusione travalica i confini territoriali dell'ambito di emissione dando origine a inquinamento cosiddetto transfrontaliero; all'interno della troposfera l'Ozono è anch'esso dannoso alla salute. A ciò si aggiunga che la combustione del gasolio produce anidride carbonica e altri gas in grado di produrre surriscaldamento dell'atmosfera (effetto serra), oltreché piccole quantità di composti organici volatili (VOC) e Ossidi di Zolfo (SO2).
Considerando le emissioni caratteristiche del Cacciamali in servizio a L'Aquila[15] ed applicando i valori unitari di costo esterno relativi al contesto suburbano, il più conforme al caso di studio, si ottengono i valori di costo esterno per unità di percorrenza riportati nella seguente Tabella **5-3**.
Si osservi la prevalenza dell'impatto climalterante dovuto alla CO2 rispetto all'impatto degli altri inquinanti; ciò si lega all'ambito prevalentemente extraurbano del caso di studio, grazie al quale gli inquinanti con effetti diretti sulla salute producono danni molto inferiori rispetto a quelli che avrebbero provocato in un contesto più densamente popolato come quello urbano. Questa circostanza rende i risultati del confronto fra bus ad alimentazione e bus elettrico particolarmente conservativi rispetto ai benefici di ordine ambientale.

Tabella 5-3: Costi ambientali a km per Cacciamali in servizio all'Aquila

Inquinante	€cent(2010)/km
CO2	4,52
PM2.5	0,23
NOx	2,25
VOC	0,0024
SO2	0,0023
Totale	7,0090

Fonte: Elaborazione Enea

Nonostante tale particolare situazione, tuttavia, il costo del danno ambientale prodotto dal veicolo diesel è molto superiore a quello del veicolo elettrico. In questo caso, infatti, gli unici impatti di ordine ambientale sono quelli legati alla produzione di energia elettrica. I costi esterni della produzione di elettricità sono stati oggetto di un'analisi particolarmente approfondita condotta dall'EEA nel 2008, che ha prodotto le stime specializzate per i diversi Paesi Europei contenute nei due grafici sottostanti. I grafici riportano il confronto delle stime del danno medio per unità di kWh prodotto negli anni 1990 e 2005: il primo grafico è relativo a valutazioni conservative mentre il secondo a stime più largheggianti. La prima evidenza è che, nel tempo, la produzione elettrica diventa sempre meno dannosa, in tutti i Paesi senza nessuna eccezione; ciò si deve all'uso sempre più massiccio di fonti energetiche "pulite" e alla maggiore efficienza delle centrali alimentate da combustibili fossili.

[15] Tali valori sono stati desunti dalla banca dati ISPRA dei fattori di emissione, applicando un fattore correttivo che tenesse conto del maggiore consumo specifico registrato per il veicolo in esame nel corso della campagna di misura effettuata (vedi cap. 3)

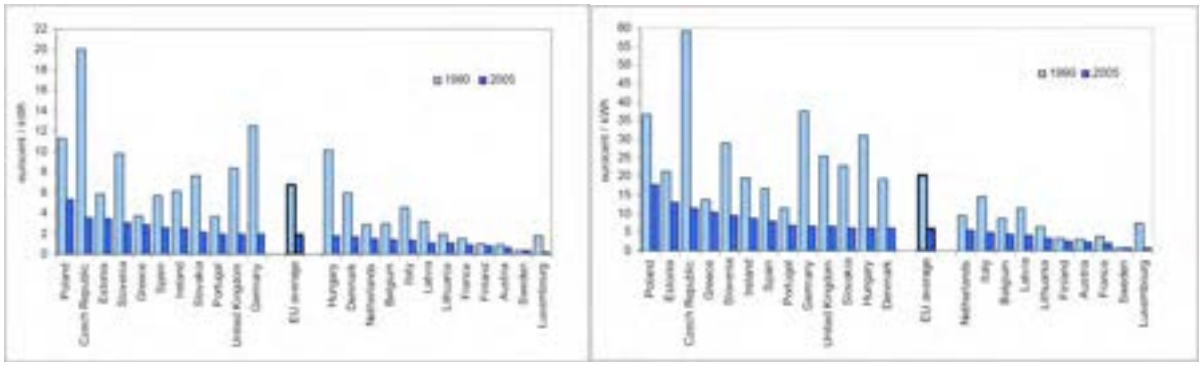


Figura 5-3: Costi esterni della produzione di energia elettrica, confronti europei, Fonte EEA 2008

Nel caso dell'Italia il gap fra il 1990 e il 2005 è particolarmente evidente in termini relativi, nonostante che già nel 1990 il livello di impatto della produzione elettrica nazionale fosse fra i più bassi, e comunque inferiore alla media EU. Nel 2005 il valore del danno prodotto si sarebbe attestato fra 2 e 5 €cent/kWh, quando i limiti dello stesso intervallo nel 1990 sarebbero stati 6 e 16 €cent/kWh. Ai fini della presente analisi si è ritenuto opportuno attenersi alle stime più basse, in considerazione del tempo trascorso dal 2005 ad oggi, circa un decennio durante il quale il parco elettrico nazionale ha proseguito il processo di innovazione tecnologica ed efficientamento a ritmi molto accelerati, come dimostrano anche i trend delle emissioni di CO_2 del parco elettrico italiano riportati nel grafico seguente.

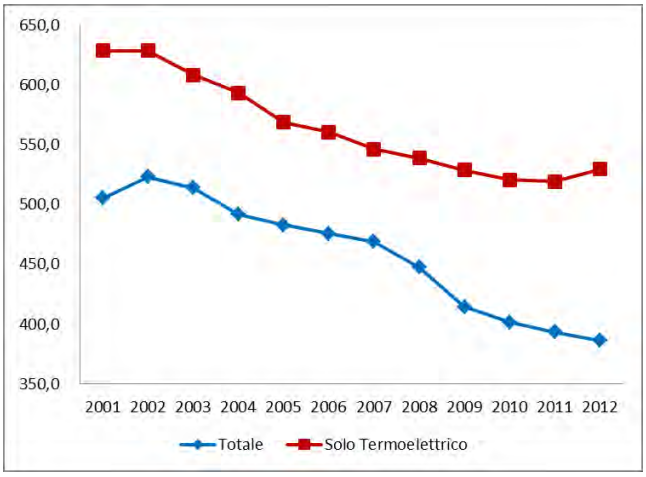


Figura 5-4: Fattori di emissione del parco elettrico italiano, elaborazione ENEA su dati ISPRA

Applicando il valore di 2 €cent/kWh al valore di consumo unitario medio di riferimento del veicolo elettrico in servizio sulle linee di studio all'Aquila si ottiene un costo esterno a km di circa 1,4 €cent/km, valore decisamente inferiore ai circa 7 €cent/km già visti per il bus diesel (-80%).
Le seguenti Tabelle riportano i valori dei flussi economici netti nello scenario di base rispettivamente per l'impresa e per la collettività. Il flusso netto è dato esclusivamente quale differenza tra i costi dei due progetti, quindi il segno meno sta ad indicate il maggior costo collegato al progetto del bus elettrico rispetto al progetto del bus C.I., mentre il segno positivo sta ad indicare il minor costo o beneficio, dell'investimento nel bus elettrico rispetto all'altro. Si osservi come, tranne che per il primo anno, in cui gravano negativamente gli investimenti per l'acquisto del veicolo elettrico e degli impianti di ricarica, per tutto il resto del periodo di esercizio esaminato, si generano flussi positivi relativi ai risparmi conseguiti nella gestione del bus elettrico, rispetto ai costi di manutenzione e ai costi energetici ed ambientali, che invece sono più onerosi nel caso del bus a combustione interna.

Tabella 5-4: SCENARIO DI BASE per l'Impresa

IMPRESA_BASE	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	- 133.025	-	-	-	-	-	13.303
Acquisto Batterie	- 13.443	- 6.721	-	- 6.721	- 6.721	-	20.164
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Costo energia	18.356	19.317	20.276	21.231	22.182	23.131	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Totale	**- 128.545**	**21.342**	**29.022**	**23.255**	**24.207**	**31.877**	**38.057**

Fonte: elaborazione ENEA

Tabella 5-5: SCENARIO DI BASE per la Collettività

COLLETTIVITA'_BASE	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	- 133.025	-	-	-	-	-	13.303
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Acquisto Batterie	- 13.443	- 6.721	-	- 6.721	- 6.721	-	20.164
Costo energia	8.571	9.532	10.490	11.445	12.397	13.346	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Costi Ambientali	7.012	7.012	7.012	7.012	7.012	7.012	-
Totale	**- 131.318**	**18.569**	**26.249**	**20.482**	**21.434**	**29.104**	**38.057**

Fonte: elaborazione ENEA

I ritorni economici in fase di esercizio sono sufficienti a coprire gli extra-costi iniziali, così che gli indicatori di redditività risultano positivi, sia per l'azienda di trasporto che per la collettività (vedi tab. seg.).

Tabella 5-6: Indicatori di redditività dell'acquisto del bus elettrico

Scenario di base	Impresa	Collettività
VAN	€ 9.095	€ 3.743
B/C	1,05	1,02
TIR	7,5%	4,3%

Fonte: elaborazione ENEA

Si è voluto verificare la robustezza di tali risultati attraverso un'analisi di sensitività che ha preso in considerazione alcuni dei valori più incerti dello studio e specificatamente:
Scenario A_Investimenti: gli investimenti iniziali che, in considerazione di un possibile successo di mercato delle soluzioni di trasporto elettrico, potrebbero ridursi drasticamente, sia per l'acquisto dei veicoli che per l'istallazione delle stazioni di ricarica; in questo scenario è stata applicata anche una riduzione dell'investimento per l'acquisto del Cacciamali, nell'ipotesi che il mercato tenda ad una generale riduzione dei prezzi. Le assunzioni fatte per lo Scenario A quindi, suppongono una riduzione del prezzo di listino dei

due autobus pari al 30% e una riduzione graduale del prezzo delle batterie che, alla fine del periodo di riferimento, abbatterà il prezzo iniziale del 20%;
Scenario B_Consumi: i consumi energetici unitari, che potrebbero modificarsi non solo per effetto di un processo di efficientamento dei veicoli ma anche variando il contesto di esercizio. Per lo Scenario B è stata ipotizzata una riduzione dei consumi specifici del 20%.
Scenario C_Prezzi: i prezzi al consumo dell'energia, sempre soggetti alle oscillazioni del prezzo del greggio e delle altri fonti energetiche primarie ed alla situazione politica internazionale. Per lo Scenario C, si è ipotizzato un aumento, rispetto ai prezzi di partenza considerati, del 3%.
Scenario D_Sussidi: le politiche europee, nazionali e regionali a sostegno della mobilità a basso impatto ambientale, nonché i contributi pubblici per l'efficientamento del sistema dei trasporti, hanno suggerito l'elaborazione del quarto Scenario D. A beneficio esclusivo dell'impresa sono infatti i sussidi previsti ad esempio, dalla Regione Abruzzo[16] per lo svecchiamento del parco rotabile su gomma destinato alle aziende di TPL titolari di servizi in concessione regionale e comunale. Il programma di finanziamento su fondi PAR-FAS 2007-2013, alla Linea di Azione III.2.3.a, intervento n.2 " Acquisto di autobus ad alimentazione non convenzionale", prevede due misure: la sostituzione di circa 100 bus (76 regionali e 22 comunali) con più di 15 anni di vetustà con uno stanziamento di 15 M€ e il potenziamento e la specializzazione dei parchi delle aziende titolari di servizi di TPL nelle aree del c.d. "cratere" con introduzione di mezzi medio piccoli ecologici a basso impatto ambientale per una spesa di 3, 627 M€. Ad oggi, risulta che il primo provvedimento è stato avviato mentre il secondo è stato rinviato. Lo Scenario D, elaborato solo per l'impresa, quindi, ipotizza un finanziamento pubblico pari al 100% del prezzo d'acquisto per entrambe le tipologie di autobus.

Le seguenti tabelle riassumono i risultati dell'analisi di sensitività per l'azienda e per la collettività.
Per quanto riguarda l'azienda, gli scenari prospettati sono tutti migliorativi del VANe, tranne uno, perciò favorevoli all'acquisto del veicolo elettrico per cui è da ritenere che, in una probabile combinazione di fattori, l'acquisto del veicolo elettrico sia comunque redditizio, sia per l'Azienda sia per la Collettività. L'unico scenario che presenta un VANe negativo, come era da attendersi, quello relativo alla riduzione dei consumi specifici (Scenario B); dal punto di vista della collettività questo scenario è più gravoso che per l'Azienda in quanto una riduzione dei consumi comporta anche una riduzione dei benefici ambientali.

Tabella 5-7: Confronto indicatori sintetici ACB per l'azienda nei vari scenari

	VANE Impresa	B/C	TIR
Scenario Base	€ 9.095	1,05	7,5%
Scenario A_investimenti	€ 34.621	1,22	15,0%
ScenarioB_consumi	-€ 10.488	0,93	2,7%
Scenario C_prezzi	€ 14.779	1,08	8,3%
Scenario D_sussidio	€ 132.472	3,61	

Fonte: elaborazione ENEA

[16] DELIBERAZIONE 16.12.2013, n. 952 - Bollettino ufficiale della Regione Abruzzo n. 3 del 22 gennaio 2014

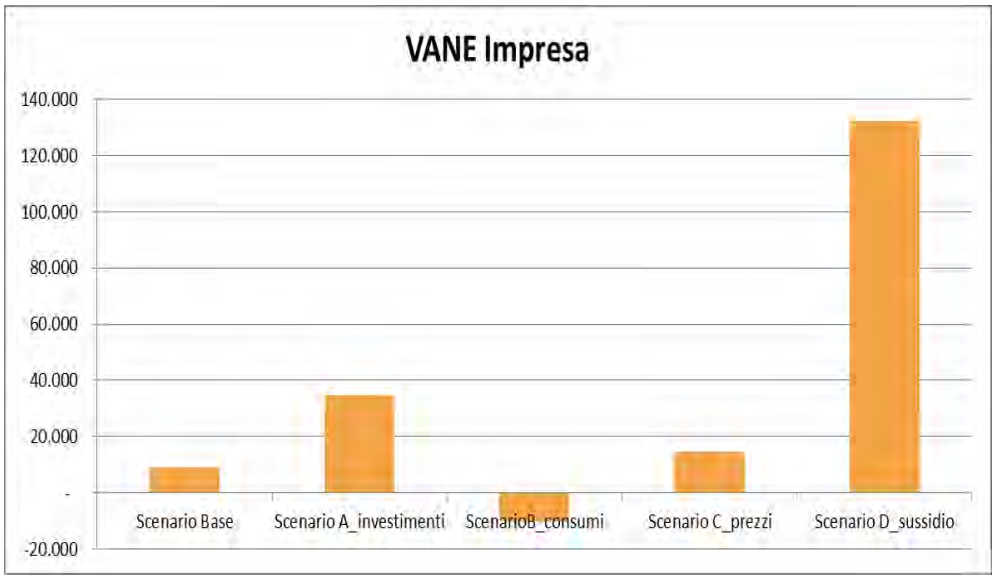


Figura 5-5: Confronto del VAN economico per l'azienda nei vari scenari

Anche l'indicatore Benefici/Costi, conferma la bontà dell'investimento, dal momento che in tutti gli scenari, tranne nello scenario B, detto rapporto è maggiore di uno, dimostrando che i benefici attualizzati sono superiori ai costi.
Il tasso interno di rendimento, relativo alla performance, quindi all'efficienza, del progetto di investimento invece, mostra dei valori sensibilmente diversi a seconda del soggetto cui l'analisi si riferisce. Tuttavia, sia per l'azienda che per la collettività, si registra una performance migliore rispetto al tasso di sconto applicato nei due casi, che si ricorda essere del 5,5% per l'impresa e del 3,5% per la collettività. Anche in questo caso, come per gli altri, il valore del TIR è inferiore a quello del TdS, solo nello scenario B.
Nello scenario D, elaborato per l'impresa, essendo tutti i flussi positivi, si ha un TIR indefinito.

Tabella 5-8: Confronto indicatori sintetici ACB per la collettività nei vari scenari

	VANe Collettività	B/C	TIR
Scenario Base	€ 3.743	1,02	4,3%
Scenario A_investimenti	€ 28.879	1,18	10,9%
ScenarioB_consumi	-€ 15.979	0,92	0,2%
Scenario C_prezzi	€ 5.541	1,03	4,7%

Fonte: elaborazione ENEA

Figura 5-6: confronto del VAN Economico per la collettività nei vari scenari

6. Conclusioni

L'analisi effettuata dà conferma della possibilità tecnica ed economica di sostituire i convenzionali veicoli a combustione interna con veicoli elettrici di analoghe dimensione e prestazioni, anche nel caso di servizi di trasporto pubblico su linee miste urbane ed extraurbane.
Le nuove importanti opportunità offerte dai sistemi di accumulo ad elevata densità di carica (batterie agli ioni di litio) e dai sistemi di ricarica rapida, infatti, consentono di estendere le possibilità di impiego dei mezzi a batteria anche a condizioni di esercizio molto onerose, con lunghi tragitti ed elevati valori di potenza impegnata, come quelle esaminate nello studio all'interno del comune de l'Aquila.
Nonostante la necessità di impiegare pacchi batteria di maggiore capacità rispetto a quelli attualmente montati sui veicoli elettrici in commercio e di installare sistemi di ricarica rapida ad elevata intensità di corrente, con conseguente aggravio dei costi di investimento iniziali, l'analisi economica per l'Azienda di Trasporto risulta positiva sull'arco di vita utile dei veicoli, grazie ai notevoli risparmi sui costi di esercizio, in particolare sulle voci di rifornimento energetico e di manutenzione del veicoli (anche considerando le necessità di sostituzione del pacco batterie).
Per la collettività, i vantaggi ambientali riescono a compensare i minori risparmi sui costi di esercizio, dovuti allo scorporo della quota parte di costi di natura fiscale.
La redditività economica potrebbe addirittura migliorare in un non improbabile scenario di ulteriore aumento dei prezzi dell'energia e se una maggiore diffusione sul mercato della trazione puramente elettrica facesse ridurre i prezzi di listino attuali, indubbiamente elevati rispetto a quelli relativi ai mezzi convenzionali.
Viceversa, è necessario garantire un impiego intensivo dei mezzi, al fine di garantire un rientro sufficientemente veloce degli investimenti iniziali che altrimenti potrebbe non verificarsi; si sottolinea come, per questo aspetto, i servizi di trasporto extraurbani sia preferibili a quelli urbani, sovvertendo un luogo comune secondo cui i veicoli elettrici siano utilizzabili solo in ambito urbano. Naturalmente ciò si rende possibile tecnicamente solo grazie ai progressi nelle prestazioni dei veicoli a batteria e dei sistemi di ricarica.

7 Appendice: analisi di sensitività della Analisi Costi Benefici

Nella presente appendice vengono specificate le ipotesi poste alla base dell'analisi di sensitività per il presente caso di studio. L'analisi di sensitività è stata riprodotta nei vari scenari, sia per l'impresa sia per la collettività. Inoltre, è stato elaborato uno Scenario D unicamente per l'impresa, in quanto a suo specifico vantaggio.

Ipotesi di Scenario:
Scenario A: in questo scenario è stata applicata una riduzione del prezzo di listino dei due autobus pari al 30% e una riduzione graduale del prezzo delle batterie che, alla fine del periodo di riferimento, abbatterà il prezzo iniziale del 20%;
Scenario B: è stata ipotizzata una riduzione dei consumi specifici del 20% sia per il bus elettrico sia per il bus a combustione interna;
Scenario C: si è ipotizzato un aumento, rispetto ai prezzi di partenza considerati, del 3% sia per l'energia elettrica sia per il combustibile diesel;
Scenario D: si è ipotizzato che l'impresa potesse usufruire delle agevolazioni contributive pubbliche per il rinnovo del parco veicoli in misura del 100% sia per il bus elettrico sia per il bus a combustione interna.

Le seguenti tabelle riportano le elaborazioni degli scenari, mostrando i flussi netti tra i due progetti. Nel caso in esame, il flusso netto è dato esclusivamente quale differenza tra i costi dei due progetti, quindi il segno meno sta ad indicate il maggior costo collegato al progetto del bus elettrico rispetto al progetto del bus C.I., mentre il segno positivo sta ad indicare il minor costo o beneficio, dell'investimento nel bus elettrico rispetto all'altro.

7.1Analisi di sensitività per l'Impresa

Tabella 7-1: Impresa-Scenario Base

IMPRESA_BASE	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	- 133.025	-	-	-	-	-	13.303
Acquisto Batterie	- 13.443	- 6.721	-	- 6.721	- 6.721	-	20.164
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Costo energia	18.356	19.317	20.276	21.231	22.182	23.131	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Totale	**- 128.545**	**21.342**	**29.022**	**23.255**	**24.207**	**31.877**	**38.057**

Fonte: elaborazione ENEA

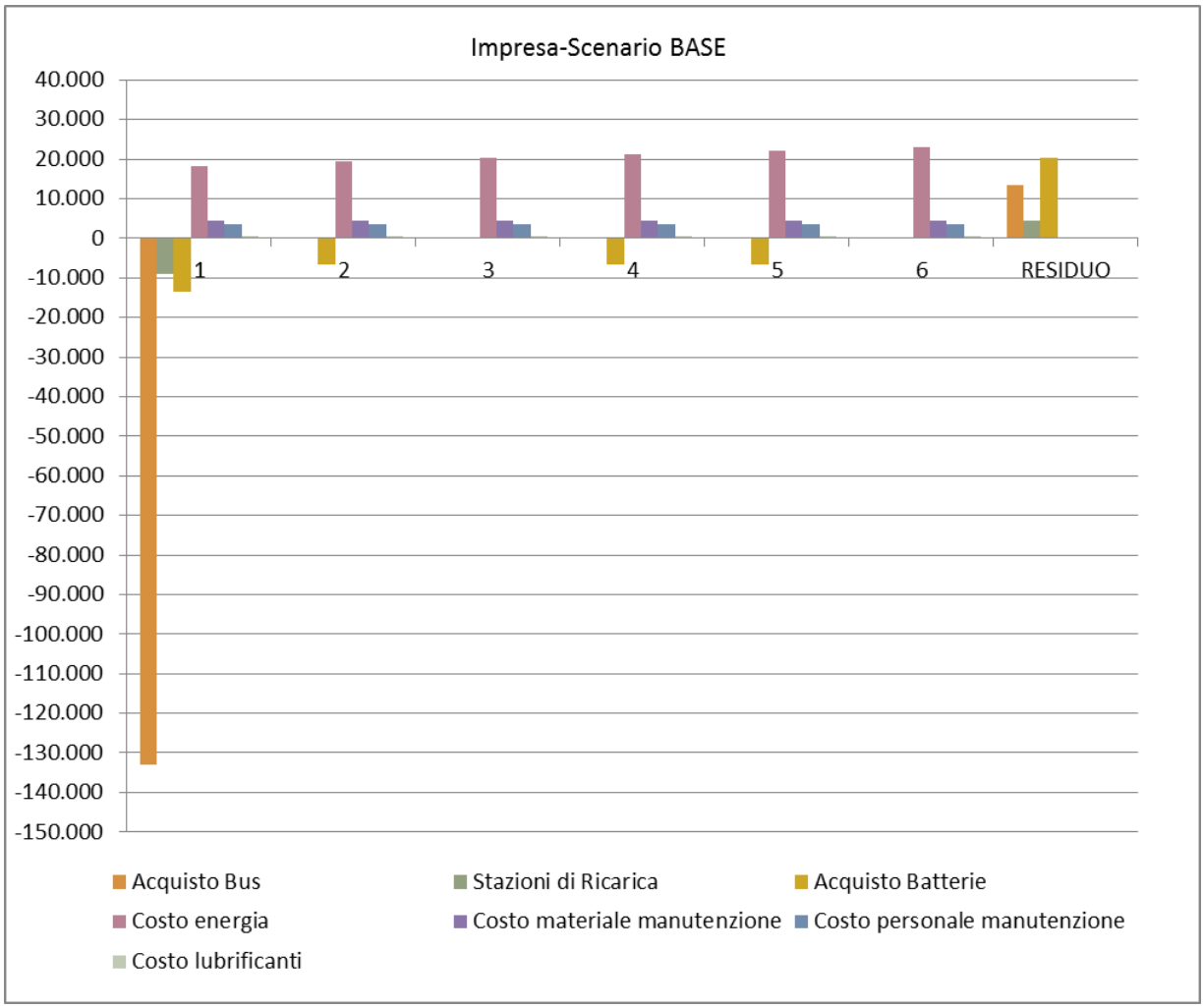


Figura 7-1: Impresa-Scenario Base

Tabella 7-2: Impresa-Scenario A_ Investimenti

IMPRESA_A	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	- 106.420	-	-	-	-	-	10.642
Acquisto Batterie	- 13.443	- 5.377	-	- 5.377	- 5.041	-	16.131
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Costo energia	18.356	19.317	20.276	21.231	22.182	23.131	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Totale	**- 101.940**	**22.687**	**29.022**	**24.600**	**25.888**	**31.877**	**31.363**

Fonte: elaborazione ENEA

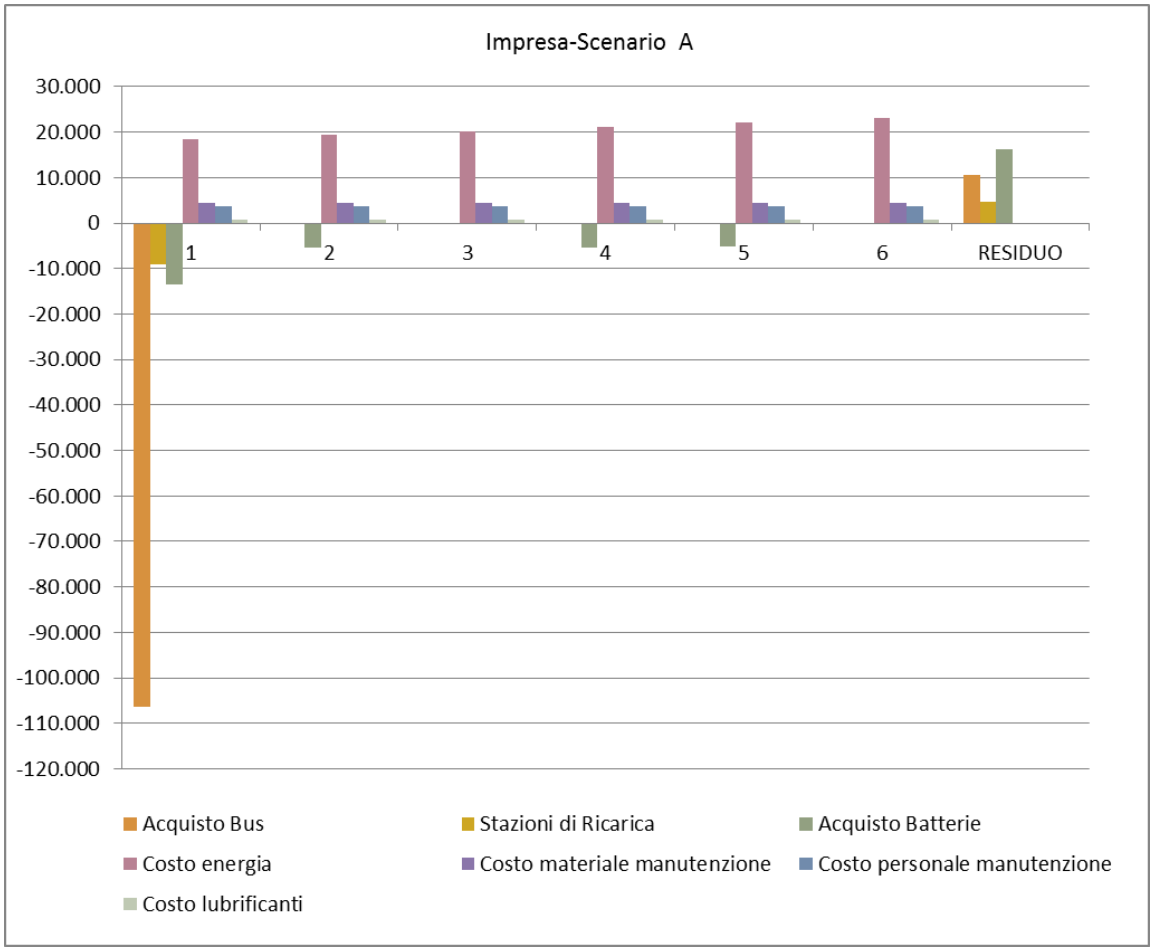


Figura 7-2: Impresa-Scenario A_ Investimenti

Tabella 7-3: Impresa-Scenario B_Consumi

IMPRESA_B	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	- 133.025	-	-	-	-	-	13.303
Acquisto Batterie	- 13.443	- 6.721	-	- 6.721	- 6.721	-	20.164
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Costo energia	14.685	15.454	16.220	16.984	17.746	18.505	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Totale	**- 132.217**	**17.479**	**24.967**	**19.009**	**19.771**	**27.251**	**38.057**

Fonte: elaborazione ENEA

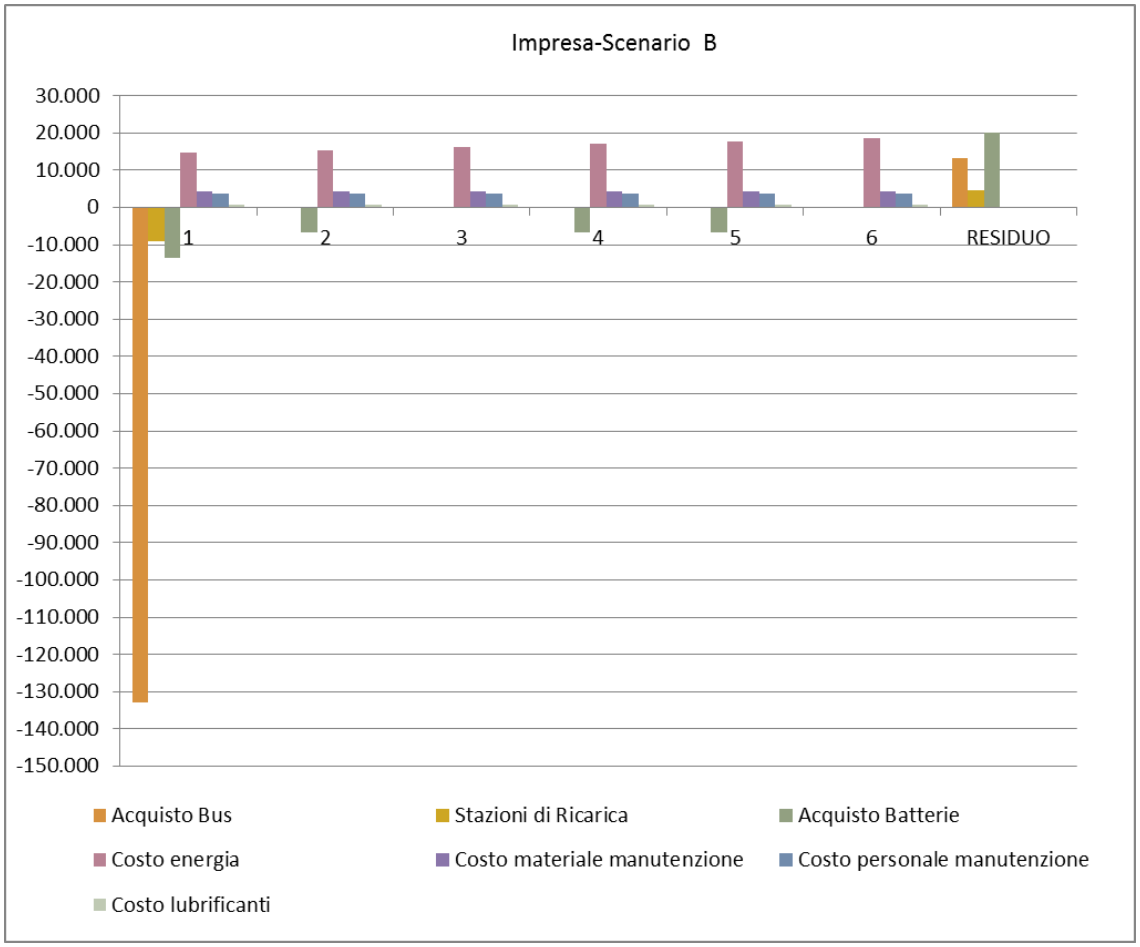


Figura 7-3: Impresa-Scenario B_Consumi

Tabella 7-4: Impresa-Scenario C_Prezzi

IMPRESA_C	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	- 133.025	-	-	-	-	-	13.303
Acquisto Batterie	- 13.443	- 6.721	-	- 6.721	- 6.721	-	20.164
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Costo energia	18.907	19.897	20.884	21.867	22.848	23.825	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Totale	**- 127.995**	**21.922**	**29.630**	**23.892**	**24.873**	**32.571**	**38.057**

Fonte: elaborazione ENEA

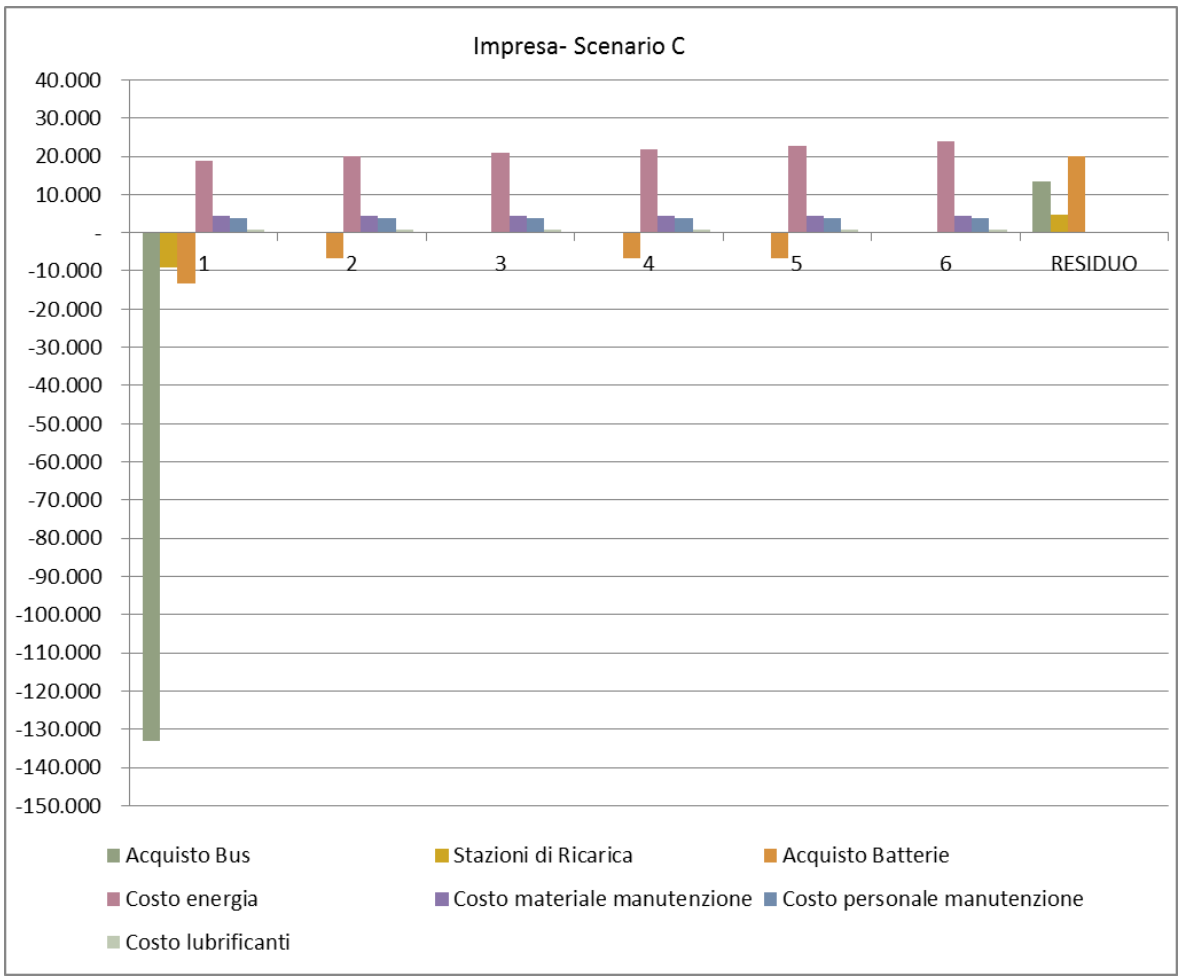


Figura 7-4: Impresa-Scenario C_Prezzi

Tabella 7-5: Impresa-Scenario D_Sussidi

IMPRESA_D	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	-	-	-	-	-	-	-
Acquisto Batterie	- 13.443	- 6.721	-	- 6.721	- 6.721	-	20.164
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Costo energia	18.356	19.317	20.276	21.231	22.182	23.131	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Totale	**4.480**	**21.342**	**29.022**	**23.255**	**24.207**	**31.877**	**24.754**

Fonte: elaborazione ENEA

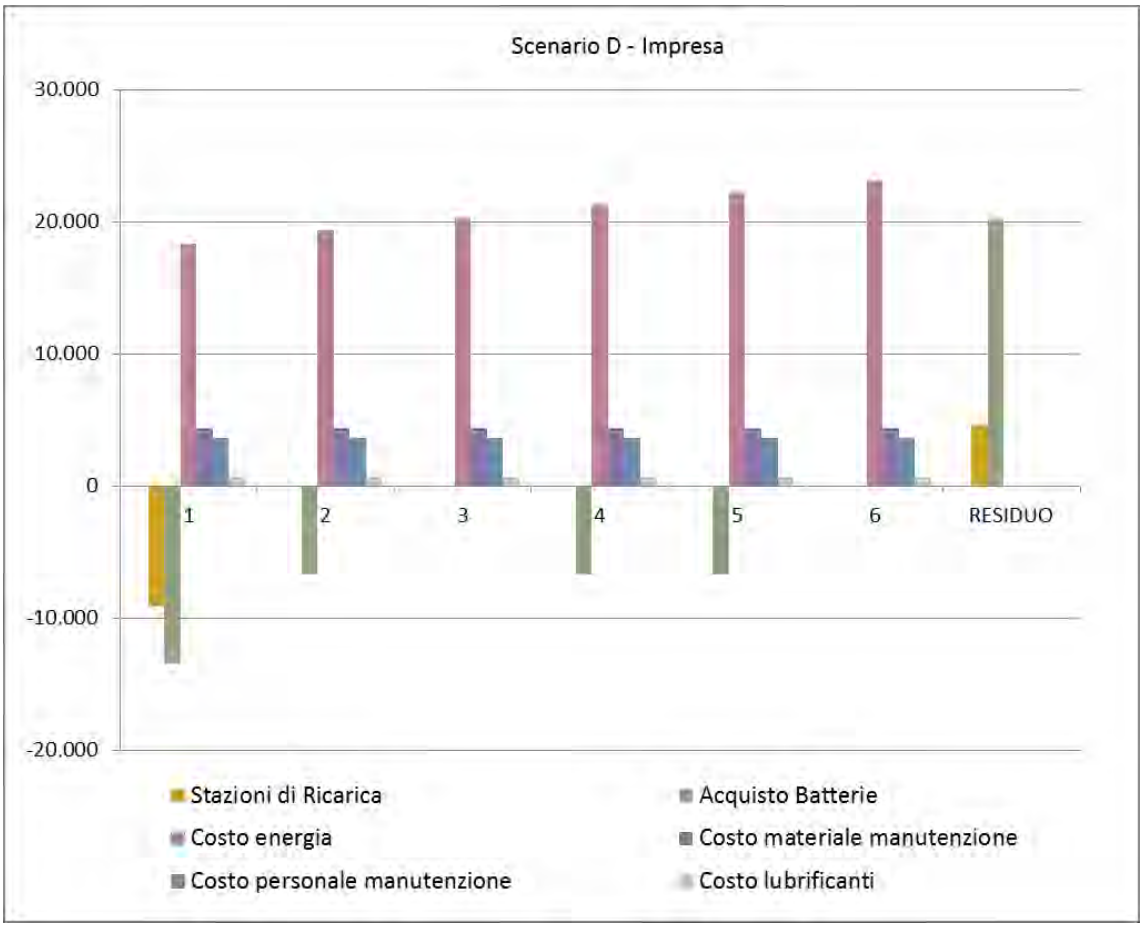


Figura 7-5: Impresa-Scenario D_Sussidi

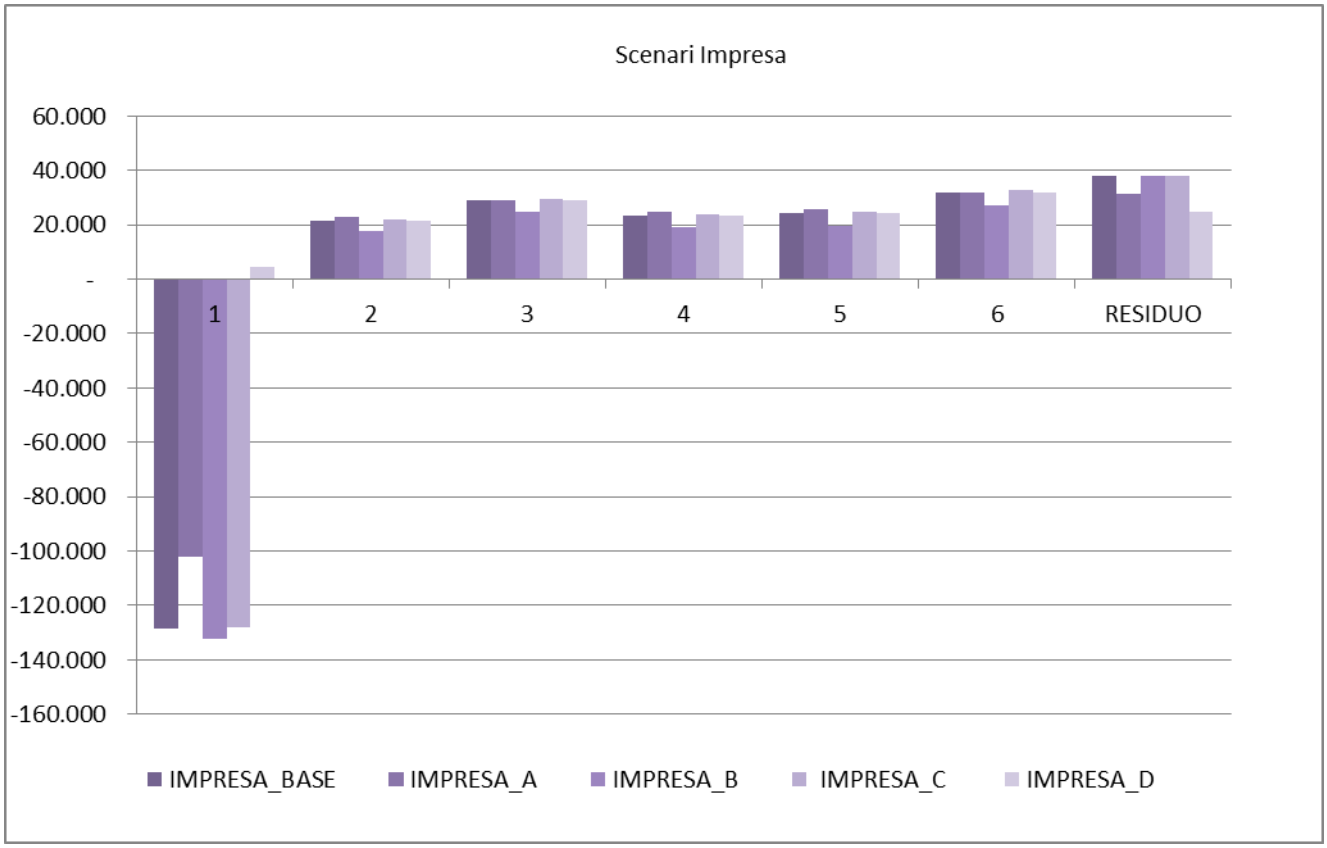


Figura 7-6: Confronto dei flussi netti degli scenari dell'Impresa

7.2 Analisi di sensitività per la Collettività

Tabella 7-6: Collettività-Scenario Base

COLLETTIVITA'_BASE	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	- 133.025	-	-	-	-	-	13.303
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Acquisto Batterie	- 13.443	- 6.721	-	- 6.721	- 6.721	-	20.164
Costo energia	8.571	9.532	10.490	11.445	12.397	13.346	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Costi Ambientali	7.012	7.012	7.012	7.012	7.012	7.012	-
Totale	**- 131.318**	**18.569**	**26.249**	**20.482**	**21.434**	**29.104**	**38.057**

Fonte: elaborazione ENEA

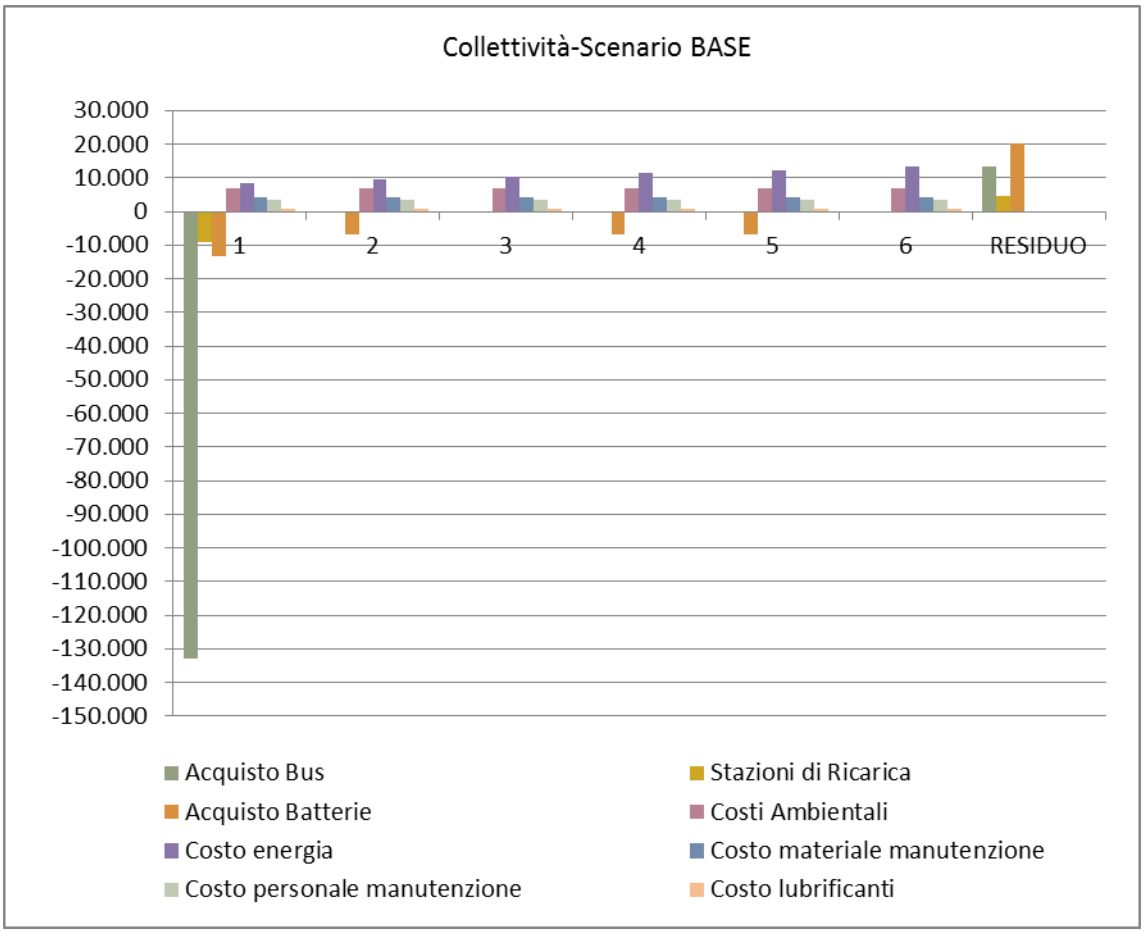


Figura 7-7: Collettività-Scenario Base

Tabella 7-7: Collettività-Scenario A_Investimenti

COLLETTIVITA'_A	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	- 106.420	-	-	-	-	-	10.642
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Acquisto Batterie	- 13.443	- 5.377	-	- 5.377	- 5.041	-	16.131
Costo energia	8.571	9.532	10.490	11.445	12.397	13.346	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Costi Ambientali	7.012	7.012	7.012	7.012	7.012	7.012	-
Totale	**- 104.713**	**19.914**	**26.249**	**21.827**	**23.115**	**29.104**	**31.363**

Fonte: elaborazione ENEA

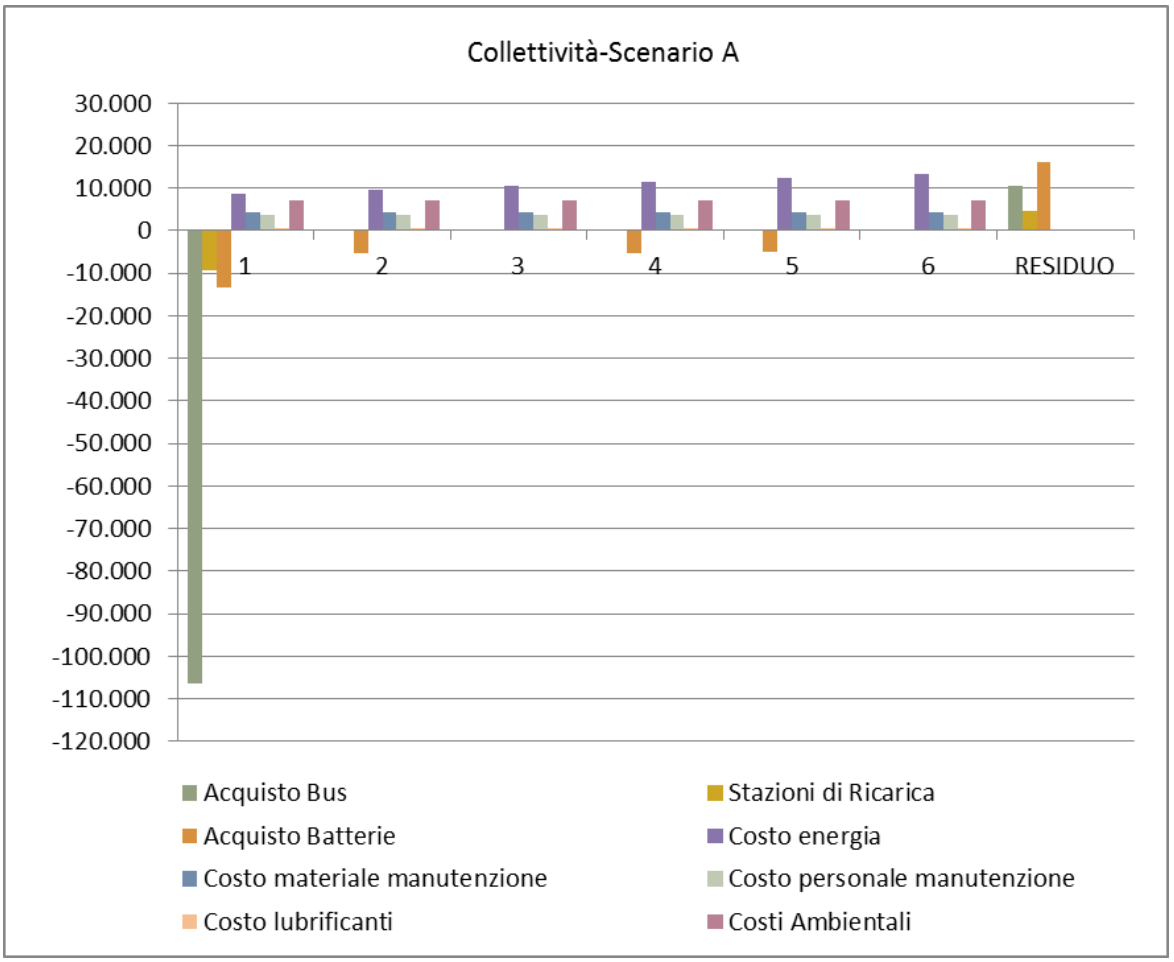


Figura 7-8: Collettività-Scenario A_Investimenti

Tabella 7-8: Collettività-Scenario B_Consumi

COLLETTIVITA'_B	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	- 133.025	-	-	-	-	-	13.303
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Acquisto Batterie	- 13.443	- 6.721	-	- 6.721	- 6.721	-	20.164
Costo energia	6.857	7.626	8.392	9.156	9.918	10.677	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Costi Ambientali	5.610	5.610	5.610	5.610	5.610	5.610	-
Totale	**- 134.435**	**15.260**	**22.748**	**16.791**	**17.552**	**25.033**	**38.057**

Fonte: elaborazione ENEA

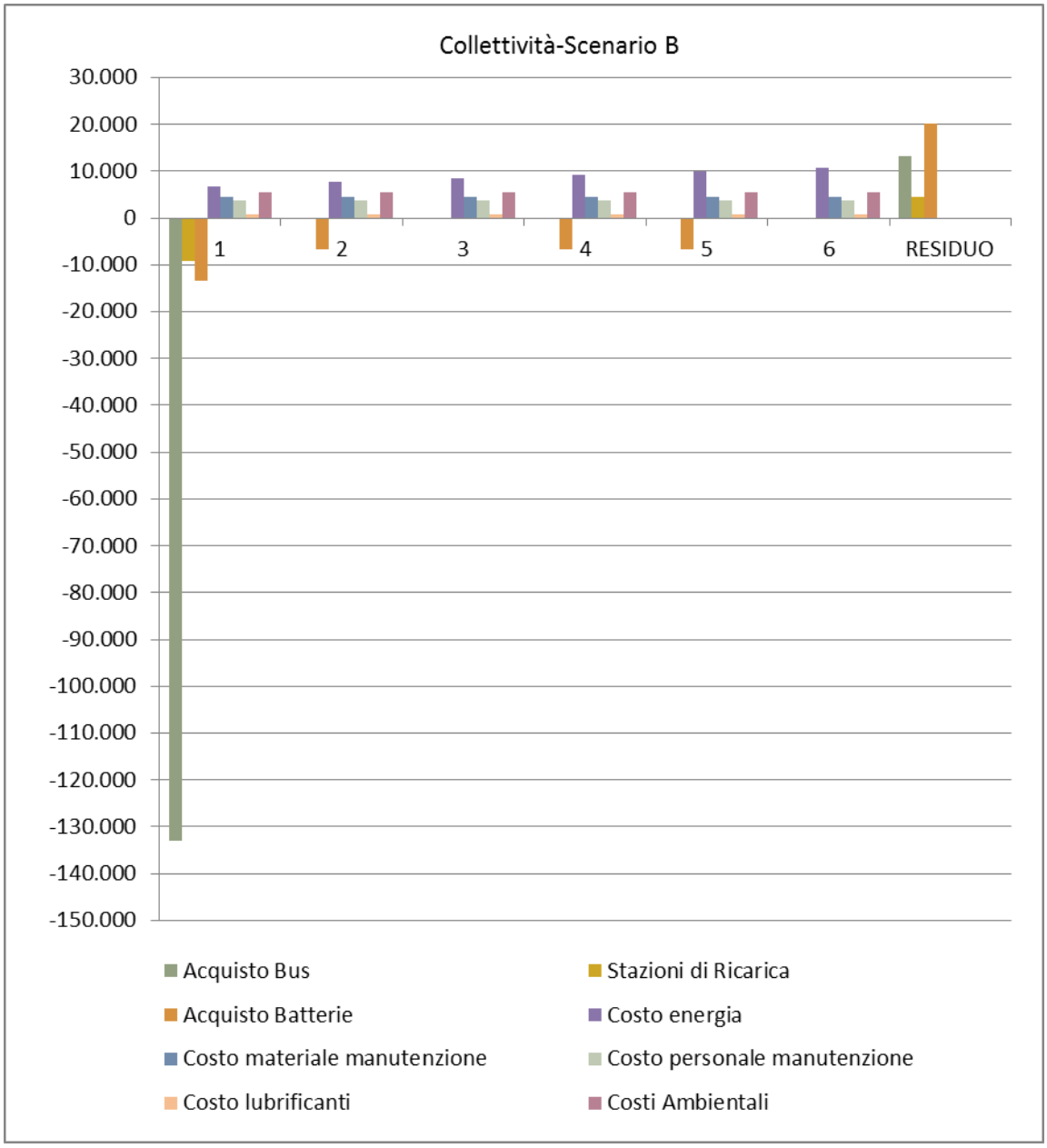


Figura 7-9: Collettività-Scenario B_Consumi

Tabella 7-9: Collettività-Scenario C_Prezzi

COLLETTIVITA'_C	FLUSSI NETTI						
	1	2	3	4	5	6	RESIDUO
Acquisto Bus	- 133.025	-	-	-	-	-	13.303
Stazioni di Ricarica	- 9.180	-	-	-	-	-	4.590
Acquisto Batterie	- 13.443	- 6.721	-	- 6.721	- 6.721	-	20.164
Costo energia	8.828	9.818	10.805	11.789	12.769	13.747	-
Costo materiale manutenzione	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	4.409	-
Costo personale manutenzione	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	3.657	-
Costo lubrificanti	680	680	680	680	680	680	-
Costi Ambientali	7.012	7.012	7.012	7.012	7.012	7.012	-
Totale	**- 131.061**	**18.855**	**26.563**	**20.826**	**21.806**	**29.505**	**38.057**

Fonte: elaborazione ENEA

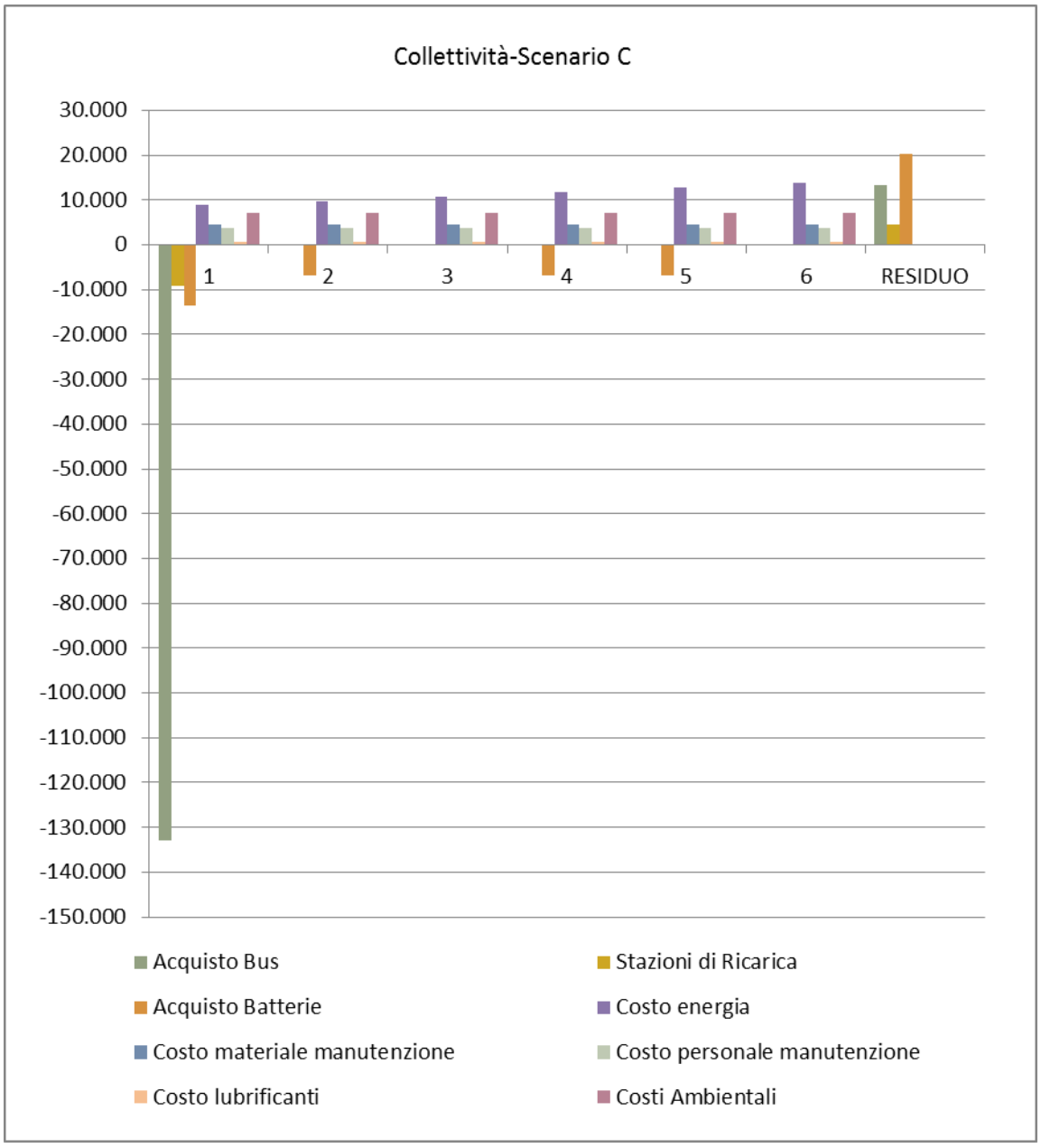


Figura 7-10: Collettività-Scenario C_Prezzi

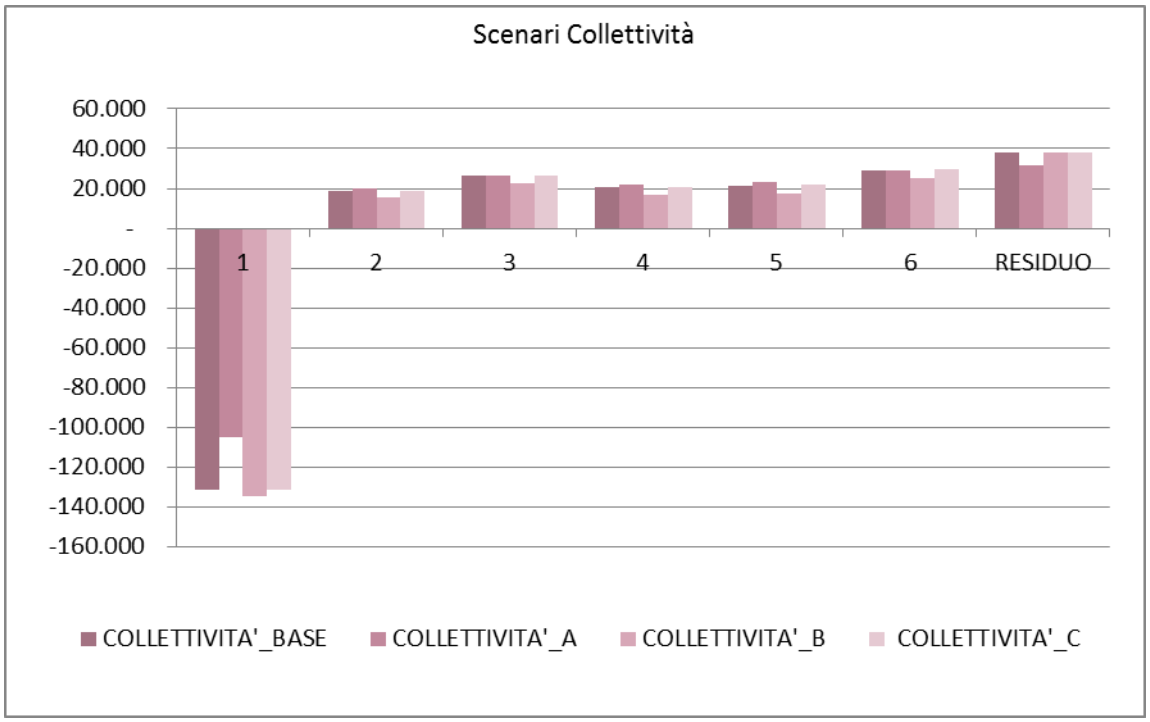


Figura 7-11: Confronto flussi netti degli scenari della Collettività

Riferimenti bibliografici

1. Ceraolo M (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. Commissione Europea, "Orientamenti metodologici per la realizzazione delle analisi costi-benefici", Documento di lavoro n. 4 (2006)
5. http://www.electricmobility.it/index.php/it/component/zoo/item/gulliver
6. http://www.autorita.energia.it/it/dati/condec.htm
7. Agenzia delle Dogane nota RU 68241 del 27/06/2014
8. Decreto Legislativo 26/10/1995 n. 504, "Testo unico delle disposizioni legislative concernenti le imposte sulla produzione e sui consumi e relative sanzioni penali e amministrative".
9. Unità di Valutazione, DG Politica Regionale e Coesione, Commissione Europea, "Guida all'Analisi Costi-Benefici dei progetti d'investimento (2008).
10. Commissione ASSTRA costi standard automobilistici "Un modello di calcolo del costo standard per il trasporto pubblico locale e regionale automobilistico" (2013), Roma.
11. 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).
12. AAVV "Aggiornamento del Piano Urbano della Mobilità" Comune dell'Aquila 2012