



Ricerca di Sistema elettrico

Procedure di supporto alle decisioni nei processi di elettrificazione del servizio di Trasporto Pubblico Locale su gomma

M.P. Valentini, M.G. Messina, V. Conti, S. Orchi,
F. Carapellucci

PROCEDURE DI SUPPORTO ALLE DECISIONI NEI PROCESSI DI ELETTRIFICAZIONE DEL SERVIZIO DI TRASPORTO PUBBLICO LOCALE SU GOMMA

M.P. Valentini, M.G. Messina , V. Conti, S. Orchi, F. Carapellucci (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con gli altri vettori energetici

Progetto: Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: Strumenti di supporto alle aziende TPL ed alle amministrazioni territoriali per l'elettrificazione del trasporto pubblico

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese- ENEA

La buona riuscita del presente lavoro si deve anche a chi a vario titolo ha contribuito ad accrescere ed avvalorare, dal punto di vista scientifico, la cospicua ed eterogenea mole di *know-how* contenuta nel modello di calcolo messo a punto e descritta nelle successive pagine del rapporto.

Si ringraziano tutti coloro che attraverso incontri e scambio di opinioni, anche ripetuti, hanno condiviso con gli autori il sapere della loro pluriennale esperienza, *in primis* i colleghi del Laboratorio DTE/PCU/STMA di ENEA, Giovanni Pedè, Antonino Genovese, Ennio Rossi, Fernando Ortenzi e Francesco Vellucci per aver sempre con pazienza e profonda competenza risposto alle richieste di approfondimento di tematiche molto specialistiche, per le quali essi rappresentano un sicuro punto di riferimento nel panorama della Ricerca italiana di settore.

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	7
2 L'ELETTRIFICAZIONE DEL TPL, OPPORTUNITÀ TECNOLOGICHE ED ESEMPI APPLICATIVI ESISTENTI.....	9
2.1 INTRODUZIONE.....	9
2.2 GLI AUTOBUS ELETTRICI PRESENTI SUL MERCATO NAZIONALE.....	10
2.3 I SISTEMI DI RICARICA ELETTRICA.....	14
2.3.1 <i>Ricarica di tipo conduttivo</i>	17
2.3.2 <i>Ricarica wireless</i>	19
2.4 ACCUMULATORI DI BORDO.....	20
2.4.1 <i>Batterie agli ioni di litio</i>	21
2.4.2 <i>Supercondensatori</i>	23
3 FUNZIONALITÀ, STRUTTURA E AMBITO DI ANALISI DEL DSS.....	24
3.1 GENERALITÀ.....	24
3.2 DISPONIBILITÀ E TIPOLOGIA DI DATI "OPEN" RELATIVI AL TRASPORTO PUBBLICO LOCALE.....	25
3.3 USERS NEEDS ANALYSIS.....	27
4 L CALCOLO DI CONSUMI ED EMISSIONI.....	30
4.1 BREVI CENNI SULLE PROCEDURE DI CALCOLO.....	30
4.2 SCENARI DI ANALISI E ASSUNZIONI DI CALCOLO.....	31
5 IL MODELLO PER LA VERIFICA DI FATTIBILITÀ TECNICA E IL DIMENSIONAMENTO DELL'ARCHITETTURA ELETTRICA ...	33
5.1 SCHEMA GENERALE.....	33
5.2 VERIFICHE PRELIMINARI.....	35
5.2.1 <i>Verifiche infrastrutturali</i>	35
5.2.2 <i>Verifica dell'incidenza dei trasferimenti terminali sui consumi di progetto</i>	35
5.3 DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DELL'ACCUMULO DI BORDO.....	36
5.4 DIMENSIONAMENTO DELLA POTENZA DI RICARICA.....	42
6 IL MODELLO PER IL CONFRONTO ECONOMICO FRA ALTERNATIVE DI PROGETTO.....	48
6.1 INTRODUZIONE.....	48
6.2 DATI GENERALI COMUNI ALLE ALTERNATIVE CONSIDERATE.....	51
6.3 CALCOLI PRELIMINARI.....	51
6.3.1 <i>Dimensionamento della flotta</i>	51
6.3.2 <i>Dimensionamento del numero di stazioni di ricarica necessarie all'esercizio</i>	53
6.3.3 <i>Stima delle percorrenze annuali</i>	54
6.3.4 <i>Stima dei consumi annuali</i>	54
6.4 CALCOLO DEGLI INVESTIMENTI INIZIALI.....	55
6.4.1 <i>Acquisto degli autobus e dell'accumulo di bordo</i>	56
6.4.2 <i>Acquisto ed installazione dell'infrastruttura di ricarica</i>	59
6.5 CALCOLO DEGLI INVESTIMENTI PER RINNOVO.....	62
6.6 CALCOLO DEI VALORI RESIDUI.....	64
6.7 CALCOLO DEI COSTI ANNUALI DI ESERCIZIO.....	65
6.7.1 <i>Trazione</i>	66
6.7.1.1 <i>Dimensionamento della potenza elettrica impegnata</i>	68
6.7.2 <i>Manutenzione</i>	75
6.8 CONFRONTO ECONOMICO DELLE ALTERNATIVE.....	77
7 IL MODELLO PER IL CALCOLO DEI COSTI ESTERNI.....	78
7.1 GENERALITÀ.....	78
7.2 CALCOLO DEI COSTI ESTERNI DELLE EMISSIONI NOCIVE IN ATMOSFERA.....	80
7.2.1 <i>Emissioni TTW (al punto d'uso)</i>	80

7.2.2	<i>Emissioni PTT</i>	82
7.3	CALCOLO DEI COSTI ESTERNI DEL RUMORE VEICOLARE	83
8	IL SOFTWARE.....	85
8.1	GENERALITÀ.....	85
8.2	TABELLE DEI DATI DI INPUT	86
8.2.1	<i>Dati sul caso di studio</i>	86
8.2.2	<i>Dati sulle tecnologie</i>	89
8.2.3	<i>Dati di Expertise per il progetto del sistema elettrico</i>	91
8.2.4	<i>Dati per l'analisi economica e dei danni ambientali</i>	92
8.3	TABELLE DEI DATI DI OUTPUT.....	93
8.3.1	<i>Risultati del dimensionamento del sistema elettrico</i>	93
8.3.2	<i>Risultati del confronto economico delle opzioni di ricarica elettrica</i>	94
8.3.3	<i>Risultati del confronto economico fra alternative energetiche</i>	94
8.4	TEST	95
9	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	99
10	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	100
11	APPENDICE	103
11.1	SCHEDE TECNICHE BUS.....	103
11.2	SISTEMI PER LA CARICA DELLE BATTERIE DEGLI AUTOBUS.....	110
11.3	OPEN DATA IN ITALIA	112
1.1	VEICOLI	113
11.4	QUESTIONARIO ALLE AZIENDE TPL.....	119

Sommario

L'elettrificazione delle reti di trasporto pubblico locale su gomma richiede valutazioni di fattibilità tecnica ed economica degli interventi. Cogliendo tale esigenza e anche l'occasione di una maggiore disponibilità di dati grazie alla normativa sugli "Open Data", è stato messo a punto un software di supporto alle decisioni destinato alle Aziende di Trasporto Pubblico Locale, per individuare quali linee siano più adatte, sotto il profilo sia tecnico che economico, ad un eventuale utilizzo di veicoli a batteria e per quali soluzioni tecnologiche preferibilmente. Il software è inoltre in grado di fornire indicazioni sull'assorbimento di energia e di potenza dalle rete di alimentazione dei sistemi di ricarica utili agli operatori del settore elettrico.

Le funzionalità del software sono state definite a valle di una ricerca *desk* sulle caratteristiche dei dati resi disponibili dalle Aziende di trasporto pubblico locale in modalità *open* e di un'indagine questionario rivolta alle medesime Aziende, mirata a individuarne le concrete esigenze nel processo di elettrificazione.

La catena modellistica concepita per rispondere a tali esigenze si compone di quattro moduli di calcolo:

- il primo stima i consumi energetici e le emissioni nocive in atmosfera conseguenti all'esercizio della linea in esame nelle diverse alternative di alimentazione considerate;
- il secondo verifica di fattibilità tecnica e realizza la progettazione preliminare dell'alimentazione elettrica nelle diverse alternative tecnologiche considerate;
- il terzo confronta le soluzioni tecnologiche di elettrificazione fra di loro e con le tecnologie convenzionali in funzione degli oneri economici di investimento e di esercizio da doversi sostenere da parte dell'Azienda erogatrice del servizio di trasporto;
- il quarto stima e confronta i costi sociali generati dalle emissioni nocive in atmosfera e dal rumore veicolare per le diverse alternative di alimentazione, elettrica o convenzionale.

L'attività descritta nel presente rapporto si è concentrata sullo sviluppo degli ultimi tre modelli mentre per quanto riguarda il calcolo dei consumi energetici e delle emissioni atmosferiche si è fatto riferimento ai risultati di altre attività svolte dello stesso anno di ricerca.

Tutti i moduli di calcolo si integrano fra loro attraverso una comune banca dati, in cui sono archiviati in maniera strutturata e di facile accesso i dati di input e di output.

Il software per il dimensionamento preliminare e il confronto economico delle alternative tecnologiche è stato sviluppato in Matlab mentre la realizzazione della banca dati di supporto ha richiesto lo sviluppo di software in linguaggio SQL per l'elaborazione dei dati in formato GTFS forniti dalle Aziende di Trasporto Pubblico Locale in modalità "open". Inoltre, sia in linguaggio Matlab che in Python, sono stati creati dei script che permettono la connessione tra l'ambiente del database e quello del calcolo.

Per garantire la massima consistenza alla selezione delle tecnologie di elettrificazione, sono state prese in esame diverse opzioni operative della ricarica dei veicoli e cioè:

- Architettura A: solo ricarica notturna al deposito con modalità lenta (tempi di ricarica dell'ordine di qualche ora);
- Architettura B: ricarica veloce al capolinea durante le soste fra una corsa e l'altra (tempi di ricarica dell'ordine di qualche minuto), coadiuvata da un approvvigionamento in modalità lenta al deposito a fine servizio;
- Architettura C: ricarica ultrarapida alle fermate durante le soste per la salita e discesa dei passeggeri (tempi di ricarica dell'ordine di qualche secondo), associata a biberonage veloci al capolinea e a ricariche lente durante il ricovero notturno.

Per ciascuno schema di approvvigionamento energetico è stata univocamente stabilita la tipologia di accumulo di bordo ritenuta più idonea dagli esperti del settore. Specificatamente per la ricarica lenta al deposito e per

quella rapida al capolinea la scelta è caduta sulle batterie agli ioni di litio mentre la ricarica ultrarapida è stata associata ad un accumulo a supercondensatori, supportato da una piccola batteria di riserva agli ioni di litio.

Le alternative energetiche considerate per il confronto dei costi interni ed esterni sono il gasolio e il metano.

Nel predisporre i modelli teorici alla base del software sono state esaminate le numerose variabili in gioco, relative alle caratteristiche fisiche e operative del servizio di linea in esame, alle caratteristiche tecniche e prestazionali delle soluzioni tecnologiche possibili, alle voci economiche che contribuiscono a determinare i costi interni ed esterni di ogni alternativa progettuale.

Per verificare il corretto funzionamento del software, è stato implementato un caso di test desunto dai dati open dell'ATAC di Roma, che ha dimostrato esiti positivi riguardo sia all'impostazione dei modelli di calcolo sia allo sviluppo informatico.

Il lavoro svolto ha pienamente raggiunto gli obiettivi attesi e se ne prevede l'ulteriore sviluppo nei prossimi anni di ricerca, in termini sia di applicazione del modello nella forma attuale a problemi di concreto interesse per le Aziende di Trasporto sia di estensione delle funzionalità; in particolare si ritiene opportuno affrontare il tema dell'ottimizzazione globale del sistema in caso di elettrificazione diffusa di una rete aziendale di trasporto pubblico locale.

1 Introduzione

L'elettificazione delle reti di trasporto pubblico locale è un processo non privo di ostacoli e difficoltà, di ordine tecnico ed economico.

Le Aziende di Trasporto Pubblico Locale che vogliono confrontarsi con la sfida dell'innovazione si trovano a dover considerare la necessità di importanti investimenti iniziali, connessi alla realizzazione dell'infrastruttura di ricarica ed ai costi aggiuntivi dei veicoli a batteria rispetto a quelli a combustione interna, la compatibilità della trazione in elettrico con le esigenze di servizio, la preparazione del personale ad operare con nuovi e poco conosciuti fattori di produzione del servizio. Difficoltà possono emergere nella scelta delle diverse soluzioni tecnologiche disponibili per l'elettificazione e nella valutazione delle contropartite positive agli sforzi inizialmente richiesti, in termini di risparmi sui costi di esercizio e di benefici ambientali.

In considerazione di ciò, e cogliendo l'occasione di una maggiore disponibilità di dati grazie alla normativa sugli "Open Data" ¹, è stato ritenuto utile mettere a punto un software di supporto alle decisioni destinato alle Aziende che erogano servizi di linea su gomma, per aiutarle ad individuare quali linee siano più adatte ad un eventuale utilizzo di veicoli a batteria, sotto il profilo sia tecnico che economico. Il software, inoltre può fornire indicazioni sull'assorbimento di energia e di potenza elettriche utili agli operatori del settore, anche se quest'analisi assumerà maggiore significato con gli sviluppi previsti per il successivo anno di ricerca, nel quale si analizzerà l'elettificazione ottimale dell'intera rete aziendale.

Nel predisporre i modelli teorici alla base del software sono state esaminate le numerose variabili che influenzano il risultato finale.

Innanzitutto le caratteristiche fisiche della linea e delle sue eventuali alternative di percorso: tracciati plano-altimetrici, ubicazione delle fermate e dei capolinea; poi le caratteristiche del servizio: dimensioni e prestazioni della flotta utilizzata, frequenza delle corse nell'arco delle giornate tipiche dei diversi periodi dell'anno; infine le fluttuazioni della domanda nei medesimi periodi. Tali sono infatti le grandezze che influenzano i livelli di consumo energetico del servizio realizzato, per calcolare i quali sono stati predisposti due diversi modelli in relazione al livello di dettaglio delle informazioni disponibili: i soli tempi di percorrenza fra fermate consecutive o il diagramma delle velocità puntuali in funzione dello spazio. I primi sono ormai resi pubblicamente disponibili dalle aziende in banche dati facilmente accessibili anche se non ancora in formati standardizzati; i secondi sono affidati a campagne di misura specifiche eventualmente predisposte. Per la descrizione dei modelli di calcolo dei consumi energetici e delle conseguenti emissioni in atmosfera si rimanda ai successivi capitoli.

Il secondo grande insieme di variabili riguarda le caratteristiche tecniche e prestazionali delle soluzioni tecnologiche possibili, per la verità numerosissime in relazione alle diverse opzioni di rifornimento energetico e di caratteristiche dei veicoli, considerando sia le soluzioni più tecnologicamente mature sia le prospettive più promettenti.

Infine, non secondariamente, tutte le voci economiche che contribuiscono a determinare i costi interni ed esterni di ogni alternativa progettuale: gli investimenti in veicoli, impianti e parti di ricambio, i corrispettivi richiesti per la fornitura di energia, gli oneri della manutenzione ordinaria, le esternalità sociali ed ambientali.

Delineato il quadro delle grandezze in gioco, sono stati predisposti i modelli teorici di calcolo e sviluppati i relativi codici informatici per:

- il calcolo dei consumi energetici e delle emissioni nocive in atmosfera;
- la verifica di fattibilità tecnica, l'eventuale dimensionamento e la selezione dell'architettura di elettificazione della linea in esame;

¹ Il Codice dell'Amministrazione Digitale, dal 2006, promuove la disponibilità dei dati delle pubbliche amministrazioni e indica le modalità da seguire per renderli fruibili a tutte le amministrazioni interessate.

- il confronto economico fra le varie alternative tecnologiche di elettrificazione e fra alimentazione elettrica ed alimentazione convenzionale, in termini di costi sostenuti dagli operatori e di esternalità negative.

A margine, sono state sviluppate le procedure per l'acquisizione automatizzata e l'archiviazione strutturata dei dati disponibili e per la visualizzazione su GIS dei dati aziendali e di input/output dei moduli di calcolo realizzati e verificare il funzionamento generale dell'intero processo su adeguati casi di test.

Lo sviluppo del codice è stato preceduto da una User Needs Analysis presso le Aziende di Trasporto Pubblico Locale mirata ad individuare le questioni di maggiore interesse di queste ultime rispetto al processo di elettrificazione; inoltre si è provveduto ad effettuare un'indagine desk sulla disponibilità di dati Open relativi all'offerta ed alla domanda di TPL (linee, fermate, orari, veicoli) ed alle caratteristiche di tali dati.

Il nuovo sistema di supporto alle decisioni sopraggiunge in un momento particolarmente favorevole all'innovazione tecnologica delle aziende di trasporto pubblico locale. Infatti dopo diversi anni (2010-2013), nei quali si è registrato un vero e proprio blocco agli acquisti di nuovi autobus a causa degli elevati tagli imposti dalla spending review ai finanziamenti al Trasporto Pubblico Locale, dal 2014 sono state messe in atto dal governo una serie di misure per incentivare il trasporto pubblico locale, destinando anche ingenti risorse per l'acquisto di nuovi autobus, tra questi: fondi del Ministero dell'Ambiente destinati all' "Accordo di Programma per la qualità dell'aria 2012-2015", il " Fondo per l'acquisto di veicoli del trasporto pubblico locale " che prevede lo stanziamento di 300 milioni di euro per il 2014 e di 100 milioni di euro per ciascuno degli anni 2015 e 2016. Le regioni, inoltre, possono disporre dei Fondi POR-FESR 2014-2020 e PON METRO da destinare anche al rinnovo della flotta di TPL. A fronte di una età media del parco autobus circolante in Italia, pari a 12,2 anni, rispetto ad una media europea di 7,5 anni², lo svecchiamento del parco autobus, è stato reso obbligatorio con il Decreto attuativo sui servizi pubblici locali di interesse generale del 2016 nel quale, per il settore dei trasporti, è previsto che nei contratti di servizio, stipulati dopo il 31/12/2017, non potranno essere ammessi i veicoli appartenenti alle categorie M2 e M3 con caratteristiche antinquinamento Euro 0 e Euro 1. Precedentemente, già la Legge di Stabilità 2015 sanciva il divieto di circolazione per gli autobus Euro 0 a partire dal 1° gennaio 2019 destinando contestualmente, per l'anno 2015, 625 milioni di euro per la sostituzione dei veicoli a gasolio. Entro il 2019, quindi, dovranno essere sostituiti circa 8.500 bus, numero destinato a crescere se si aggiungono anche gli Euro 1 e gli Euro 2 che a quella data avranno una età media di 19 anni³.

Alcune regioni stanno predisponendo piani di investimento, in alcuni casi anche molto consistenti, per l'acquisto di nuovi autobus. Sempre più aziende di TPL, stanno acquistando autobus elettrici, (Es. GTT 16 autobus 12 metri e 8 autobus 8 metri, ATM 10 autobus 12 metri ,ecc.) spinti principalmente da motivi di sostenibilità ambientale, ma rassicurati dal fatto che gli e-bus, oggi in commercio, consentono una performance operativa che può essere uguale a quella degli autobus a propulsione convenzionale con costi di esercizio e di manutenzione ridotti e tali da riuscire, con opportuni accorgimenti, ad ammortizzare l'extracosto per l'acquisto dell'autobus elettrico nell'arco di vita utile del veicolo e i costi delle stazioni di ricarica elettrica che per altro hanno la possibilità di essere cofinanziati grazie agli interventi messi in atto dal governo (PNIRE).

Secondo l'ANFIA⁴, la sostituzione degli 8.500 autobus Euro 0 con bus elettrici necessiterebbe di un investimento complessivo pari a 1,87 miliardi di Euro, mentre l'allineamento dell'età media del parco bus nazionale alla media europea, richiederebbe la sostituzione di 34.000 autobus in 10 anni, con un investimento pubblico, al netto dei benefici, stimato in 3,8 miliardi di euro. I maggiori investimenti pubblici previsti per l'elettrico dovrebbero, comunque, essere soppesati con i maggiori vantaggi derivabili per la collettività in termini di riduzione di esternalità. Una tale partita finanziaria merita approfondite valutazioni a priori, attraverso procedure il più possibile condivise e ripercorribili.

² Fonte UITP

³ Italia – Focus comparto autobus, ANFIA 2015

⁴ ANFIA, Indagine conoscitiva sul Trasporto Pubblico locale, Roma, 2013.

2 L'elettificazione del TPL, opportunità tecnologiche ed esempi applicativi esistenti

2.1 Introduzione

Gli autobus elettrici stanno, timidamente, facendo la loro comparsa nelle flotte delle aziende di Trasporto pubblico collettivo nazionali; già in passato, però, e precisamente dalla fine degli anni '90, inizi anni 2000, alcune realtà, e tra queste: Roma, Torino, e Firenze, avevano acquistato e messo in esercizio dei minibus elettrici, attrezzati con batterie elettrochimiche al piombo che presentavano un lungo tempo di ricarica e una vita media alquanto breve.

L'avvento delle batterie Litio Ione e la situazione sempre più drammatica dell'inquinamento ambientale delle città italiane, ha spinto molte aziende di trasporto pubblico a rinnovare la propria flotta con veicoli a basso impatto ambientale: metano, elettrici, ibridi.

La flotta nazionale complessiva (privata, pubblica, noleggio) di bus elettrici, al 2015, ammonta a circa 495 unità (fonte ACI) e rappresenta solo lo 0,5% del parco totale autobus, che è pari a circa 98.000 unità dei quali, 50.600 unità sono destinati al trasporto pubblico collettivo.

In tabella, l'elenco delle province italiane nelle quali il servizio di Trasporto Pubblico collettivo è realizzato anche con autobus elettrici (> 10 unità); si riporta inoltre per ogni provincia il numero di mezzi elettrici al 2015.

Tabella 1: parco circolante bus elettrici complessivo (privato, pubblico, noleggio)

Provincia	N. Bus Elettrici	N. Totale Bus
TRAPANI	10	529
SIRACUSA	11	360
MILANO	11	3.462
BARI	12	3.012
CHIETI	13	1.764
CATANIA	14	1.588
PALERMO	14	2.341
PISA	16	1.399
FIRENZE	17	1.214
NAPOLI	23	5.946
FROSINONE	24	1.528
BOLOGNA	26	1.622
TORINO	30	3.190
PERUGIA	35	1.654
ROMA	84	8.589

Fonte: ACI

2.2 Gli autobus elettrici presenti sul mercato nazionale

Ormai il mercato offre una gamma di autobus a trazione puramente elettrica che copre tutte le categorie da 5-6 metri fino ai 18 metri con tecnologie sempre più avanzate sia relativamente ai sistemi di accumulo sia alle modalità di ricarica.

Di seguito verrà presentata una sintetica panoramica, non esaustiva, dei modelli di autobus elettrici presenti attualmente sul mercato italiano, molti dei quali, anche se in fase sperimentale, sono già in esercizio presso aziende nazionali di TPL.



Figura 1: Gulliver base e Gulliver con batterie al Na/NiCl₂

Tecnobus: *Gulliver*

La azienda TECNOBUS S.p.A. di Frosinone da circa un ventennio svolge attività di progettazione, realizzazione e produzione di autobus elettrici destinati al trasporto pubblico urbano; il primo GULLIVER elettrico, lungo circa 5 metri, era attrezzato con batterie convenzionali al piombo-acido che venivano sostituite ai capolinea in pochi minuti, manualmente utilizzando un comune transpallet garantendo così un'autonomia praticamente illimitata. Nel corso degli anni sono state realizzate diverse versioni del minibus GULLIVER elettrico fino all'ultimo modello con batterie al Na/NiCl₂ (Sodio Nichel Cloruri) che consentono una autonomia di percorrenza fino a 130 km, e con consumi ridotti per il raffrescamento dell'aria grazie ad un impianto di aria condizionata di ultima generazione.

I primi 52 Gulliver circa 13 anni fa sono stati acquistati dall' ATAC di Roma consentendo una percorrenza annua di oltre un milione e mezzo di chilometri, altri 30 autobus sono presenti nella flotta della azienda napoletana ANM di Napoli e 26 in quella di ATAF di Firenze.

Ecopowertechnology: *Elfo*

I minibus della Ecopowertechnology (BS) realizzati su telaio Cacciamali sono, insieme ai Gulliver, i primi autobus elettrici prodotti in Italia ed ancora in esercizio presso alcune aziende TPL. Hanno una lunghezza di 7,5 metri e, a seconda dei modelli, una disponibilità di 24/42 posti totali ed una potenza del motore di 120 kW e 162 kW e un consumo di energia di circa 1 kWh/kilometro; sono alimentati da un pacco di 56 batterie piombo-gel. Sono in esercizio dal 2003 a Genova e Torino (23 vetture) dove, nel 2015, grazie ad un cofinanziamento del Ministero dell'Ambiente, sono state sostituite le batterie "piombo gel" con batterie a litio sull'intero parco dei bus elettrici. Questo intervento permetterà una riduzione dei consumi energetici del 30%, da 1,0 kWh/km a 0,7 kWh/km, grazie anche al maggior recupero di energia in frenata.⁵ Si caratterizzano anche per la particolarità di poter essere dotati di un sistema automatico di ricarica al capolinea, di derivazione industriale, da terra, senza contatto.

⁵ Bilancio sostenibilità 2014 GTT



Figura 2: Minibus Elfo in esercizio a Torino

BredaMenarini: ZEUS e E-Vivacity

Il minibus ZEUS prodotto dalla BredaMenarini azienda che dal gennaio 2015 fa parte della neocostituita IIA (Industria Italiana Autobus S.p.A.), è lungo circa 6 metri, con una disponibilità di posti variabile 25-30-32 in base ai modelli; dotato di batterie costituite da 78 celle ai polimeri di litio, alloggiato nel vano posteriore del veicolo, possono essere sostituite in pochi minuti con un comune transpallet o ricaricate a bordo in meno di 10 ore. La capacità complessiva del sistema di accumulo per la trazione è di circa 70 kWh e in grado di garantire un'autonomia di 140km (circa 6/7 ore su terreno pianeggiante). In Italia già alcune aziende annoverano nella loro flotta qualche minibus Zeus tra queste: Imperia, Firenze e il Comune di Triggiano in Puglia.

Nel 2014 Enel e BredaMenarini hanno firmato un accordo per svolgere uno studio di compatibilità tra il minibus da 6 metri ZEUS della BredaMenarini e l'infrastruttura di ricarica "Fast Recharge" da 43 kW di Enel.

Il modello "E-Vivacity" della BredaMenarini è una rivisitazione in versione full electric del modello Vivacity con una lunghezza massima di 8 m offre una disponibilità di 49-54-56 posti totali, equipaggiato con 648 celle a litio-ferro-fosfati per una potenza complessiva di 187 kW offrono la possibilità di circa 200 km di percorrenza con batteria carica, prima di necessitare di ricarica che può durare anche meno di 4 ore.

IVECO: DAILY

Iveco ha sviluppato e realizzato il primo Daily a propulsione elettrica nel 1986, nel corso degli anni ha ampliato e differenziato la produzione includendo anche autobus urbani. L'ultimo modello il Daily 50 C, 7 metri di lunghezza è disponibile nelle versioni 16 o 19 posti, è dotato di 2 o 3 batterie al Na/NiCl₂ (Sodio Nichel Cloruri) integrate con supercapacitori che consentono un'autonomia fino a 280 km. Per la ricarica delle batterie adotta la "modalità 3" dello standard europeo, compatibile sia con la ricarica domestica che pubblica con possibilità anche di ricarica rapida (1 ora). L'Azienda è anche produttrice di un Daily elettrico bimodale che non ha nessun limite di percorrenza per il fatto che è dotato di un motore alimentato a gasolio per la trazione. La trazione può avvenire in modalità esclusivamente elettrica con un'autonomia di circa 45 km e la ricarica delle batterie ai polimeri di litio avviene da rete 380V o 220 V con un tempo di ricarica di 6-8 ore.

Rampini: Alé e E60

L'autobus Alé elettrico dell'azienda italiana Rampini, versione elettrica dell'omologo con motore termico, ha una lunghezza di 7,8 metri con una capacità di carico di 44 posti in totale; il motore elettrico della Siemens ha una potenza di picco di 150 kW e utilizza batterie costituite da celle Li-Fe per una energia totale di 180 kWh che consente una autonomia di 130/150 km con la possibilità di effettuare la ricarica a partire da un tempo minimo di 2 ore; è possibile installare un pantografo sul tetto dell'autobus riducendo così il tempo di ricarica (con collegamento ad una comune linea aerea tramviaria) a 15 minuti, dotando l'autobus di super capacitori.

L'Alé elettrico (con pantografo) è da tempo in circolazione in molte città europee ed in Italia a Piacenza, Gorizia, Siena⁶, Foligno nella versione senza pantografo .

Recentemente la Rampini ha prodotto e messo a listino un nuovo autobus progettato appositamente per la trazione elettrica l'“E60”. Il nuovo autobus urbano lungo 6 metri, a pianale interamente ribassato e posto per disabili, ha la possibilità di portare fino a 25 persone, offre una autonomia nominale di 110 km ed è dotato di un motore con potenza di picco pari a 50 kW nominali. Il sistema di accumulo è costituito da batterie Li/Fe con capacità di 100 kWh con possibilità di ricarica tramite pantografo.



Figura 3: Rampini E60

Solaris: Urbino Electric 9, 12, 18 metri

La Solaris S.p.A, società polacca, produce e vende in Italia tre versioni di autobus elettrico :il primo lungo circa 9 metri può trasportare 29 passeggeri, il secondo, da 12 metri, ha una capacità massima di 85 passeggeri e infine il 18 metri snodato, offre un totale di 181 posti.

Tutti i modelli installano batterie agli ioni di Litio che nei modelli 9 e 12, 18 metri, versioni standard, hanno una capacità totale rispettivamente di 120 kWh, di 160 kWh e di 240 kWh; il 12 metri e il 18 metri offrono diverse configurazioni per il pacco batterie in termini di potenza e capacità in modo da rispondere all’esigenze del cliente ed essere più appropriati al percorso su cui il bus deve essere utilizzato.

Gli autobus “Urbino Electric” si contraddistinguono per la versatilità nei sistemi di ricarica, tutti gli autobus sono ricaricabili tramite la presa di corrente di tipo Plug-in, i modelli 12 e 18 metri offrono anche la possibilità di ricarica rapida tramite pantografo e la ricarica induttiva. Nel modello 18 metri il sistema di ricarica senza contatto elettrico ha consentito l'utilizzo di batterie, relativamente piccole, aventi capacità di 90 kWh che oltre a fornire l’energia per la trazione alimentano anche tutti i sistemi ausiliari.

Gli Urbino elettrici sono già in circolazione in Austria, Germania, Svezia, Polonia e presto anche in Spagna ma non ancora in Italia.



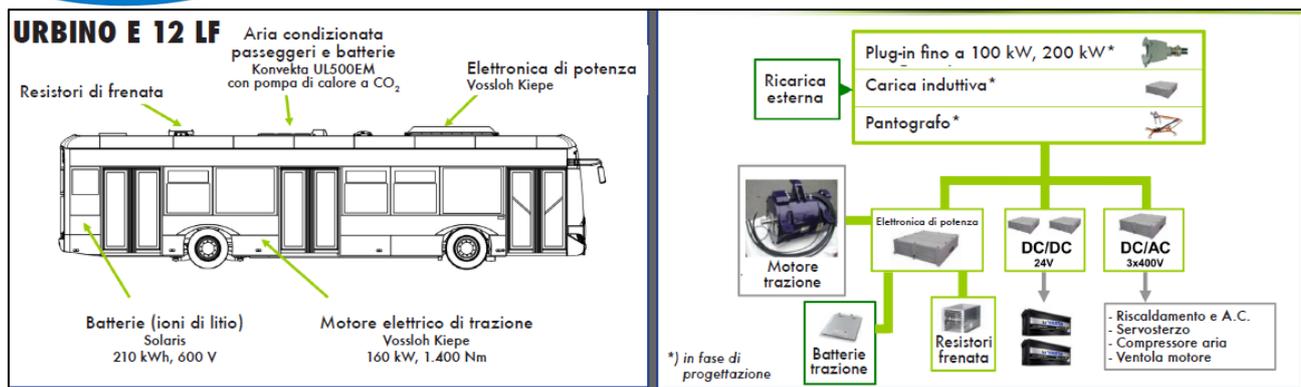


Figura 4: Caratteristiche tecniche degli autobus URBINO

Rama: E-LIFE 12, 18 metri

Rama S.p.A., dal 2010 in Tiemme S.p.a, ha avviato nel 2008 un progetto, in collaborazione con Bredamenarini e le società cinesi dalla Ruihua New Energy Auto di Shangai e dalla Alfabus di Jiangsu, per la realizzazione di un prototipo di bus da 12 metri a trazione completamente elettrica. Il prototipo dell'“Elife” è entrato nel 2012 in esercizio nella città di Grosseto. Il primo Elife di 12 metri offre una capienza di 28 posti a sedere e 64 totali, dotato di batteria al litio-ferro-fosfati, è in grado di garantire una percorrenza di circa 200 km tra due ricariche, ovvero la percorrenza media giornaliera di un autobus urbano. Le batterie hanno una vita utile di 7 anni. Inoltre, grazie ai 13 moduli di supercapacitori di cui è dotato, il bus può accumulare energia in fase di frenata e quindi rilasciarla in fase di accelerazione. Il motore ha una potenza di 90 kW che gli consente di raggiungere una velocità massima 90 km/h.

Successivamente sono stati realizzati nuovi mezzi elettrici da 12 e 18 metri articolato, capaci di trasportare rispettivamente 71 e 135 passeggeri. Due autobus da 12 metri sono stati utilizzati ad EXPO2015 per il trasporto dei visitatori.



Figura 5: E-LIFE 12 metri

Gli autobus sono equipaggiati con i nuovi motori elettrici ad alto rendimento da 120/220 kW per l'autobus di 12 metri e da 160/240 kW per il 18 metri con un consumo energetico di 1,1 kWh/km (riscaldamento compreso) ed un pacco batterie con celle al litio-ferro-fosfato (LiFePO4). Le batterie garantiscono più di 2.500 cicli di ricarica ed il completo riciclaggio delle batterie a fine vita, con costi di manutenzione del veicolo tra il 70% e l'80% in meno, rispetto ad un bus diesel.⁷

I bus E-life sono in grado di percorrere fino a 300 km senza interruzione del servizio con un pacco batteria standard e ricarica notturna. E' comunque possibile utilizzare un minor numero di batterie con una capacità inferiore di energia e quindi con un'autonomia minore che però può garantire una percorrenza analoga ma con ricariche totali o parziali al capolinea durante il servizio diurno. Le caratteristiche tecniche dettagliate dei veicoli sono riportate nell'allegato, di seguito si riportano solo le caratteristiche del parco batteria:

Capacità delle batterie:

⁷ <http://www.italyogreen.it/e12.html>

- e12 : tre opzioni di Battery Pack da 240 - 270 - 310 kWh
- e18 : tre opzioni di Battery Pack da 414 - 466 - 518 kWh

Sistemi di ricarica possibili:

- e12 –e18³:
 - ricarica notturna (carica lenta): eg100A (40 kWh) = 6-8 ore
 - ricarica rapida: ad esempio, 200A (80 kWh) = 3,5 ore
 - ricarica Boost (carica ultra rapida): ad es., 500A (200 kWh) = 2 ore

VOLVO: 7900 Hybrid, 7900 Electric

La Volvo ha prodotto un autobus ibrido plug-in da 12 metri di lunghezza che offre la possibilità di trasportare fino a 85 passeggeri, l'autobus ibrido è dotato di batterie agli ioni di litio ad alta capacità che gli consentono di percorrere in modalità elettrica, in media, il 70% del percorso. Recentemente è stata presentata la versione full-electric che è in servizio sperimentale a Gotenborg; tra un paio di anni arriverà sul mercato. Il full-electric è di uguale lunghezza e utilizza la stessa tecnologia per il sistema di accumulo, ioni di litio con una capacità di 4*19 kWh e per il sistema di ricarica. Infatti entrambi gli autobus sono allestiti per la ricarica rapida da pantografo sviluppato dalla ABB e prodotto in Italia (vedi paragrafo successivo) con un sistema di "opportunity recharging" della Volvo, sia ai capolinea con una ricarica di 4 ore, sia con ricarica rapida alle fermate con tempi pari a 6 min.



Figura 6: Volvo "7900", ibrido plug-in in circolazione ad Amburgo dal 2014

2.3 I sistemi di ricarica elettrica

Le batterie degli autobus elettrici, oltre che con la sostituzione del pacco batteria "battery swap" (solo per i Gulliver), possono essere ricaricate in modalità "opportunity" (durante le soste ai capolinea ed alle fermate durante il servizio) o al deposito/capolinea durante la pausa notturna. L'elemento discriminante è il lasso di tempo a disposizione per realizzare il necessario rifornimento energetico che varia da diverse ore per la ricarica notturna (ricarica lenta) ad alcuni minuti per quella al capolinea (ricarica veloce) fino ad arrivare a pochi secondi per quella alle fermate (ricarica ultrarapida o "flash"). Tali esigenze temporali devono essere compatibili con il servizio operato e quindi con le possibilità di sosta dell'autobus al deposito, al capolinea ed alle fermate.

Le diverse modalità di ricarica sono direttamente collegate con la capacità delle batterie da installare a bordo del bus: più veloce e frequente è la ricarica meno capacità è richiesta al sistema di accumulo, tanto meno peso dovrà essere caricato sull'autobus e pertanto inferiore sarà anche il costo dell'accumulo chimico; d'altro canto però la ricarica lungo il percorso dell'autobus richiede la realizzazione di più punti di ricarica con conseguente aumento dei costi infrastrutturali, in funzione anche dei valori di potenza richiesti per realizzare la ricarica in tempi molto ridotti. Inoltre, il rifornimento durante il servizio di linea potrebbe comportare aumenti dei tempi di percorrenza con il rischio di dover integrare la flotta con altri mezzi. In base alla classificazione delle

infrastrutture di ricarica operata da Cenelec ed Eurelectric, e adottata nel “Piano Nazionale Infrastrutturale per la Ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica (PNIRE)”⁸, le stazioni di ricarica vengono classificate in base alla potenza erogata, in: *Normal Power*, *Medium Power*, *High Power (AC o DC)*, come illustra la Tabella 2.

Tabella 2: Classificazione infrastrutture di ricarica

Power nomination	Mains connection	Power in kW	Power in Amps	Recharge range/hour ²³	Location
Normal power ²⁴	1-Phase AC connection	≤ 3.7	10-16	<20 km	Domestic
Medium power	1- or 3-phase AC connection	3.7 -22	16-32	20 – 110 km	Semi-Public
High power	3-phase AC connection	> 22	> 32	>110 km	Public
High power	DC connection	> 22	> 32 ²⁵	>110 km	Public

²⁵ With a DC connection the power to the vehicle is fed at the vehicle battery DC voltage, which normally ranges from 150-350 volts, so the amperage is related to the DC power and voltage.

Fonte: Eurelectric

La *Normal Power* è generalmente accomunata al termine di *Slow Charging* (Ricarica Lenta) ed eroga una potenza massima in Corrente Alternata (AC), pari a 3,7 kW. Trova normalmente impiego negli ambienti domestici o in ambienti pubblici come lungo i cordoli del marciapiedi o nei parcheggi. La Figura 7 mostra la principale componentistica necessaria per la ricarica e la marcia.

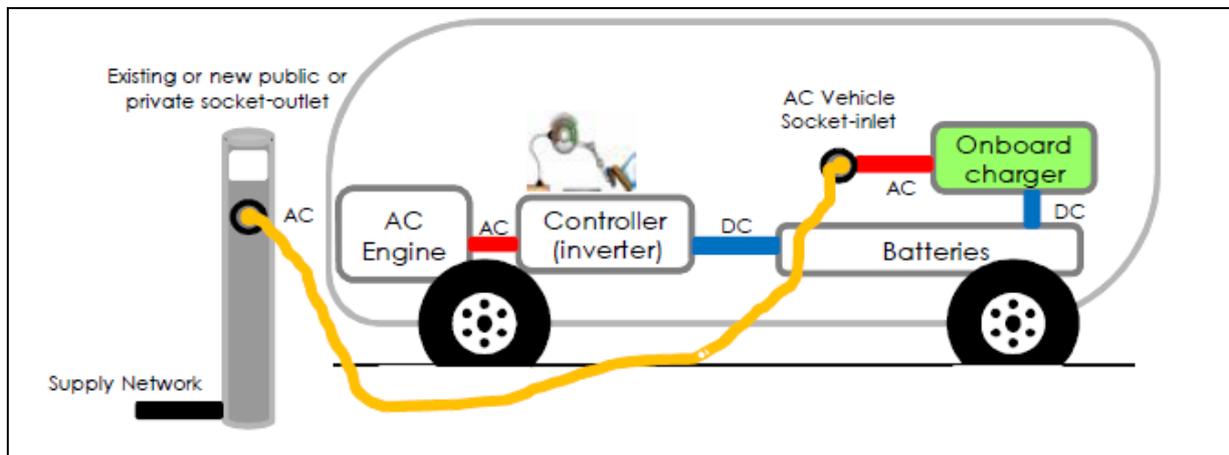


Figura 7: Schema per Slow Power Charge Fonte: Cenelec

La *Medium Power* è generalmente accomunata al termine di *Quick Charging* (Ricarica Rapida) ed eroga una potenza in AC (monofase o trifase) compresa tra 3,7 kW e 22 kW, il suo impiego è previsto in luoghi pubblici o semipubblici.

Nel caso *High Power* o anche detto *Fast Charging* (Ricarica Veloce) viene erogata una potenza superiore ai 22 kW ed è generalmente impiegata in luoghi pubblici. Attualmente, le stazioni di ricarica che rientrano in questa categoria, arrivano ad erogare una potenza massima di 43 kW AC e 50 kW in Corrente Continua (CC). In funzione della tipologia di connessione, quindi, si distingueranno le stazioni in *High Power AC charge* dalle *High Power DC charge*.

⁸ Piano Nazionale Infrastrutturale per la Ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, luglio 2013. http://www.mit.gov.it/mit/mop_all.php?p_id=20858

Il funzionamento per la ricarica e la marcia in *Medium Power* e in *High Power AC charge* è simile e viene riportato in Figura 8, mentre quello in *High Power DC charge* è illustrato in Figura 9.

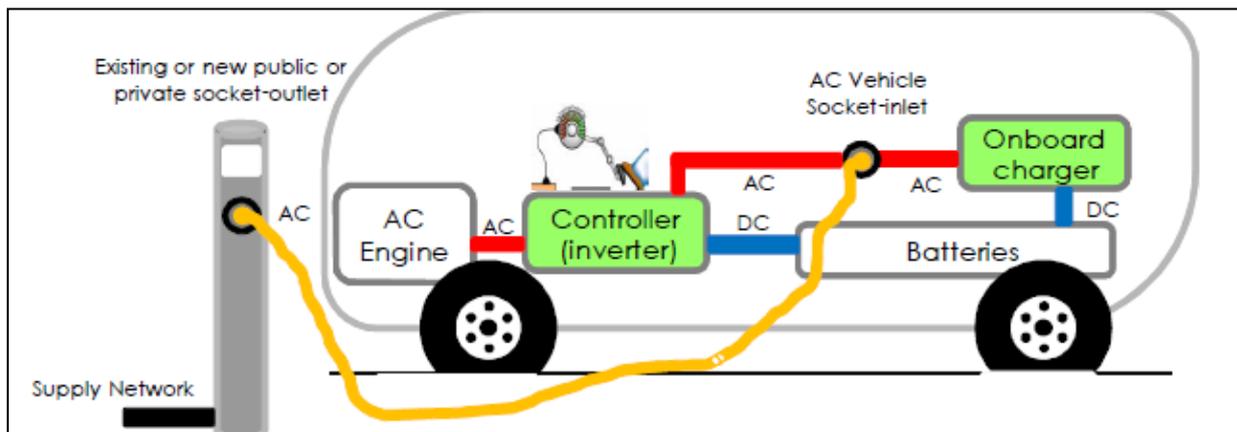


Figura 8: Schema per Medium Power charge e High Power charge in AC

Fonte: Cenelec

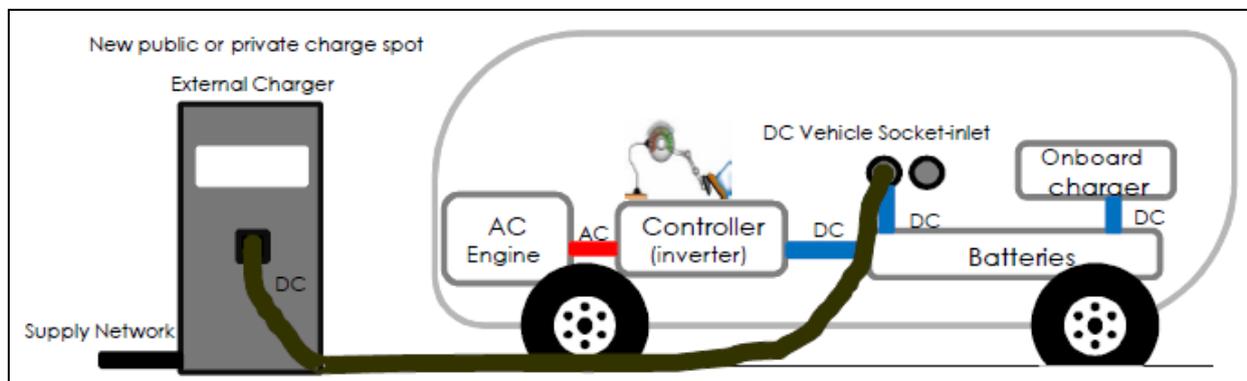


Figura 9: Schema per High Power charge in DC

Fonte: Cenelec

La Figura 10 riporta lo schema della classificazione dei sistemi per la ricarica in base alla potenza e ai tempi di ricarica che passano dalle 6-9 ore della ricarica *Slow* nel caso, 30-50 minuti nel caso della *Fast* in AC trifase con 43 kW e a tempi di poco inferiori ai 30 minuti nel caso di connessione in CC con 50 kW di potenza. Nella categoria *Very Fast* (Ricarica Ultraveloce) ricadono tutte le erogazioni di potenza superiori ai 50 kW e in quest'ultimo caso le connessioni sono sempre in CC mentre i tempi sono previsti dai 20 minuti a scendere fino ad essere espressi in termini di secondi.

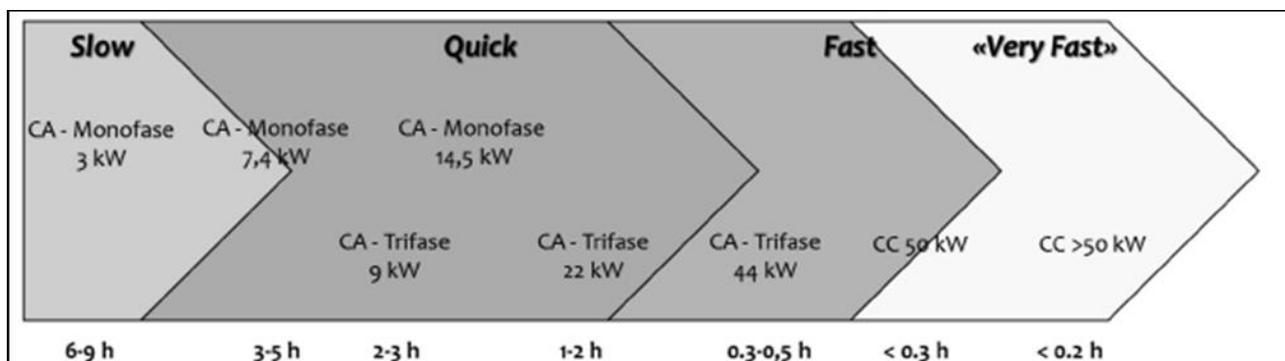


Figura 10: Schema di classificazione infrastrutture di ricarica

Fonte: PNIRE

Una standardizzazione dei sistemi di ricarica per gli e-bus purtroppo ancora non esiste anche se normative europee a riguardo, dovrebbero entrare in vigore nel 2019, seguite nel 2020 dagli standard internazionali.

Si segnala, però, il recente accordo intervenuto tra costruttori europei di autobus elettrici quali Irizar, Solaris, VDL e Volvo, e fornitori di sistemi di ricarica ABB, Heliox e Siemens, Bombardier per l'adozione di un sistema di ricarica standard aperto e trasparente. A tal fine sono state avviate attività di standardizzazione in capo al Cen-Cenelec e attività normativa in capo al Iso-iec⁹. Le interfacce condivise verranno messe a disposizione di tutti gli attori del mercato e verranno impiegate per gli autobus elettrici che utilizzano il metodo di ricarica "opportunity" e per i mezzi con ricarica notturna.

Esistono due tecnologie per i sistemi di ricarica: la prima di "**tipo conduttivo**" con un collegamento diretto, "fisico" fra il caricatore e la batteria, la seconda di "**tipo induttivo**" senza contatto.

2.3.1 Ricarica di tipo conduttivo

Ad oggi aziende di TPL preferiscono indirizzarsi verso sistemi di "ricarica lenta" (tempi superiori alle 3-4 ore) generalmente notturna; questa tecnologia, infatti, ormai matura garantisce la sicurezza nel servizio diurno, in quanto gli autobus sono dotati di un pacco batterie di capacità elevate (ad esempio > 200 kWh per gli autobus di 12 metri e > 400 kWh per gli autobus di 18 metri) tali da garantire in tranquillità la percorrenza richiesta giornalmente (anche > 200 km). In questo caso, la connessione fra stazione di ricarica e veicolo è generalmente realizzata via cavo.

Gli autobus elettrici dotati di pantografo (es. Alè della Rampini, (Figura 11) possono ricaricare le batterie collegandosi alle catenarie dei tram prelevando, ad esempio in soli 15 minuti l'energia che serve per una autonomia di circa 80 chilometri restando così in servizio continuativo per tutta la giornata, mentre la ricarica completa notturna delle batterie, se necessaria, viene effettuata in deposito.

Altra soluzione tecnologica è quella che invece prevede una sistema di ricarica fisso appositamente realizzato per fornire energia tramite pantografo. Le stazioni possono avere potenze di ricarica variabili a seconda delle necessità da 150 kW, a 600 kW. Il sistema a 450 kW è in grado, ad esempio, di fornire in 12 soste di 5 minuti ciascuna tutta l'energia necessaria ad un autobus da 12 m per percorrere il proprio tragitto urbano.

Nel 2014 nell'ambito di un progetto partecipato dall'azienda di trasporto pubblico locale della città di Ginevra e dalla ABB è stato sperimentato per circa un anno e mezzo il sistema "TOSA" (vedi Figura 12), un nuovo sistema di ricarica flash per bus elettrici. Il sistema consiste in un braccio meccanico controllato installato alle fermate che si connette in meno di un secondo al rispettivo dispositivo posizionato sul tetto del bus fornendo una ricarica parziale in 15 secondi tempo stimato per la salita e discesa dei passeggeri e che, pertanto, non incide sui tempi del servizio¹⁰. Il sistema di ricarica ultrarapida con una potenza di 600 kW è riuscito a ricaricare alle fermate predisposte, le batterie di un bus elettrico articolato (18,7 m) capace di trasportare 132 persone. Una seconda stazione di ricarica installata al capolinea con una ricarica di 3-4 minuti riportava la batteria allo stato di carica di inizio ciclo. Un'applicazione su larga scala di questa tecnologia partirà a breve in Svizzera dove la società ABB si è aggiudicata un ordine per la fornitura e l'installazione di 13 stazioni di ricarica "ultra rapida" che verranno dislocate lungo la linea che collega l'aeroporto di Ginevra alla periferia della città.

Nel prossimo futuro verranno costruiti, inoltre, 12 e-bus dalla svizzera HESS e 13 stazioni di ricarica ultraveloce dalla ABB che fornirà, tra l'altro molta della componentistica per la costruzione degli e-bus che circoleranno su una linea di 12 km. La consegna della commessa è prevista per il 2018. Altro esempio di soluzioni tecnologiche offerte per la mobilità pubblica nella variante elettrica è data dalla tecnologia integrata Ebus Gamma 320KW Fast-Charger che fornisce sia l'e-bus GAMMA sia la rispettiva stazione di ricarica veloce con pantografo, ciascuna delle quali, normalmente, è in grado di rifornire 8 bus con turni di pochi minuti ciascuno alla volta.

⁹ <http://www.e-gazette.it/sezione/tecnologia/mobilita-intelligente-intesa-costruttori-europei-bus-elettrici>

¹⁰ https://library.e.abb.com/public/d78b84acc3c4d03a946234f56ae5252/LeafletTOSA_EN_2015.pdf



Figura 11: Esempio di ricarica con collegamento pantografo a catenaria (autobus ALè a Vienna)
 Fonte: RAMPINI

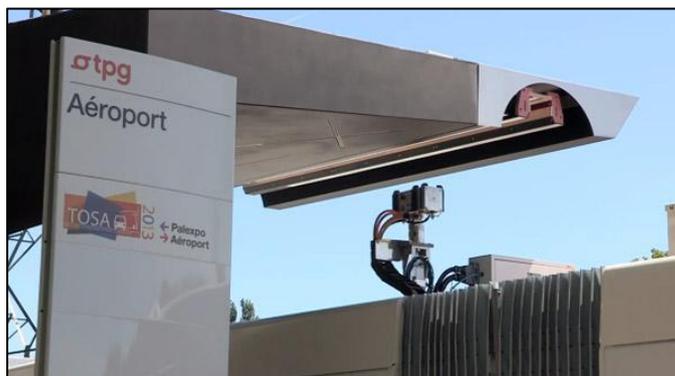
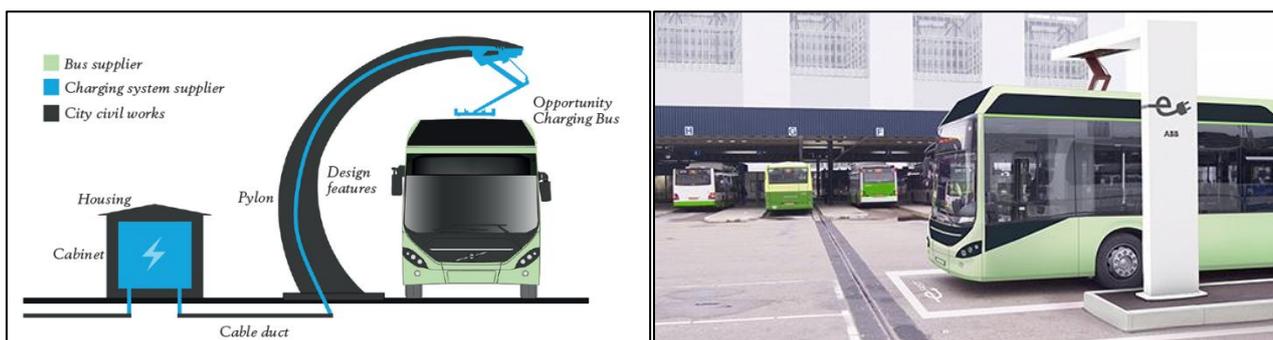


Figura 12: Esempio di ricarica con collegamento pantografo a stazione di ricarica (Sistema TOSA a Ginevra)
 Fonte: ABB 2013

La più recente innovazione tecnologica per quel che riguarda i sistemi a ricarica conduttiva “rapida” (4-6 minuti) e/o “ultra rapida” (una decina di secondi) prevede la presenza di un pantografo rovesciato, installato sulla stazione di ricarica e non sull’autobus (vedi Figura 13) con il vantaggio di non appesantire il veicolo e quindi di non incidere sulla percorrenza e di avere minori esigenze di ricarica delle batterie. Le stazioni di ricarica rapida/ultrarapida possono essere facilmente integrate nelle linee urbane esistenti presso stazioni di capolinea, depositi e/o fermate intermedie (vedi Figura 13).



Fonte: VOLVO

Fonte: ABB

Figura 13: Schema stazione “Opportunity charging” a pantografo rovesciato

Il sistema di ricarica dall’alto prevede che il collegamento autobus-punto di ricarica avvenga in modo automatico quando l'autobus si ferma sotto la stazione di ricarica; il veicolo comunica via wireless con l'unità di ricarica e il pantografo viene abbassato automaticamente nella posizione richiesta anche in meno di un secondo (fonte ABB). Dopo aver eseguito tutti i controlli di sicurezza, il sistema eroga all’autobus una ricarica veloce. Per trasferire alle batterie quanta più energia è possibile nel minor tempo (pochi secondi), il flusso energetico deve essere molto intenso e le batterie di bordo devono essere capaci di assorbire molto rapidamente l’energia ricevuta.

2.3.2 Ricarica wireless

La ricarica di tipo induttivo “senza contatto” (contactless o wireless o plugless) si effettua grazie all'accoppiamento magnetico di due bobine “trasmittente” e “ricevente”, poste ad una distanza di pochi centimetri l'una dall'altra; la bobina trasmittente, con una potenza massima di qualche centinaio di kW, è installata sotto l'asfalto, alle fermate o ai capolinea, mentre la bobina ricevente nella parte inferiore del veicolo assorbe energia e la trasferisce in batteria (sino a 3 kWh al minuto).

La ricarica induttiva è sicuramente una soluzione tecnologica molto efficace dal punto di vista dell'utilizzo, infatti è sufficiente posizionare il veicolo in un posto determinato, senza necessità di collegamenti con cavi elettrici, presenta, però, ancora alcune criticità legate al costo e alla sicurezza del sistema.

La tecnologia di ricarica wireless può essere di tipo stazionario (WPT) quando la ricarica avviene con l'autobus in sosta e di tipo dinamico se la ricarica avviene con il veicolo in movimento, quest'ultima è una tecnologia ancora in corso di sviluppo.

In Italia, qualche anno fa, l'azienda di trasporto pubblico GTT di Torino e quella di Genova AMT hanno sperimentato un sistema di ricarica wireless ai capolinea. A Savona, invece, recentemente è stata avviata la sperimentazione di un autobus elettrico della Bombardier le cui batterie vengono ricaricate mediante il sistema di ricarica “Primove” (vedi Figura 14) sempre della Bombardier, che consente la ricarica rapida delle batterie durante le soste ai capolinea o alle fermate intermedie dei bus.

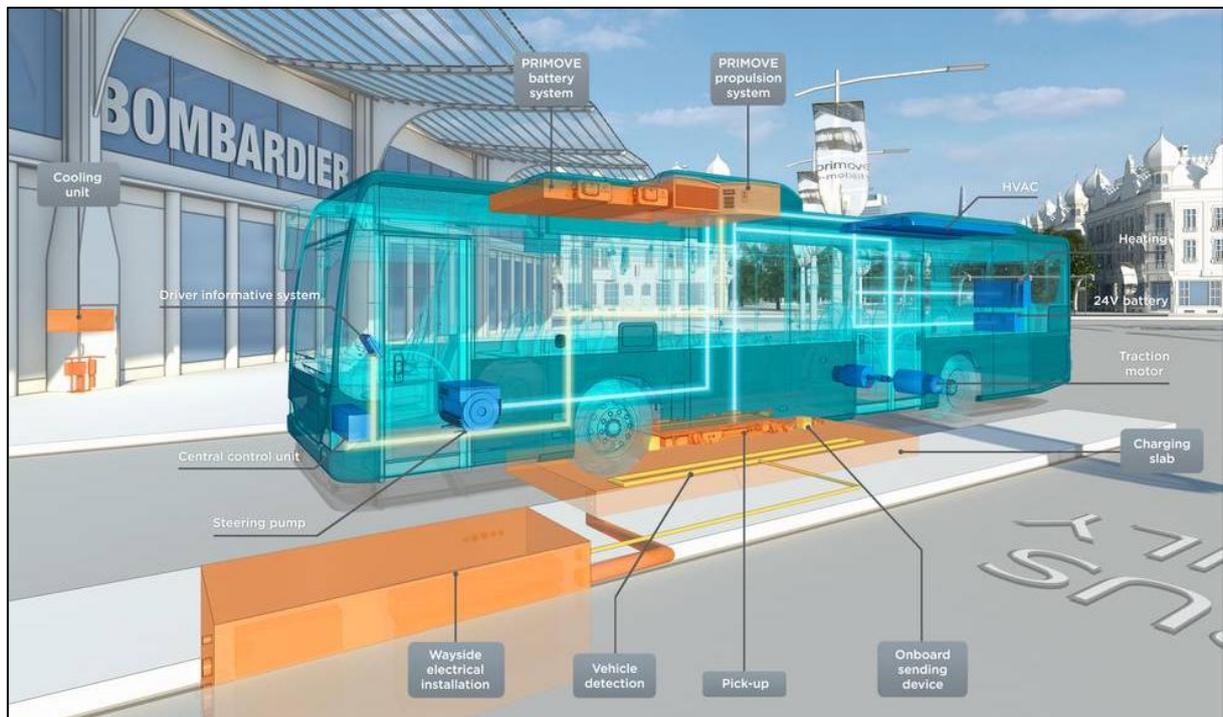


Figura 14: Sistema di ricarica ad induzione del modello “Primove”

Fonte: Bombardier

La Bombardier offre con il sistema “Primove” un pacchetto flessibile di soluzioni tecnologiche innovative¹¹ per gli autobus elettrici che comprende tre tecnologie d'avanguardia :

- a) un sistema di accumulo agli ioni di litio modulare, scalabile, compatto, ultraleggero (da 1,5 a 3 tonnellate) che occupa poco spazio e si ricarica tre volte più velocemente di un tradizionale mediante una modalità di ricarica ad induzione magnetica;
- b) un sistema modulare di propulsione e controllo (vedi Appendice);
- c) un sistema di ricarica wireless.

Il sistema di ricarica è costituito da una piastra magnetica, installata sotto il pianale del veicolo, che si abbassa quando l'autobus è fermo e prende in pochi minuti l'energia (potenza massima @200 kW) da una seconda piastra prefabbricata che viene posizionata sotto l'asfalto, lunga cinque metri, larga due metri e con uno spessore di 25 centimetri e un peso di sette tonnellate ¹².

Il sistema di bordo (sistema di ricarica ad induzione + batterie ad alta tecnologia) che può essere installato su diversi modelli di autobus è già stato testato su autobus prodotti dalle aziende: Solaris, Rampini, Viseon, Hess.

Technical data in standard configuration			
	Propulsion 140-2	Propulsion 200-1	Propulsion 200-2
Dimensions (mm)	375 x 1810 x 900	375 x 1810 x 900	375 x 1810 x 900
Weight	175 kg	160 kg	200 kg
Nominal DC-link voltage	660 Volt	660 Volt	660 Volt
Traction Power	2 x 140 kW	1 x 200 kW	2 x 200 kW
Heating power supply	1 x 30 kW	1 x 30 kW	2 x 30 kW
Auxiliary Power 400V , AC, 50Hz	2 x 20kVA	2 x 20kVA	3 x 20kVA
Auxiliary Power, 24V, DC	10kW (400A)	10 kW (400A)	15 kW (600A)

Figura 15: Caratteristiche tecniche dei sistemi di propulsione "Primove"

Fonte: Bombardier

Nell'estate del 2015 è iniziata nella città di Berlino la sperimentazione del sistema «Primove»⁷ installato su un autobus della Solaris: (Urbino da 12 metri) in servizio sulla linea 204. Le batterie vengono ricaricate durante il servizio, ai capolinea, in pochi minuti garantendo una percorrenza di circa 6 km. Precedentemente nel 2014 era già stata realizzata con successo una sperimentazione a Braunschweig, in Germania sia con un e-bus da 12 m che da 18 metri. Sono in corso di realizzazione anche altre applicazioni del sistema Primove a Mannheim, in Germania, e a Bruges, in Belgio.

2.4 Accumulatori di bordo

L'energia elettrochimica viene prodotta da diversi tipi di dispositivi, che possono essere classificati come batterie, condensatori e celle a combustibile, tutti costituiti da un anodo, un catodo e un elettrolita. La natura dei materiali utilizzati per i tre componenti fondamentali e, soprattutto, l'architettura di sistema, determinano il tipo di accumulatore elettrochimico (vedi Figura 16).

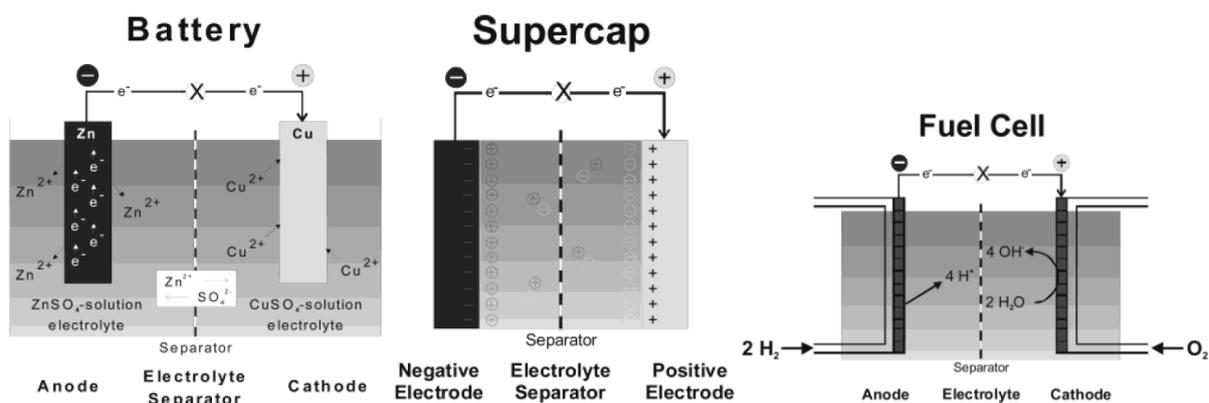


Figura 16: Schemi di funzionamento delle diverse categorie di accumulatori di bordo

Fonte: M.Winter, R.J.Brodd: What are batteries, fuel cells and supercapacitors? in Chem.Rev. 2004, 104, 4245-4269

Caratteristiche fondamentali degli accumulatori elettrochimici sono la densità di energia e la densità di potenza; batterie e soprattutto celle a combustibile sono dotate di alti valori di densità di energia e

¹²<http://www.bombardier.com/en/sustainability/sustainability-news/details.bombardier-transportation20150318ebusberlinabsommerfaehrtuelini.bombardiercom.sustainability.html?>

relativamente bassi valori di densità di potenza (soprattutto le celle a combustibile); l'inverso accade per i supercondensatori, come viene ben descritto nella figura sottostante (Figura 17).

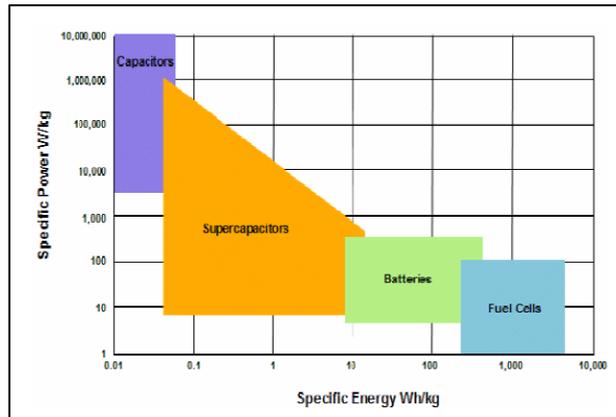


Figura 17: Diagramma di Ragone
Fonte: Sequoia Automation S.r.l.

Attualmente, la maggior parte dei veicoli elettrici sono alimentati a batteria, anche se non mancano applicazioni di accumuli a supercondensatori e a celle di combustibile.

Nel corso della seguente sintetica trattazione, si descriverà lo stato dell'arte dei due sistemi di accumulo considerati nel modello di calcolo sviluppato, ossia le batterie agli ioni di litio e i supercondensatori.

2.4.1 Batterie agli ioni di litio

Fra la vastissima gamma di combinazioni chimiche proposte per l'alimentazione dei veicoli elettrici, gli accumulatori al litio costituiscono attualmente la soluzione per batterie ricaricabili più promettente, anche in relazione al costante miglioramento delle loro prestazioni.

Rispetto alle batterie al piombo convenzionalmente utilizzate per l'alimentazione energetica dei veicoli elettrici, queste batterie sono in grado di fornire molta più energia a parità di peso o di ingombro ovvero, riducono il peso e l'ingombro a parità di contenuto energetico.

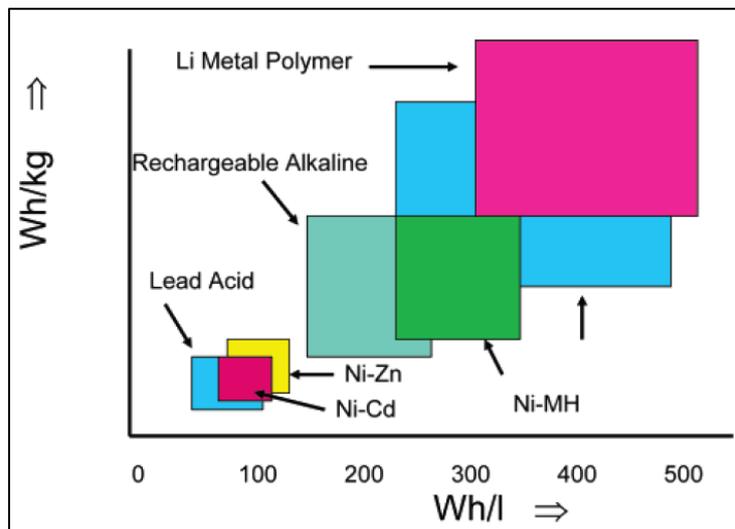


Figura 18: Confronto prestazionale delle diverse tipologie di batterie ricaricabili per accumulo veicolare

Fonte: M.Winter, R.J.Brodd: What are batteries, fuel cells and supercapacitors? in Chem.Rev. 2004, 104, 4245-4269

In pratica, le batterie al litio rappresentano la risposta della ricerca alle esigenze di incremento dell'autonomia dei veicoli elettrici.

Ferma restando la presenza del litio come fattore comune, gli accumulatori al litio sono in realtà un insieme i cui elementi si differenziano in relazione agli altri materiali utilizzati per gli elettrodi e gli elettroliti dando vita

ad una vasta gamma di coppie elettrochimiche. La seguente tabella riassume le caratteristiche salienti di alcuni tipi di batterie agli ioni di litio impiegabili in veicoli a batteria plug-in.

Tabella 3: Caratteristiche di alcune tipologie di batteria agli ioni di litio

Catodo	LiMnO	LiNiCoA	LiFePO	LiMnNiO	LiMnNiO
Anodo	LiTiO	Grafite	Grafite	LiTiO	Grafite
Capacità Catodo [mAh/g]	Bassa	Media	Media	Discreta	Elevata
Capacità Anodo [mAh/g]	Discreta	Elevata	Elevata	Discreta	Elevata
Tensione a 50% [V]	Bassa	Media	Alta	Media	Elevata
Sicurezza	Eccellente	Discreta	Buona	N.A.	N.A.
Durata	Eccellente	Buona	Buona	N.A.	N.A.
Livello sviluppo	Industriale	Applicazioni pilota	Applicazioni pilota	Ricerca	Ricerca
Costo	Basso	Moderato	Moderato	Moderato	Moderato

In generale, le prestazioni energetiche delle batterie al litio metallico sono notevoli ma si presentano problemi di sicurezza a causa della grande reattività del litio metallico, anche se recentissime innovazioni del prodotto annunciate da una start up del MIT¹³ sembrerebbero aver superato questi inconvenienti.

Nella tipologia al litio-ione, per gli elettrodi sono utilizzati materiali ad intercalazione che possono accumulare e rilasciare elevate quantità di litio reversibilmente; anche se di prestazioni inferiori rispetto alle batterie al litio metallico offrono maggiori garanzie di sicurezza e stabilità.

Uno dei problemi ancora aperti nell'impiego, per la propulsione veicolare, delle batterie a struttura convenzionale (anodo-elettrolita-catodo), fra cui rientrano quelle agli ioni di litio, riguarda la loro durabilità, misurata usualmente in numero di cicli utili di carica e scarica¹⁴. Le migliori batterie sono attualmente garantite per un numero di cicli pari a circa 2000 in condizioni standardizzate, ossia a temperatura costante intorno ai 20° C e correnti di carica e scarica non superiori a 1C, dove C rappresenta la capacità della batteria misurata in Ah¹⁵.

Molte sono le variabili che possono condizionare questo valore nell'uso reale e fra queste, oltre alla temperatura ambiente, particolare rilievo assumono la profondità di scarica (Δ SOC) e l'intensità della corrente di scarica e di ricarica rispetto alla capacità della batteria.

E' stato sperimentalmente dimostrato che non tutte le combinazioni chimiche delle batterie agli ioni di litio sopportano bene la ricarica rapida, nel senso che tale pratica spesso riduce drasticamente il numero di cicli utili, sino a renderla poco conveniente a causa degli elevati investimenti da dover sostenere per un frequente ricambio dell'accumulo di bordo. Questo inconveniente tuttavia non si verifica per le batterie del tipo LiFePO4 per le quali recenti studi¹⁶ hanno evidenziato che la ricarica rapida non provoca particolari accelerazioni del

¹³ SolidEnergy ha impiegato un elettrolita con parti solide e liquide, non infiammabile, contenente additivi che impediscono la formazione di dendriti. Il prototipo ha dimensioni inferiori a quelle delle attuali batterie e può immagazzinare il doppio dell'energia. Inoltre può essere ricaricata 300 volte, conservando l'80% della capacità originale (www.webnews.it)

¹⁴ Per cicli utili di carica e scarica si intende il numero di volte che una batteria può essere scaricata e ricaricata (anche parzialmente) senza che la sua capacità scenda al di sotto di una determinata percentuale della capacità nominale iniziale. Generalmente si assume che perché una batteria non nuova sia ancora utilizzabile per impieghi veicolistici la sua capacità non debba essere inferiore all'80% di quella iniziale.

¹⁵ Per corrente di scarica kC si intende la corrente, misurata in Ampere, pari a k volte il valore della capacità della batteria misurata in Ah; in pratica se la batteria ha una capacità di XAh, una corrente di scarica 1C sarà pari a XA e scaricherà la batteria in 1 ora mentre una corrente di scarica 3C sarà pari a 3XA e scaricherà la batteria in 1/3 ore (20').

¹⁶ D. Ansean et Al.: Fast charging technique for high power LiFePo4 batteries: a mechanistic analysis of aging, Journal of power sources 321 (2016) 201 – 209

degrado, suggerendo l'impiego di questa particolare chimica quando si intenda operare con la modalità di ricarica in questione.

In ENEA sono state condotte alcune sperimentazioni di laboratorio sull'influenza della intensità di scarica¹⁷ analizzando delle batterie agli ioni di litio con catodo al nickel-cobalto-manganese (NMC). Secondo questi studi, è necessario sovradimensionare questo tipo di batterie rispetto alle esigenze di potenza ed energia per l'operatività del veicolo, in modo da garantirne un utilizzo non troppo stressato e ridurre così le necessità di ricambio delle batterie. Questi argomenti saranno ripresi nel capitolo 5, quando si tratterà la procedura messa a punto per il dimensionamento dell'accumulo di bordo.

Si segnala, in tema di durabilità, l'ultimo ritrovato dell'Università della California, dove è stata creata una batteria agli ioni di litio con nanostrutture che può essere ricaricata per circa 200.000 volte con un'estrema stabilità, senza che si rilevino perdite di capacità o fratture nei nanofili che normalmente riescono a resistere al massimo a 5.000-7.000 cicli¹⁸.

Il mercato offre batterie al Li-ione non ancora oggetto di produzione di massa e quindi a costi ancora abbastanza elevati ma suscettibili di riduzioni consistenti e molto rapide nel futuro. La questione del costo dell'accumulo sarà affrontata nel corso del paragrafo 6.4.1

2.4.2 Supercondensatori

I supercondensatori insieme alle batterie litio/ioni, sono tra i dispositivi di accumulo di energia oggetto di intensa attività di ricerca e sviluppo.

Rispetto alle batterie, i supercondensatori garantiscono, come visto, potenze specifiche molto più elevate, in quanto assorbono e rilasciano energia con grande rapidità; inoltre durano molto più a lungo perché si degradano poco con le operazioni di scarica e carica; il numero di cicli utili arriva sino all'ordine del milione. Per contro sono caratterizzati da contenuti energetici molto bassi e da pesi e costi per unità di energia elevati, cosa che li rende adatti ad utilizzi particolari.

Nell'automotive possono essere impiegati in accoppiamento con altri sistemi di accumulo per assorbire i picchi di potenza, migliorare il recupero energetico e ridurre il degrado delle batterie garantendo, al tempo stesso, tempi di ricarica molto rapidi; oppure possono essere montati da soli su veicoli che siano in condizione di poter effettuare ricariche frequenti, così da ridurre il peso ed il costo.

Recenti test eseguiti su configurazioni all'avanguardia, hanno fatto registrare valori di intensità di potenza di oltre 1.730 W/kg, a fronte di intensità energetiche di 9 Wh/kg; in configurazione ibrida i valori si portano rispettivamente a 3.120 W/kg e 30 Wh/kg¹⁹.

Il costo dei supercapacitori per unità di energia è alquanto più elevato di quello delle batterie ma le caratteristiche di durata fanno sì che questi dispositivi possano risultare economicamente competitivi con le batterie al litio nell'analisi di lungo termine.

Dal punto di vista dell'impatto ambientale, il problema è rappresentato, come nelle batterie litio/ioni, dagli elettroliti di tipo organico che contengono solventi infiammabili, irritanti e corrosivi. Il trattamento a fine vita è simile a quello di qualsiasi altra apparecchiatura elettronica e il loro processo di riciclaggio è economicamente conveniente in virtù del quantitativo di alluminio e di altri metalli recuperabili.

¹⁷ N. Andrenacci, G. Pedè "Accelerated life tests of complete lithium-ion battery systems, EVS29, Montreal, June 20-22, 2026

¹⁸ <http://www.qualenergia.it/articoli/20160429-la-nuova-frontiera-batterie-che-durano-quasi-all-infinito>

¹⁹ A. Burke, Z. Liu, H. Zhao, Present and Future Application of Supercaps in Electric and Hybrid Vehicles, IEEE 2014, Florence, December 17-19

3 Funzionalità, struttura e ambito di analisi del DSS

3.1 Generalità

Il Sistema di Supporto alle Decisioni (DSS) messo a punto, data una linea di una rete di Trasporto Pubblico Locale, è in grado di:

- determinare se l'elettrificazione sia tecnicamente fattibile all'interno di un insieme di soluzioni tecnologiche prese in esame e quale fra le soluzioni fattibili sia preferibile per l'Azienda sotto l'aspetto economico entro un arco temporale pluriennale prestabilito;
- di tale soluzione "eletta", verificare la convenienza economica dell'Operatore rispetto ad alimentazioni più convenzionali, a parità di servizio offerto, e stima la riduzione dei consumi energetici e l'abbattimento delle emissioni nocive in atmosfera nonché la riduzione del danno monetario per la collettività causato dalle stesse emissioni atmosferiche e dal rumore da traffico.

Il software si compone di quattro moduli di calcolo: il primo per la stima dei consumi energetici e delle emissioni inquinanti conseguenti all'esercizio della linea in esame nelle diverse alternative di alimentazione energetica considerate (elettrica, a gasolio, a metano); il secondo per la verifica di fattibilità tecnica e la progettazione di massima dell'architettura elettrica per le diverse alternative tecnologiche prese in esame; il terzo per il confronto economico sia fra soluzioni tecnologiche di elettrificazione sia fra alternative di alimentazione energetica; il quarto per la stima ed il confronto dei costi sociali per le diverse alternative di alimentazione energetica del servizio.

Nel Sistema informatico è incluso un Database relazionale per l'organizzazione e l'archiviazione sia dei dati necessari ad alimentare la catena modellistica suddetta sia altri dati di completamento del quadro conoscitivo dell'offerta infrastrutturale e del servizio di trasporto pubblico locale, disponibili in modalità open o diversamente.

La seguente Figura 19 illustra schematicamente l'architettura funzionale del software, che si inquadra in un sistema più ampio in grado di effettuare l'analisi di scenari di elettrificazione anche del trasporto automobilistico privato (vedi Report RdS/PAR2015/213).

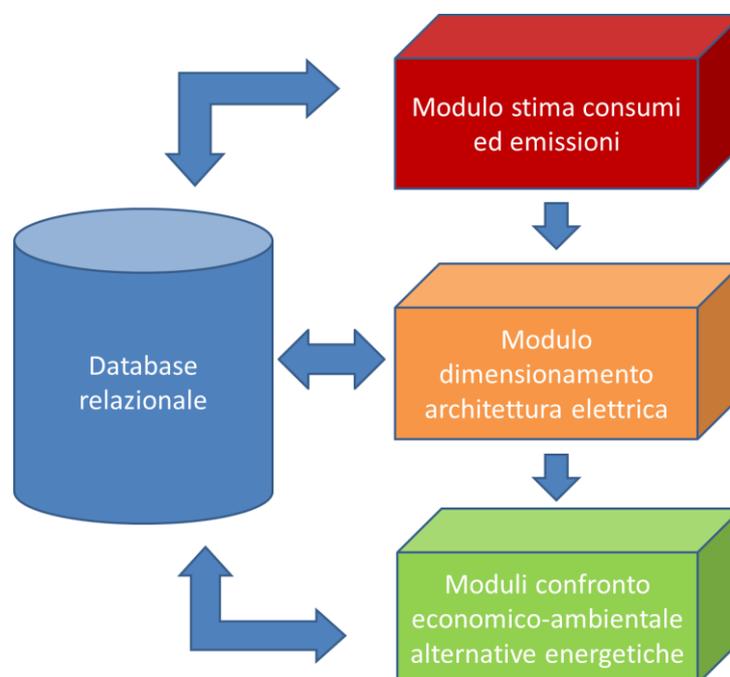


Figura 19: Architettura funzionale del DSS

L'elettrificazione di una linea di Trasporto Pubblico Locale può essere realizzata in molti modi diversi in relazione alle opzioni sullo schema di esercizio della ricarica dei veicoli e sui sistemi di accumulo di bordo.

Allo stato attuale dello sviluppo industriale, la ricarica dei veicoli elettrici, prescindendo dalle soluzioni tecnologiche della connessione veicolo-stazione di ricarica, può avvenire secondo tre diverse range di valori del rapporto fra intensità della corrente di ricarica e capacità dell'accumulo del veicolo e cioè:

- a bassi rapporti (< 1), così che i tempi di ricarica risultino dell'ordine delle ore; in questo caso si parla di ricarica "lenta" (per tempi di ricarica superiori alle 5 ore) o "veloce" (per tempi di ricarica fra 1 e 5 ore);
- a rapporti più elevati [$1 \div 3$] così da far scendere i tempi di ricarica nell'ordine dei minuti; in questo caso si parla di ricarica rapida;
- a rapporti ancora più alti, compatibilmente con i vincoli posti dalla capacità di assorbimento delle batterie (specificati dal costruttore) tali da portare i tempi di ricarica nell'ordine dei secondi; si parla in questo caso di ricarica "ultrarapida".

Le tipologie di ricarica suddette sono associate a diverse opzioni di esercizio della linea, in quanto:

1. la ricarica lenta o veloce, dati i tempi richiesti, non può essere effettuata che al deposito durante la sosta notturna;
2. la ricarica rapida può essere utilmente realizzata ai capolinea durante le soste fra una corsa e l'altra dello stesso veicolo;
3. la ricarica ultrarapida è conveniente se realizzata alle fermate, durante la sosta per la salita e la discesa dei passeggeri.

Per garantire la massima generalità al modello di scelta sviluppato, sono state prese in esame tutte le seguenti opzioni di ricarica e di esercizio e cioè:

- Architettura A: solo ricarica notturna al deposito con modalità lenta;
- Architettura B: ricarica rapida al capolinea e ricarica notturna al deposito;
- Architettura C: ricarica ultrarapida alle fermate, veloce al capolinea, lenta al deposito.

In sostanza, per tutti gli schemi di esercizio è comunque previsto l'approvvigionamento energetico con modalità lenta al deposito; inoltre la ricarica alle fermate si combina sempre con quella al capolinea, assumendo che sussista tale possibilità per tutti i capolinea presenti sulla linea (1 in caso di linea circolare, 2 altrimenti).

Per l'accoppiamento veicolo-stazione di ricarica si è fatto riferimento alla modalità conduttiva piuttosto che a quella induttiva per tutte le tipologie di ricarica.

Per ciascuno schema di approvvigionamento energetico è stata univocamente stabilita la tipologia di accumulo di bordo ritenuta più idonea sulla base delle indicazioni degli esperti di settore e delle esperienze in corso esaminate (cfr capitolo 2). Specificatamente per la ricarica lenta al deposito e per quella rapida al capolinea la scelta è caduta sulle batterie agli ioni di litio mentre la ricarica ultrarapida è stata associata ad un accumulo a supercondensatori, affiancato da un accumulo di supporto agli ioni di litio che garantisce i trasferimenti a/da deposito (generalmente più onerosi dei percorsi fra due ricariche consecutive in corrispondenza delle fermate) ed assicura l'operatività della linea anche in caso di defaillance di qualche impianto di ricarica. .

Riguardo all'alimentazione a carburante, le alternative considerate sono il gasolio e il metano.

La struttura del Database e le funzionalità del software sono stati definiti a valle di una ricerca *desk* sul formato dei dati open resi disponibili sino ad ora dalle Aziende di trasporto pubblico locale e di una indagine questionario sulle esigenze delle stesse Aziende per avviare e supportare il processo decisionale per innovare il proprio servizio attraverso l'elettrificazione. Di tali attività si darà conto nei successivi paragrafi.

3.2 Disponibilità e tipologia di dati "open" relativi al trasporto pubblico locale

Per rendere operativa la catena modellistica è necessario disporre sistematicamente di numerosi dati relativi al servizio di trasporto, ragion per cui nella prima fase della ricerca sono state poste in cantiere una serie di

attività propedeutiche per verificare la disponibilità su web dei dati *open* relativi al TPL e per sviluppare le procedure di acquisizione e archiviazione dei dati in modo strutturato.

I dati pubblicati su internet da vari soggetti, rispondono agli obblighi sanciti nelle norme del Codice dell'Amministrazione Digitale per l'attuazione dei principi dell'*open government*. I dati del servizio di TPL sono di tipo aperto ed oltre ad essere disponibili sul web possono essere liberamente utilizzati, riutilizzati e ridistribuiti da chiunque, quindi devono essere strutturati e codificati in un formato non proprietario.

I dati possono presentarsi in formati diversi ma quello che viene utilizzato dalla maggior parte delle aziende di TPL è il GTFS (General Transit Feed Specification). Le specifiche del GTFS definiscono un formato dati per archiviare gli orari dei mezzi pubblici e le informazioni geografiche associate e si tratta di una raccolta di file csv (con estensione txt) di solito raccolti in un file zip

Il GTFS nasce dalla collaborazione di Google con la società di trasporti Portland TriMet come formato comune per la descrizione dell'offerta del trasporto pubblico. Le specifiche sono rilasciate da Google stesso al link: <https://developers.google.com/transit/>. L'utilizzo da parte di Google per il suo sito Google Maps e per i suoi navigatori ha fatto sì che diventasse velocemente lo standard di fatto da parte molte aziende di trasporto sia pubbliche che private.

La diffusione e distribuzione dei dati da parte delle aziende e la relativa semplicità di lettura ha fatto sì che molte App di infomobilità si adeguassero al formato diventando punti di riferimento per lo sviluppo delle Smart Cities come ad esempio Moovit .

La ricerca sul web ha verificato la disponibilità di open data relativi alle caratteristiche del servizio offerto dalle aziende di TPL, come le linee di trasporto pubblico, gli orari, le fermate ecc.. La ricerca ha accertato un quadro a livello nazionale eterogeneo per copertura territoriale (regione, città) e a macchia di leopardo. E' da segnalare l'eccellenza di alcune Regioni che sono riuscite a pubblicare i dati dell'offerta di TPL con una copertura integrale del loro territorio. In altri casi sono i Comuni, le agenzie o le aziende locali di trasporto pubblico ad aver concretizzato questo pregevole lavoro per la rispettiva zona di competenza.

Nella maggior parte dei casi i dati open offrono varie informazioni: informazioni generali sulla linea, sugli orari programmati o real-time dei mezzi alle fermate, sul nome delle fermate, sulle coordinate geografiche (latitudine e longitudine dei percorsi e delle fermate) che consentono la mappatura utilizzando software GIS.

Dalla ricerca effettuata è emerso che non tutti gli enti procedono con un aggiornamento continuo dei dati rendendo inefficace di fatto la distribuzione del dato open. Dalla medesima analisi è altresì emerso che città come Bologna, Milano, Roma, Venezia, Lecce ma anche città più piccole come Ferrara, Palermo, Siena o regioni come il Piemonte e la Sardegna mantengono la banca dati aggiornata con relativo impatto sulla mobilità.

Una mappa degli open-data del trasporto pubblico reperiti nell'ambito di questa ricerca è mostrata nella figura seguente (Figura 20)

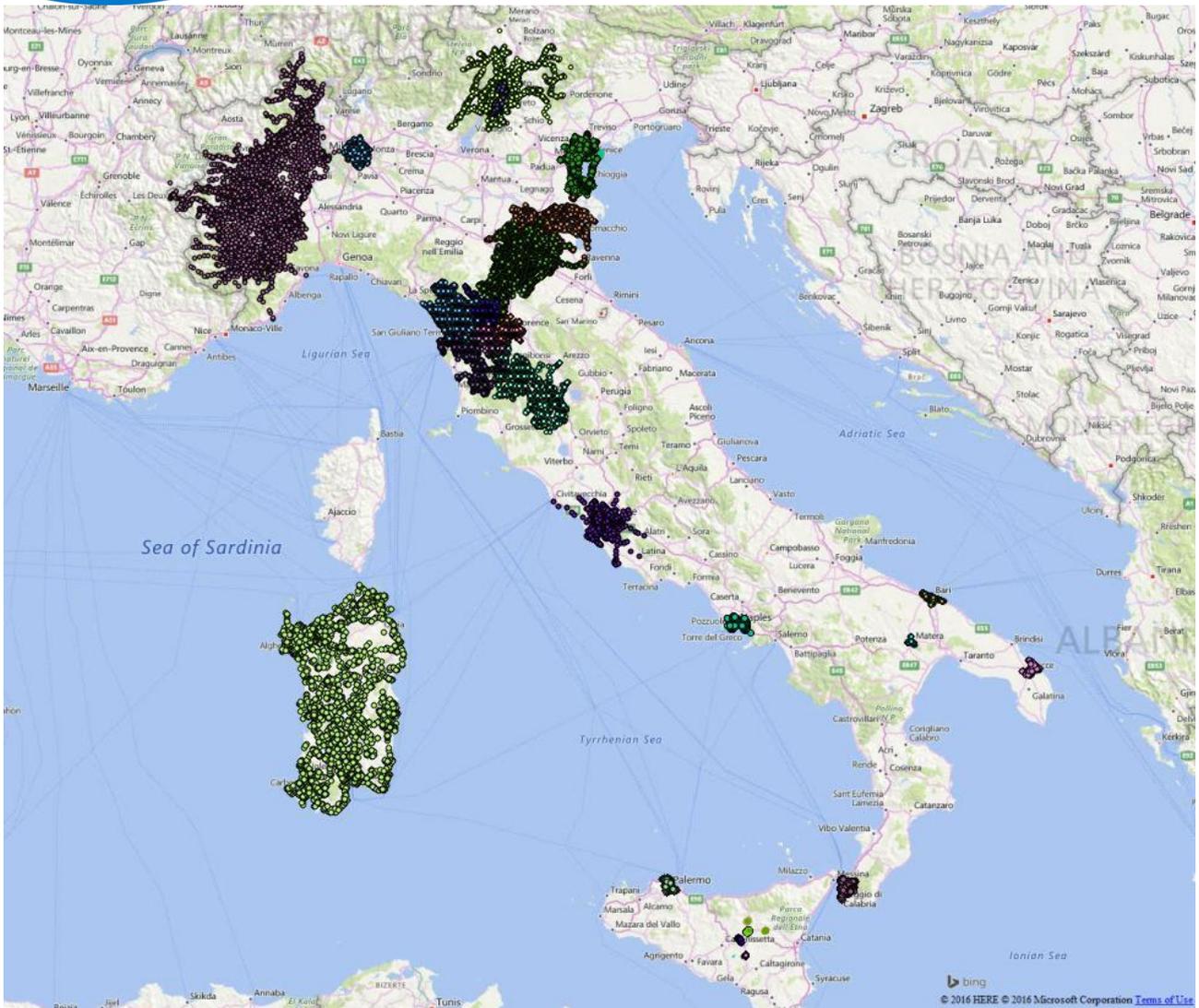


Figura 20: Mappa della disponibilità di open data sul TPL in Italia

3.3 Users needs analysis

Lentamente ma costantemente sta aumentando l'interesse delle aziende di trasporto pubblico collettivo verso un servizio operato con autobus elettrici; pur tuttavia in molti casi persiste una certa diffidenza verso la trazione elettrica dovuta sia ai costi ancora elevati di autobus e stazioni di ricarica sia alla scarsa conoscenza in generale delle potenzialità dell'elettificazione del trasporto su gomma.

Il mercato, come mostrato nel capitolo precedente, ormai, offre differenti modelli di autobus elettrici, capaci di rispondere alle diverse esigenze sia in termini di capacità di trasporto, accanto ai minibus da 8-10 metri sono ora disponibili autobus elettrici (puri e ibridi plug-in) da 12-18 metri, sia in termini di percorrenza ormai confrontabile con quella degli autobus convenzionali, grazie alle ottime prestazioni sia dei sistemi di accumulo che dei sistemi di carica delle batterie.

L'offerta diversificata sia di autobus che di sistemi di ricarica, rende a volte difficile la scelta da parte degli operatori che hanno problemi a reperire tutte le informazioni e i dati tecnici delle diverse tecnologie presenti sul mercato, necessari ad individuare sia la soluzione tecnologica (veicolo-sistema di ricarica) più adatta al contesto territoriale di riferimento e alla tipologia di servizio che si intende erogare, sia alla identificazione della linea che meglio si presta per le sue caratteristiche geometriche e di servizio ad essere operata con autobus elettrici in sostituzione di quelli convenzionali a parità di prestazioni operative.

Le aziende quindi, pure se interessate all'elettificazione delle reti di trasporto pubblico locale, sono spesso dissuase dalle scarse informazioni sul settore e dalle difficoltà che incontrano nella scelta tecnologica più adatta alle loro esigenze.

Per progettare e sviluppare un DSS in grado di suggerire una risposta maggiormente rispondente alle esigenze degli operatori e corredata da indicazioni dettagliate sulle possibili tecnologie da impiegare, è stata effettuata un' user-need analysis, attraverso un' indagine web, realizzata con un questionario predisposto da ENEA con la collaborazione di ASSTRA, la principale associazione nazionale di aziende di trasporto pubblico che si è anche resa disponibile all'invio del questionario alle sue associate.

Il questionario è stato organizzato in sei sezioni (vedi Appendice 11.3);

Nelle prime due sezioni venivano richiesti, oltre ai dati identificativi dell'azienda, la numerosità del parco mezzi adibito al servizio urbano, suddiviso per dimensione, alimentazione e standard emissivo; tali informazioni risultano utili per verificare l'eventuale propensione dell'azienda verso i veicoli elettrici e la potenziale necessità di rinnovo del parco in base alla anzianità degli autobus.

Nella terza veniva chiesto di esprimere l'interesse dell'azienda ad erogare il servizio di una o più linee con autobus elettrici e, in caso di risposta positiva, l'interesse per un sistema di supporto al processo di elettrificazione dei servizi su gomma.

La quarta sezione (vedi Figura 21) era destinata a conoscere l'importanza rivolta ai diversi aspetti dell'elettrificazione del trasporto su gomma in modo da tenerli in considerazione nella definizione degli output del DSS. Per definire al meglio l'input del DDS, è stato richiesto nella quinta sezione l'effettiva disponibilità di dati sul servizio attuale ed il formato di archiviazione (vedi Figura 22).

Ed infine, nella sesta sezione, si domandava di descrivere l'eventuale esperienza di utilizzo di autobus elettrici, le principali difficoltà, criticità e i vantaggi riscontrati.

Indicare l'importanza dei seguenti aspetti del processo di elettrificazione *

Scegliere la risposta appropriata per ciascun elemento:

	Molto	Abbastanza	Poco/Niente	Non so
L'indicazione delle linee per le quali l'elettrificazione risulta più conveniente?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La soluzione tecnologica (bus, batterie, sistema di ricarica, altro) ottimale per una linea predefinita?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La convenienza economica dell'elettrificazione di una linea predefinita?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La localizzazione ottimale dei punti di ricarica?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Le tecnologie (bus, sistemi ricarica, ecc.) sulle quali allocare in modo ottimale date risorse finanziarie ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La riduzione delle emissioni nocive (PM,NOx, CO2, ecc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura 21: Schema della sezione IV

Sareste in grado di fornire i seguenti dati, a livello di linea, necessari al sistema software? *

Scegliere la risposta appropriata per ciascun elemento:

	No	Cartaceo	Elettronico
Caratteristiche dimensionali del/i veicolo/i attualmente utilizzati per il servizio (lunghezza, posti offerti)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Caratteristiche del percorso (distanza dal deposito, planimetria, ubicazione delle fermate)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Programma di esercizio giornaliero della linea	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Domanda mediamente servita dalla linea (pax/ora)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Saliti/discesi per fermata (singola corsa e/o dato medio giornaliero)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tempi di sosta alle fermate	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tempi di sosta ai capolinea	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Dati del sistema AVL	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Impedimenti all'installazione di sistemi di ricarica elettrica (alle fermate e/o ai capolinea)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tensione elettrica disponibile ai capolinea	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura 22: Schema della sezione V

Contrariamente alle attese solo dodici aziende di trasporto passeggeri hanno risposto al questionario costituendo però un campione che si può ritenere, in prima istanza, rappresentativo del settore in quanto comprende sia grandi che piccole aziende con un parco mezzi complessivo che copre una quota pari al 17% del parco mezzi nazionale urbano, sufficientemente differenziato in termini di alimentazione (presenza o meno di autobus elettrici), dimensione e standard emissivi.

Le aziende che hanno risposto al questionario hanno tutte dichiarato di essere interessate all'elettrificazione della propria flotta, solo due aziende, però, una con una esperienza pluriennale di servizio con autobus elettrici e l'altra con nessuna esperienza, hanno mostrato interesse per un DSS che li agevoli nella scelta delle tecnologie più rispondenti alle loro esigenze esprimendo una valutazione positiva sulle funzionalità offerte dal sistema ENEA, richiedendo espressamente un'analisi dei costi sul ciclo di vita (autobus+sistema di ricarica), peraltro già previsto tra gli output del sistema software.

Il limitato interesse mostrato dalle aziende verso il sistema di supporto alle decisioni deriva molto probabilmente dal fatto che, per rendere il questionario il più possibile sintetico, non si è potuto presentare in dettaglio il DSS realizzato dall'ENEA ed in particolare gli output forniti dal sistema.

I risultati dell'indagine, con i limiti già esposti, lasciano ipotizzare che il mercato del Trasporto Pubblico collettivo non è ancora pronto a migrare verso il trasporto elettrico nonostante la tecnologia sia ormai matura e consolidata, per quanto riguarda sia i sistemi di ricarica sia gli autobus di piccole dimensione mentre occorre ancora qualche anno per gli autobus da 12 -18 metri, anche se sul mercato sono già presenti alcuni esemplari.

4 I calcoli di consumi ed emissioni

4.1 Brevi cenni sulle procedure di calcolo

Il calcolo dei consumi energetici rappresenta il primo fondamentale passo dell’analisi di fattibilità tecnica ed economica dell’elettrificazione di una linea di trasporto pubblico urbano.

Per stabilire se una linea sia elettrificabile o meno e per quali soluzioni di ricarica fra quelle rese possibili dall’attuale tecnologia (lenta notturna, rapida al capolinea, ultrarapida alle fermate) è necessario conoscere il fabbisogno energetico di ogni veicolo fra due potenziali stazioni di ricarica consecutive; questo implica che la granularità della stima dei consumi energetici deve portarsi a livello di tratte elementari fra fermate. A partire da questi valori disaggregati diventa realizzabile l’analisi di tutte le possibili soluzioni di ricarica, da quella ultrarapida alle fermate sino a quella notturna al deposito. Inoltre, noto il programma di esercizio della linea nei diversi periodi dell’anno, si può risalire alla stima dei consumi annuali utili per il confronto energetico ed economico.

La suddivisione del calcolo dei consumi energetici per tratte brevi è un’esigenza non solo delle procedure per la selezione e il dimensionamento dell’architettura elettrica ma anche della stessa accuratezza di calcolo: infatti più si restringe l’intervallo spazio-temporale di cui si deve fornire una stima dei consumi sulla base dei valori cinematici medi del veicolo e dei dati plano-altimetrici medi del percorso più la stima dei consumi energetici diventa accurata. In merito a questo aspetto, all’interno del DSS si è scelto di sviluppare due diversi modelli di calcolo dei consumi in funzione del livello di dettaglio dei dati disponibili sulla cinematica del veicolo:

- il primo modello (vedi Figura 23) utilizza i dati del programma di esercizio giornaliero della linea che generalmente consistono negli orari di partenza dei veicoli da ogni punto di sosta o di fermata; tali dati, associati alla lunghezza del percorso stradale fra due punti consecutivi, desumibile attraverso l’impiego di mappe stradali quotate, consentono di stimare la velocità media programmata per ogni arco, avendo l’accortezza di dedurre i tempi di sosta nei singoli nodi. Noto il valore della velocità media su ogni arco, è possibile “entrare” nelle curve di consumo della tipologia veicolare in esame, disponibili in letteratura o ricavabili sperimentalmente per diversi contesti di circolazione (urbano, extraurbano ordinario, autostradale), al fine di desumere il fattore di consumo veicolare (consumo per unità di percorrenza) corrispondente a quel valore di velocità media e da questo calcolare il consumo sull’arco stradale in questione.
- il secondo modello, invece, utilizza dati di monitoraggio a bordo del veicolo attraverso apposita strumentazione, ove disponibili; tali dati misurano velocità ed accelerazioni puntuali del veicolo, di cui sono note anche le specifiche caratteristiche e prestazioni, consentendo una stima dei consumi più accurata che non attraverso il solo dato sulla velocità media e sulla tipologia veicolare.

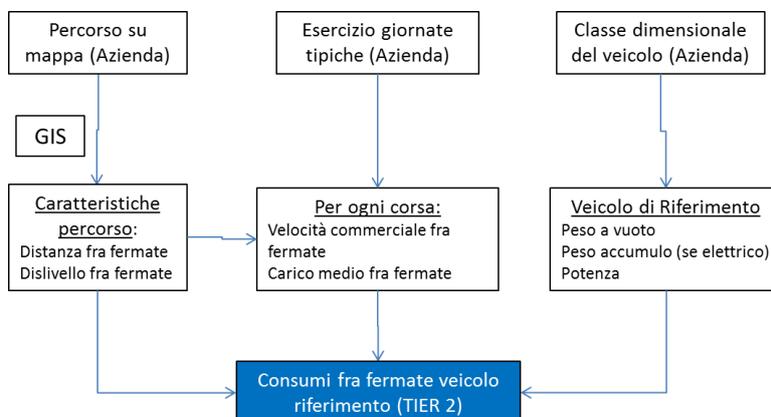


Figura 23: Schema logico del modello di calcolo dei consumi energetici in base a valori medi

Per poter operare il confronto economico ed energetico delle diverse opzioni di alimentazione dei veicoli, il calcolo dei consumi annuali sulla linea in esame deve essere effettuato, oltre che per i veicoli a batteria, anche per le alternative convenzionali prese in esame (alimentazione a gasolio e a metano). Le procedure di calcolo

dei consumi utilizzate per questi secondi non differiscono da quelle utilizzate per i primi, a meno dei valori in gioco. Vale però forse la pena di sottolineare che, nel modello di calcolo più aggregato, mentre per i veicoli a combustione sono state impiegate curve consumo-velocità media disponibili in letteratura (COPERT), per i bus elettrici si è reso necessario estrapolare tali curve mediante simulazione, come descritto nel Report RdS/PAR2015/206.

La stima dei consumi è stata estesa a tutto il ciclo di vita del vettore energetico in esame, ovvero considerando non solo la fase di utilizzo finale a bordo del veicolo ma anche i processi di produzione e distribuzione, molto diversificati che si tratti di elettricità o di gasolio o di metano. Per fare ciò si è fatto ricorso ad opportuni coefficienti che, sulla base di studi pregressi sulle modalità prevalenti di produzione e distribuzione dei vari vettori energetici, definiscono quali sia l'incidenza percentuale dei consumi ad esse relativi rispetto ai consumi finali.

Anche la stima delle emissioni nocive in atmosfera, necessaria per il confronto ambientale delle alternative di alimentazione di una linea di trasporto pubblico urbano, viene effettuata su tutto il ciclo di vita del vettore energetico. Essa riguarda i principali inquinanti da traffico veicolare pesante (Particolato e ossidi di Azoto) e gas serra (CO₂ e CH₄)

Nel caso di alimentazione elettrica, considerato che i veicoli a batteria non producono gas di scarico, viene a mancare il contributo emissivo durante la fase di esercizio del veicolo e questo consente di utilizzare una procedura di calcolo semplificata che prende in input solo i valori di consumo finale ed opportuni coefficienti moltiplicativi per i vari inquinanti considerati. La medesima procedura, con diversi valori dei coefficienti moltiplicativi, è utilizzata per il calcolo delle emissioni prodotte per la produzione e la distribuzione del gasolio e del metano utilizzati dai veicoli di tipo convenzionale.

Per il calcolo delle emissioni in esercizio dei veicoli a combustione si utilizza una procedura di calcolo analoga a quello della stima dei consumi in funzione della velocità media, anche in questo caso attingendo alla letteratura COPERT per quanto riguarda i valori di emissione specifica in funzione della velocità media. In mancanza di un'adeguata campagna di misura dei fattori di emissione istantanei, non si è ritenuto opportuno inserire un modello di calcolo delle emissioni in funzione della cinematica puntuale del veicolo.

4.2 Scenari di analisi e assunzioni di calcolo

All'interno delle funzionalità del DSS, il calcolo dei consumi di una linea di trasporto pubblico urbano assume una doppia valenza in quanto:

- dato di partenza per operare il dimensionamento dell'alternativa elettrica;
- valore di confronto fra le diverse alternative di alimentazione energetica considerate.

In relazione a tali utilizzazioni, gli scenari di cui calcolare i consumi energetici sono molteplici; in linea di principio essi dovrebbero ricomprendere:

- tutte le opzioni tecnologiche di elettrificazione prese in esame dal DSS (vedi capitolo precedente) per le condizioni di esercizio limite assunte in fase di progetto;
- tutte le alternative di alimentazione energetica (elettrica e convenzionale) per le condizioni di esercizio effettive.

In pratica, poiché il sistema è in grado di analizzare tre architetture elettriche e due soluzioni convenzionali, gli scenari da dover simulare sarebbero otto (tre effettive e tre limite per l'elettrico e due effettive per i convenzionali).

Di fatto, per limitare i tempi di calcolo dei consumi, è possibile ricondurre le successive elaborazioni a tre soli scenari:

- Scenario diesel di riferimento;
- Scenario metano di riferimento;
- Scenario elettrico di riferimento.

Infatti, come meglio si vedrà nel seguito, è possibile dedurre gli scenari mancanti da quelli precedentemente elencati, purché siano ben definite le assunzioni del calcolo dei consumi di riferimento in merito alle caratteristiche dei veicoli considerati ed alle condizioni di carico degli stessi.

Nel calcolo dei consumi energetici effettuato ai fini delle procedure di dimensionamento e confronto economico, si assume sempre che la classe dimensionale dei veicoli da utilizzarsi sia la stessa di quella prevalentemente in uso sulla linea ovvero quella indicata dall'Azienda di TPL, fra le quattro generalmente utilizzate in letteratura di settore (mini, midi, full, articulated).

Nota la classe dimensionale del bus, per effettuare la simulazione dei consumi energetici si fissano le caratteristiche standard del veicolo, in relazione ai risultati dell'analisi del mercato riportata nel capitolo 2. Nel caso dei veicoli a batteria, (vedi Tabella 5) si assume un'autonomia sufficiente ad operare un servizio con ricarica lenta al deposito ed un valore di potenza del motore analogo a quello ipotizzato per il veicolo diesel di medesima classe dimensionale; inoltre, per determinare il peso della batteria di riferimento, si ipotizza l'impiego di un accumulo agli ioni di litio.

Tabella 4: Caratteristiche dei veicoli convenzionali di riferimento per le diverse classi dimensionali

	Potenza [kW]	Carico massimo [n. pax]
Mini	60	35
Midi	120	48
Full	160	95
Articulated	200	139

Tabella 5: Caratteristiche dei veicoli elettrici di riferimento per le diverse classi dimensionali

	Potenza [kW]	Tipologia accumulo	Capacità accumulo [kWh]	Peso Chassis [kg]	Carico massimo [n. pax]
Mini	60	Li-io	70	4.000	32
Midi	120	Li-io	180	6.700	44
Full	160	Li-io	210	10.500	86
Articulated	200	Li-io	230	15.000	126

Il dato sull'andamento altimetrico del percorso fra due fermate consecutive è desunto attraverso l'impiego di mappe stradali quotate su cui sono riportati i tracciati planimetrici dei percorsi utilizzati dalle linee della rete in esame mentre per il livello di carico dei veicoli si ipotizza un valore pari al 100% della capacità del veicolo di riferimento, funzionale al dimensionamento dell'accumulo di bordo dei veicoli elettrici riservando ad un momento successivo della procedura di confronto delle alternative energetiche il ricalcolo dei consumi in funzione del carico medio effettivo.

5 Il modello per la verifica di fattibilità tecnica e il dimensionamento dell'architettura elettrica

5.1 Schema generale

Il modulo di selezione e dimensionamento dell'architettura elettrica più idonea ad una determinata linea di trasporto pubblico urbano esamina in parallelo le tre opzioni tecnologiche considerate dal DSS (ricarica lenta al deposito, ricarica rapida ai capolinea, ricarica ultrarapida alle fermate), scartando quelle eventualmente tecnicamente infattibili o non competitive già in base a verifiche di massima.

Nel caso in cui per una medesima linea - da programma di esercizio - il servizio subisca variazioni di percorso, il modello scarta a priori le soluzioni di ricarica al capolinea e alle fermate, per le quali, oltre ad un aumento della complessità di analisi per verificare le sovrapposizioni dei diversi punti potenziali di ricarica, in linea generale potrebbe richiedersi un'intensificazione delle installazioni per la ricarica che renderebbe poco convenienti queste opzioni rispetto alla soluzione di approvvigionamento energetico al deposito. Questa limitazione dell'analisi sarà superata quando, nel corso di previsti sviluppi futuri, si esamineranno le soluzioni di elettrificazione di intere reti piuttosto che delle singole linee, al fine di determinare il sistema di ricarica in grado di generare economie di scala anche per le opzioni di ricarica ai capolinea ed alle fermate.

Inoltre, il modello è predisposto per prendere in esame solo le linee per le quali si verifichi l'impiego di una sola classe dimensionale di veicoli; tale condizione è molto spesso verificata nella realtà (o comunque ipotizzabile) per cui non comporta particolari limitazioni nell'impiego del DSS.

Una volta verificate le precondizioni di applicazione del modello, la procedura effettua la disamina della situazione infrastrutturale della linea in esame, al fine di individuare eventuali ostacoli alla realizzazione degli impianti di ricarica nei punti deputati allo scopo (depositi, capolinea e fermate) e, quindi, scartare le architetture di ricarica non realizzabili.

Dopo le verifiche infrastrutturali, il modello contempla l'impiego dei risultati del calcolo dei consumi in elettrico (vedi capitolo 3.2) nella situazione di riferimento.

Prima di procedere al dimensionamento dell'accumulo di bordo e del sistema di ricarica, sono previste altre verifiche preliminari per scartare immediatamente casi poco adatti all'elettrificazione sulla base di considerazioni energetiche. In particolare viene preso in esame il rapporto fra i consumi per i trasferimenti a/dal deposito ed i consumi in fase di servizio al pubblico, assumendo che, affinché l'alimentazione elettrica possa risultare potenzialmente competitiva con le alimentazioni convenzionali, le operazioni di trasferimento al/dal deposito non debbano incidere troppo gravosamente sul dimensionamento dell'accumulo di bordo, che rappresenta una voce di costo importante nel processo di elettrificazione; perciò si escludono dall'analisi quelle situazioni in cui il dispendio energetico per i trasferimenti terminali superi una certa percentuale del consumo di progetto per esigenze di servizio.

A valle di queste ulteriori verifiche preliminari, la procedura prevede il dimensionamento dell'accumulo di bordo secondo l'algoritmo descritto successivamente (vedi paragrafo 5.2) e la verifica che i valori risultanti non superino determinati limiti massimi imposti da criteri costruttivi dei veicoli, in funzione del tipo di accumulo ipotizzato. Nel dimensionare l'accumulo si tengono in considerazione le potenzialità di recupero energetico in condizioni di esercizio urbano e il vincolo che il livello di carica non scenda al di sotto di un certo limite; inoltre si applica un coefficiente di sicurezza variabile in funzione del tipo di architettura di ricarica; tali valori sono riportati e commentati nel seguito.

Contestualmente al dimensionamento dell'accumulo, il modello opera, con la procedura iterativa descritta al punto 5.2, il ricalcolo dei consumi energetici proprio in funzione del fatto che, modificandosi le dimensioni dell'accumulo di bordo nonché il carico veicolare rispetto alle ipotesi della simulazione "standardizzata" dei consumi (vedi par. 4.2), si modifica anche il dispendio energetico.

I nuovi valori di consumo sono utilizzati per dimensionare la potenza necessaria e sufficiente degli impianti di ricarica in funzione dei tempi netti di ricarica ipotizzati per ciascuna modalità, dei rendimenti della ricarica e della possibilità o meno di installare gli impianti nei diversi nodi. Anche in questo caso il modello prevede una

verifica di fattibilità tecnica dei valori di potenza risultanti, fissando un valore massimo dettato da ragioni costruttive, per le diverse tipologie di impianti di ricarica.

Oltre alla verifica sulla potenza massima, per la ricarica alle fermate viene accertato già in questa fase se la soluzione si presenti competitiva con quella di ricarica al capolinea; infatti, per questa architettura, sono comunque previste operazioni di ricarica alla fine di ogni corsa, e quindi la ricarica intermedia si giustificerebbe solo se i livelli di consumo fossero tali per cui il solo biberonage al terminale fosse insufficiente.

Una volta che le architetture elettriche siano state dimensionate ed abbiano passato il vaglio delle verifiche di fattibilità, sono sottoposte ad un'analisi costi-benefici (vedi capitolo 6) che considera tutte le principali voci di costo (in conto capitale e in conto esercizio), in base ai risultati della quale viene selezionata l'alternativa migliore da sottoporre a confronto, successivamente, con le soluzioni più convenzionali (diesel e metano).

Nella seguente Figura 24 si riassume graficamente la procedura sin qui illustrata, di cui si fornisce il dettaglio nei successivi paragrafi.

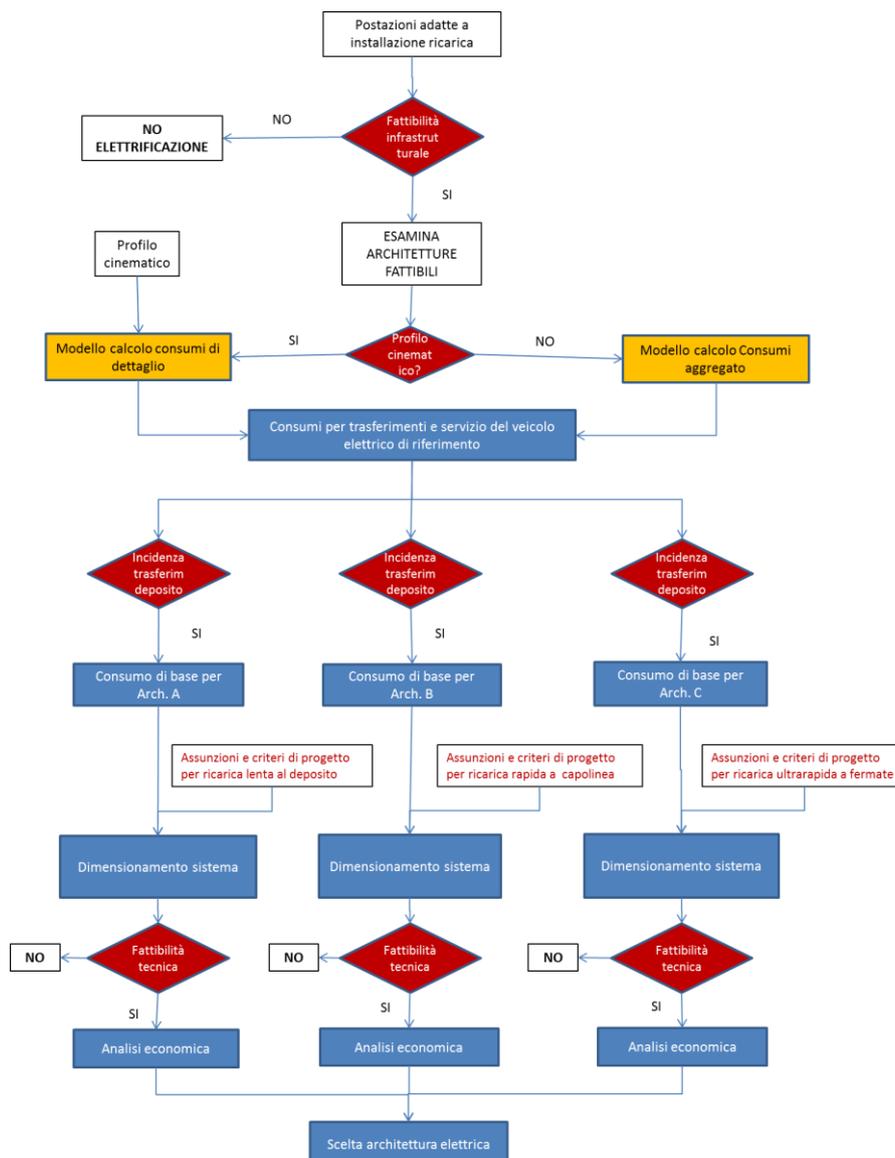


Figura 24: Procedura per la verifica di fattibilità, il dimensionamento e la selezione dell'architettura elettrica di una linea di trasporto pubblico locale

5.2 Verifiche preliminari

5.2.1 Verifiche infrastrutturali

Per l'aspetto relativo all'idoneità di ciascuna potenziale postazione di ricarica, l'algoritmo prevede un check effettuato in base alle indicazioni dall'Azienda (o di altro soggetto preposto al compito) che devono essere formalizzate in un giudizio complessivamente positivo o negativo (SI/NO) in merito alla congruità degli spazi e degli allacciamenti elettrici di ogni postazione.

Se si verifica l'impossibilità di predisporre la ricarica al deposito, la linea in esame viene considerata inadatta a qualsiasi soluzione di elettrificazione; viceversa essa sarà considerata adatta almeno alla soluzione di ricarica in fase di ricovero notturno dei veicoli. Una volta superato il check sul deposito, si esamina l'utilizzabilità dei capolinea e delle fermate intermedie: nel caso in cui almeno uno dei due capolinea risulti idoneo all'installazione dell'impianto di ricarica, la linea viene considerata idonea non solo per la soluzione di ricarica lenta ma anche per quella rapida mentre per la soluzione di ricarica alle fermate la condizione infrastrutturale limite viene considerata quella per cui la ricarica risulti installabile ad entrambi i capolinea e ad almeno una fermata intermedia lungo ciascuno dei due percorsi di andata e ritorno.

5.2.2 Verifica dell'incidenza dei trasferimenti terminali sui consumi di progetto

L'obiettivo è di verificare se le esigenze di consumo legate ai trasferimenti da/al deposito siano tali da condizionare sostanzialmente le dimensioni dell'accumulo di bordo. Tale verifica è particolarmente significativa per le soluzioni di ricarica al capolinea ed alle fermate che trovano la loro giustificazione proprio in relazione alla possibilità di contenere le dimensioni dell'accumulo di bordo, riducendone l'incidenza sul peso complessivo del veicolo e sui costi di acquisto.

Per la verifica, si predispone un confronto fra i consumi stimati sui percorsi terminali ed il consumo di progetto dell'accumulo nelle diverse ipotesi di ricarica.

Per definizione, il consumo di progetto è quel valore in base al quale si dimensiona il sistema di accumulo di bordo e corrisponde, a meno di opportuni coefficienti di sicurezza che tengono conto di fattori imponderabili, al massimo valore di energia utilizzata fra due ricariche consecutive. Di conseguenza esso assume connotazioni diverse in funzione della soluzione di ricarica considerata, riportandosi:

- nel caso di ricarica al deposito, al consumo lungo l'arco della giornata più onerosa;
- nel caso di ricarica al capolinea, al consumo della corsa più onerosa;
- nel caso di ricarica alle fermate, al più elevato valore di consumo fra due postazioni di ricarica intermedia.

L'algoritmo prevede in input l'acquisizione dei risultati del modulo di calcolo dei consumi per lo scenario elettrico di riferimento, dai quali si calcolano i valori di consumo di progetto nei diversi casi.

Per la ricarica al deposito, l'operazione prevista è la somma dei consumi fra fermate consecutive stimati nell'arco di ciascuna delle quattro giornate tipo simulate, per poi selezionare il valore più elevato fra questi.

Per la ricarica al capolinea, invece, si tratta di confrontare fra loro i consumi complessivi di ogni singola corsa delle quattro giornate tipo e selezionare il maggiore di essi.

Più complesso è il calcolo nel caso della ricarica alle fermate; in tale caso, infatti, è necessario verificare quali siano le postazioni di ricarica utili lungo i percorsi della linea (andata e ritorno), per poi individuare quali archi elementari si collochino fra di essi, sommarne i consumi per selezionare il valore più alto fra tutti quelli delle varie corse nelle diverse giornate tipo dell'anno.

Il consumo per i trasferimenti al deposito, invece, si calcola sui percorsi che collegano la rimessa al capolinea iniziale della prima corsa e al capolinea finale dell'ultima corsa, nelle diverse giornate tipo dell'anno, assumendo un valore di velocità media pari a 50 km/h, considerato che si tratta di spostamenti effettuati in ore di scarso traffico.

Il rapporto fra il consumo dei trasferimenti al deposito e il consumo di progetto è il valore da sottoporre a verifica secondo criteri dettati dall'esperienza e dal buon senso.

Attualmente l'analisi è impostata su valori riportati nella seguente Tabella 6, fissati in base alle motivazioni descritte a margine.

Tabella 6: Ratio limite fra consumi per trasferimenti e consumo di progetto

Soluzione di ricarica	Max ratio trasferimenti/servizio	Motivazione EXPERT
Ricarica solo al deposito	Verifica non significativa	
Ricarica anche al capolinea	100% della corsa critica di progetto	Il sistema di accumulo principale è sovradimensionato per esigenze di potenza e di durabilità, per cui non sussistono vincoli molto stringenti sui trasferimenti al deposito
Ricarica anche alle fermate	70% della corsa critica	I trasferimenti sono garantiti da un accumulo di supporto <i>ad hoc</i> la cui capacità energetica, per poter prendere in esame la competitività di questa soluzione, non deve eccedere quella che sarebbe necessaria per operare la sola ricarica al capolinea

5.3 Dimensionamento e verifica dell'accumulo di bordo

Come visto in precedenza (cfr. par.4.2), il modello di calcolo dei consumi energetici del servizio autobus effettua le stime sulla base di un valore di riferimento del carico pagante e della classe dimensionale (mini, midi, full o articulated) del veicolo utilizzato nell'esercizio della linea in esame.

Come è facile desumere dai valori di capacità dell'accumulo mostrati in Tabella 5, i veicoli standard sono pensati per la ricarica al deposito a fine giornata; il valore di capacità è arbitrariamente fissato in relazione ad esigenze medie di esercizio e potrebbe non essere adeguato al servizio in esame neanche per la soluzione di approvvigionamento notturno.

Per contemperare le necessità di autonomia con l'esigenza di contenere i costi di investimento e di esercizio, si rende necessario verificare ed eventualmente ridimensionare la capacità dell'accumulo rispetto a quella fissata a riferimento, per ciascuno dei tre schemi di esercizio in elettrico considerati. Oltre alle esigenze di consumo, l'accumulo ridimensionato dovrà fare fronte alle necessità di potenza, così come ipotizzate per l'azionamento del veicolo di riferimento di ciascuna classe dimensionale. Infine, bisognerà considerare la variabilità della vita utile della batteria stessa in funzione del rapporto fra la potenza di picco richiesta dal servizio e il contenuto energetico della batteria.

L'autonomia da dover garantire è considerevolmente differente se si considera la ricarica al deposito, ai capolinea o alle fermate. Infatti, nel primo caso, l'autonomia di progetto farà riferimento al servizio effettuato da un veicolo per l'intera giornata di maggiore consumo nell'arco dell'anno; nel caso di ricarica ai Capolinea, alla corsa di maggiore consumo nel corso dell'anno; nel caso di ricarica alle Fermate, all'arco fra due stazioni di ricarica di maggiore consumo nel corso dell'anno²⁰. Ordini di grandezza completamente diversi: per la ricarica al deposito in generale l'autonomia di progetto è dell'ordine delle centinaia di kWh, per la ricarica ai capolinea delle decine di kWh, per la ricarica alle fermate delle unità di kWh.

Per la specifica linea in analisi, i valori di autonomia di prima approssimazione sono desumibili dall'elaborazione dei risultati del modulo di calcolo dei consumi, incrociando con essi l'informazione relativa alla possibilità di installare i dispositivi di ricarica ai Capolinea ed alle Fermate (la ricarica al Deposito si assume sempre realizzabile, in funzione della verifica preliminare di cui si è detto in precedenza). Chiameremo questi valori di autonomia "consumo di base", diversi per ciascuno schema di ricarica.

²⁰ Per semplicità di analisi e con un margine di errore comunque trascurabile, si assume di individuare il massimo consumo fra fermate all'interno della corsa critica.

Il Consumo di Base rappresenta il punto di partenza per il dimensionamento della capacità di accumulo del veicolo elettrico nei casi di ricarica notturna al deposito e di ricarica ai capolinea; per arrivare alle dimensioni finali si utilizza un processo iterativo illustrato nel seguente flow-chart.

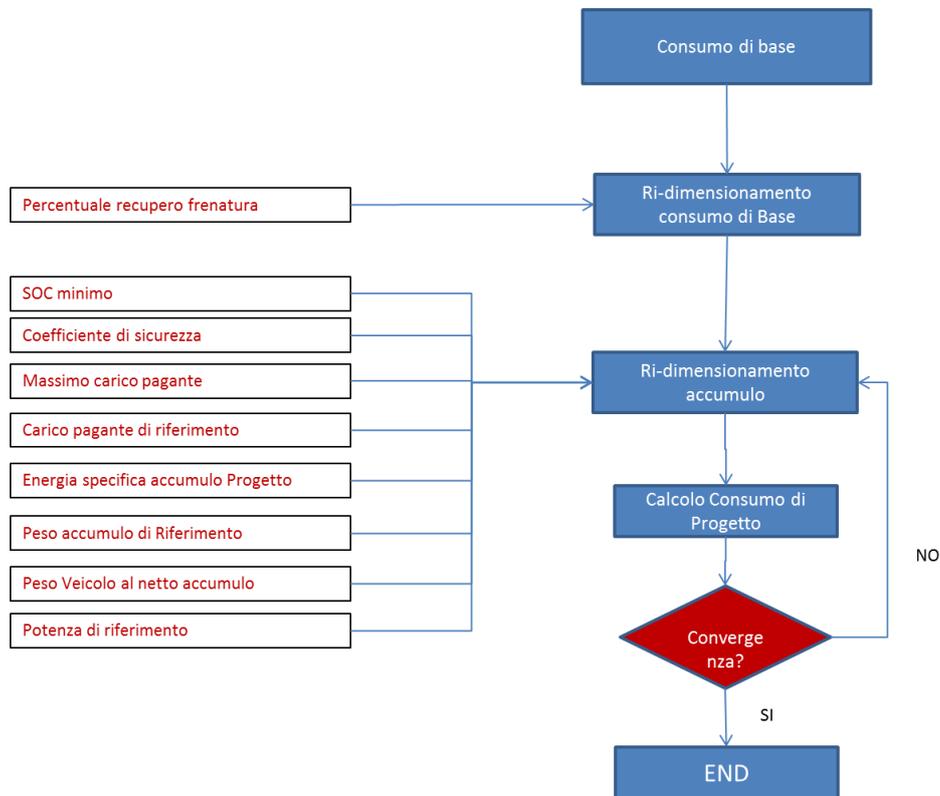


Figura 25: Procedura iterativa per il dimensionamento dell'accumulo di bordo per Architetture A e B

In pratica, il consumo in base al quale calcolare l'autonomia necessaria viene dapprima ricalcolato tenendo conto delle potenzialità di recupero in frenatura della tipologia di accumulo considerata.

$$C_b' = C_b * (1 - rec)$$

dove:

C_b' = consumo di base ricalcolato in relazione alle potenzialità di recupero in frenatura del tipo accumulo in esame

C_b = consumo di base risultante dai modelli di calcolo dei consumi veicolo

rec = percentuale di recupero in frenatura per il tipo di accumulo in esame

Si considera poi che il consumo energetico del veicolo è linearmente proporzionale al suo peso complessivo; in formule:

$$C = K * P$$

e quindi:

$$K = C/P$$

Nel calcolo dei consumi effettuato con il modulo a ciò preposto, P e C sono entrambi valori noti; C corrisponde al valore del consumo di base (C_{base}) mentre P è il valore di riferimento del peso veicolare (P_{rif}) dato da:

$$P_{rif} = P_{Acc_{rif}} + P_{Chassis} + P_{Load_{100}}$$

dove:

- $P_{Acc_{rif}}$ = Peso dell'accumulo di bordo nella situazione di riferimento
- $P_{Chassis}$ = Peso dello chassis del veicolo di riferimento
- $P_{Load_{100}}$ = Peso del massimo carico pagante

da cui:

$$K = C_{base} / P_{rif} = C_{base} / (P_{Acc_{rif}} + P_{Chassis} + P_{Load_{100}})$$

Il consumo corrispondente ad una situazione in cui l'accumulo di bordo, a meno di coefficienti di sicurezza, avesse un contenuto energetico pari a quello necessario per fare fronte ad un consumo C'_b sarebbe dato da:

$$C'_p = C'_b * \frac{P_{Chassis} + P_{Load_{100}} + Acc'_p / EnSpec_p}{P_{rif}}$$

dove:

- C'_p = valore di consumo corrispondente alla situazione di progetto (incognita)
- C'_b = consumo di base ricalcolato considerando il recupero energetico
- $EnSpec_p$ = contenuto energetico medio di una unità di peso dell'accumulo
- ACC'_p = capacità dell'accumulo di bordo dimensionata sul consumo di base ricalcolato C'_b

L'espressione frazionaria rappresenta il rapporto dei pesi del veicolo nella situazione di progetto ed in quella di riferimento, calcolati in funzione del peso dell'accumulo nei due casi, dove la capacità dell'accumulo di bordo a numeratore è data da:

$$Acc'_p = C'_b * (k_s + Soc_{min})$$

in cui k_s è un coefficiente di sicurezza > 1 applicato per tener conto delle approssimazioni del calcolo dei consumi di base, dell'aleatorietà delle effettive situazioni di circolazione dei veicoli, del valore minimo ammissibile dello stato di carica dell'accumulo di bordo (SOC_{min}).

Se la differenza in valore assoluto fra il nuovo valore di consumo C'_p e quello di partenza C'_b risulta al di sotto di un certo valore percentuale arbitrariamente fissato, si assume che la nuova capacità di accumulo del veicolo corrisponda, a meno di approssimazioni accettabili, a quella ottima cercata per le condizioni di esercizio date; in caso contrario si prosegue con altre iterazioni fino a che la condizione voluta non risulti rispettata.

Una volta determinato il consumo di progetto, si verifica che esso sia compatibile con i limiti del rifornimento energetico, fissando i limiti superiori di potenza dei sistemi di ricarica e i tempi di rifornimento, di caso in caso.

Per la ricarica notturna al deposito, criteri di economicità compatibili con le esigenze energetiche, suggeriscono l'impiego di stazioni in corrente alternata il cui valore massimo di potenza in Europa è pari a 43 kW. La massima energia erogabile da tali impianti nei tempi di ricovero notturno dei veicoli (6 ore), considerato un rendimento del 88%²¹, è quindi pari a circa 230 kWh, valore che rappresenta anche il massimo valore di consumo di progetto per l'architettura A.

Per ricaricare i veicoli durante le soste al capolinea, invece, si utilizzano in genere sistemi in Corrente Continua, per i quali i limiti di potenza sono sufficientemente elevati da garantire i tempi di ricarica richiesti. La ricarica conduttiva con tali sistemi può avvenire tramite connettori di tipo 4 (Combo, per lo standard recentemente adottato in Europa) o tramite pantografo: nel secondo caso gli investimenti necessari sono molto più alti ma i limiti di potenza meno restrittivi che nel primo caso²² e, soprattutto, non è richiesto l'intervento dell'operatore per la connessione fra veicolo e l'impianto che potrebbe creare problemi di esercizio. Per tali motivi, la scelta del tipo di ricarica al capolinea è caduta sui sistemi a pantografo. In base alle

²¹ EVT NRA R&D "An Assessment of Level 1 and Level 2 Electric Vehicle Charging Efficiency", Marzo 2013

²² Solo grazie a speciali connettori, è possibile arrivare a potenze intorno ai 200 kW

ipotesi ora viste, per la ricarica al capolinea tecnicamente sarebbe possibile l'installazione di potenze molto elevate, sino a 600 kw e più, ma considerati i tempi di sosta da poter impiegare per la ricarica (5-10') e i valori di energia generalmente in gioco, si ritiene opportuno fissare un valore massimo di 200 kW, in coerenza con il quale, per tempi netti di ricarica di 8' e rendimenti intorno a 85% il consumo di progetto ammissibile non deve superare i 23 kWh, valore peraltro non particolarmente restrittivo.

Nel fissare il valore dei rendimenti della ricarica veloce al capolinea, si è fatto riferimento ai risultati delle prove effettuate nelle precedenti annualità della ricerca di Sistema²³ su una stazione di ricarica rapida in c.c. (vedi Figura 26)

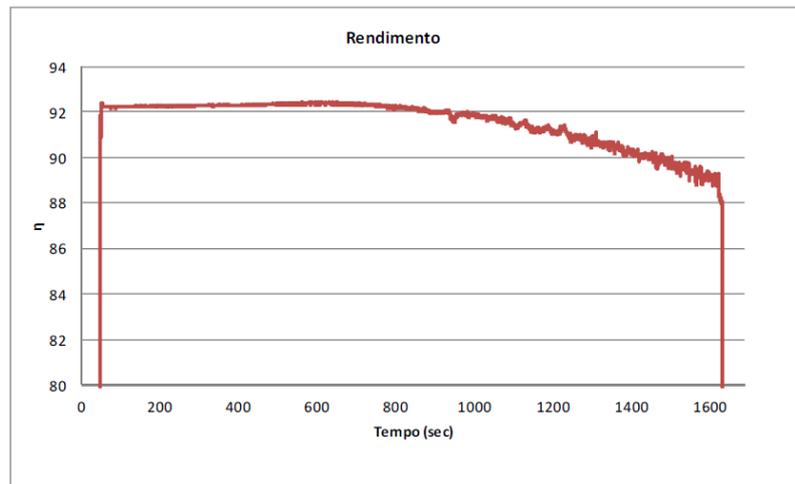


Figura 26: Rendimento della ricarica rapida in c.c. al variare del tempo

Lo studio, relativo alla ricarica di un'autovettura elettrica con accumulo agli ioni di litio, mette in evidenza rendimenti superiori al 92% nella parte iniziale del processo, a partire da stati di carica della batteria sufficientemente bassi il rendimento scende poi gradualmente sino a valori intorno a 86%. In base a questi risultati, poiché i rifornimenti parziali al capolinea risentono sensibilmente dello stato di carica iniziale della batteria (mediamente intorno al 50%) si ritiene opportuno stabilire, in sicurezza, un valore di rendimento pari all'85%.

Quanto alla ricarica alle fermate, considerando che essa si giova della presenza dei supercapacitori di bordo, si può ipotizzare un rendimento elevato, simile a quello del primo caso.

Le costanti utilizzate nel calcolo dei valori massimi del consumo di progetto per le Architetture A e B ed i relativi risultati sono riassunti nella seguente Tabella 7

Per il dimensionamento dell'accumulo nel caso dell'Architettura C si procede diversamente rispetto ai due casi precedenti. In questo caso, infatti, le variabili del sistema sono più numerose per cui è necessario partire da alcune assunzioni.

Tabella 7: Valori di calcolo per la determinazione del massimo consumo di progetto per architetture di ricarica di tipo A e B

Tipo Architettura	Potenza max ricarica critica [kW]	Rendimento di ricarica [%]	Tempi netti di ricarica	Max consumo di progetto ammissibile [kWh]
A	43	88%	6h	227
B	200	85%	8'	23

Si è scelto di fissare i valori di potenza di ricarica da utilizzare per il biberonage alle fermate, avendo esaminato casi di studio concreti, il mercato degli impianti di ricarica ultrarapida, le problematiche tecniche ad essi connesse. A seguito di tale disamina si è ritenuto di stabilire per gli impianti alle fermate una potenza pari

²³ Report RdS/PAR2013/103

600 kW, un valore abbastanza elevato ma tecnicamente fattibile senza accrescere troppo i costi di costruzione e installazione rispetto a valori di potenza inferiori. Imponendo potenze elevate si garantisce la possibilità di operare tratte sufficientemente lunghe fra una ricarica e l'altra e si utilizza un criterio di risparmio sui costi di investimento rispetto a soluzioni con meno potenza unitaria ma maggiore densità di impianti; d'altro canto si accettano maggiori oneri di acquisto dell'accumulo di bordo. La messa a punto dell'ottimizzazione del sistema sarà affrontata a livello di rete nel prossimo periodo di ricerca. In sostanza, con una potenza di 600 kW, un rendimento di ricarica pari a 0,9 e tempi di ricarica netti di 15'' viene garantito un "biberonage" di circa 2,2 kWh.

Per gli impianti ai capolinea si fissa un valore di potenza in grado di garantire un rifornimento energetico analogo a quello realizzabile alle fermate, considerati i tempi netti di ricarica previsti in questo caso (3'). La potenza al capolinea si determina risolvendo l'equazione seguente:

$$W_c * \eta_c * T_c = W_f * \eta_f * T_f$$

dove i simboli assumono i seguente significati e valori:

W_c = valore di potenza impianto al capolinea (incognita)

η_c = rendimento della ricarica veloce al capolinea, pari a 0,85

T_c = tempo netto di ricarica al capolinea in presenza di ricarica alle fermate, pari a 3'

W_f = valore di potenza impianto alla fermata

η_f = rendimento della ricarica veloce alle fermate, pari a 0,90

T_f = tempo netto di ricarica al capolinea in presenza di ricarica alle fermate, pari a 15''

ottenendo un valore di circa 50 kW.

Affinché i criteri di dimensionamento stabiliti siano applicabili al caso di studio, deve verificarsi che il massimo consumo fra due fermate consecutive non sia più elevato di 2,2 kWh; il valore da sottoporre a verifica viene calcolato attraverso l'equazione seguente, utilizzando i risultati della stima dei consumi nella situazione di riferimento:

$$C'_p = C_b * (1 - Rec) * \frac{P_{Chassis} + P_{Load}_{100} + Acc_f / ES_{pec_f}}{P_{rif}}$$

dove:

C'_p rappresenta il consumo massimo fra due fermate nella situazione di progetto (incognita)

C_b rappresenta il consumo massimo fra due fermate stimato per la situazione di riferimento

Rec rappresenta la percentuale di recupero in frenatura per l'accumulo a supercaps

il fattore finale rappresenta il rapporto dei pesi del veicolo nella situazione di progetto ed in quella di riferimento, calcolati in funzione del peso dell'accumulo nei due casi

Dovrà risultare:

$$C'_p \leq 2,2$$

Il valore di 2,2 kWh, a meno dei margini di sicurezza stabiliti, rappresenta il consumo rispetto al quale dimensionare l'accumulo di bordo nel caso di modalità di ricarica alle fermate. La capacità dell'accumulo di bordo sarà data da:

$$Acc_f = 2,2 * (k_s + SOC_{min})$$

dove il fattore in parentesi al secondo membro rappresenta un coefficiente di maggiorazione che tiene conto dei margini di variabilità della stima dei consumi e del valore minimo di carica dell'accumulo.

Nella seguente tabella sono riassunti i valori utilizzati per il dimensionamento dell'accumulo di bordo a partire dal consumo di progetto, in funzione della modalità di ricarica.

Tabella 8: Valori per il calcolo della capacità dell'accumulo di bordo

Architettura di ricarica	Tipologia accumulo	Energia specifica batteria completa [Wh/kg]	Recupero frenatura [%]	SOC minimo [%]	Coeff sicurezza	Motivazione valore coeff sicurezza (Expert)
A	LiFePO4	71	20%	20%	1,2	Si considera un margine di errore del valore del consumo di progetto giornaliero pari a 20%
B	LiFePO4	71	20%	20%	1,8	Assicura dal rischio di defaillance della stazione di ricarica ad uno dei due capolinea, a meno del SOC minimo.
C	Supercaps	2,8	30%	20%	1,3	Si considera un margine di errore del valore del consumo di progetto fra fermate pari al 30%; la defaillance dell'impianto di ricarica che viene "coperta" dall'accumulo secondario

Una volta dimensionata la capacità dell'accumulo in funzione delle necessità energetiche, è necessario verificare che sia garantita anche la potenza al motore fissata per il veicolo di riferimento.

Nel caso della ricarica lenta, le dimensioni della batteria in relazione alle esigenze di energia sono praticamente sempre tali da garantire anche la potenza di progetto, utilizzando opportuni accorgimenti costruttivi (aumento del numero di moduli in serie a scapito del numero di paralleli).

Lo stesso accade per la ricarica ultrarapida, grazie alle caratteristiche intrinseche dei supercondensatori che garantiscono ottimi valori di potenza specifica.

Il caso della ricarica rapida è invece differente. In questo caso, infatti, la batteria dimensionata sulle sole esigenze di autonomia risulta il più delle volte insufficiente a coprire anche le esigenze di potenza. Ancor più vincolanti sono le esigenze di durata della batteria, condizionate dal rapporto fra Potenza di picco (Pp) necessaria ad effettuare il servizio e contenuto energetico della batteria.

Alcune sperimentazioni condotte dal laboratorio STME di ENEA su batterie al NCM hanno evidenziato che sottoponendo la batteria a cicli di prova tali per cui il rapporto fra Potenza di picco del ciclo e contenuto energetico della batteria (Pp/E) è basso (pari a 0,6), il numero di cicli utili (ossia quelli possibili prima di arrivare a ridurre la capacità della batteria di un 20%) è elevato mentre scende drasticamente in condizioni di sollecitazione più intense, dove Pp/E = 3.

Un'analisi sul bilanciamento ottimale fra l'esigenza di ridurre al minimo le dimensioni della batteria e quella di garantirne una durata accettabile, effettuata in termini monetari, dimostra che il valore consigliabile del rapporto Pp/E si aggira intorno a 2; in pratica, assumendo che la potenza di picco corrisponda con la potenza di progetto del powertrain, il contenuto energetico della batteria espresso in kWh dovrà essere pari alla metà della potenza di picco espressa in kW. Considerati a valori usualmente in gioco, tale criterio garantisce anche la possibilità che l'accumulo copra i valori di potenza richiesta.

Nella successiva Tabella 9 si riportano, in relazione ai criteri summenzionati, i valori minimi di capacità della batteria da utilizzarsi in caso di ricariche rapide frequenti, per i veicoli di riferimento considerati.

Tabella 9: Valori minimi di capacità della batteria in base ad esigenze di durata per ricariche rapide frequenti

	Potenza [kW]	Capacità minima accumulo

		per esigenze di durata [kWh]
Mini	60	30
Midi	120	60
Full	160	80
Articulated	200	100

Determinata la capacità dell'accumulo necessaria all'esercizio del veicolo sia in termini di energia che in termini di potenza e durabilità, se ne verifica la fattibilità tecnica rispetto a criteri costruttivi dei veicoli; in pratica si confronta il valore calcolato con un limite massimo (vedi Tabella 10).

Tabella 10: Valori limite della capacità dell'accumulo di bordo

Tipologia accumulo	Max capacità (mini/midi/full/artic.d) [kWh]
LiFePO4	100/200/250/300
Supercaps	5

La soluzione tecnologica viene scartata in caso di esito negativo del confronto; si osserva che la verifica sui limiti di capacità dell'accumulo di bordo non è significativa per la soluzione di ricarica alle fermate, in quanto l'esito è sicuramente positivo, dato il procedimento di dimensionamento utilizzato.

Oltre all'accumulo principale, nel caso della ricarica alle fermate è previsto un accumulo di supporto la cui funzione è quella di garantire la marcia in casi di eventuale defaillance dei sistemi di ricarica su linea e, in ogni caso, i trasferimenti da/a deposito. Per quanto imposto sull'incidenza massima dei trasferimenti nel dimensionamento dell'accumulo, il valore di progetto del consumo per l'accumulo secondario è pari al 70% del valore del consumo della corsa critica. Si suppone che l'accumulo secondario sia costituito da una batteria agli ioni di litio.

5.4 Dimensionamento della potenza di ricarica

Per ogni architettura elettrica si dimensiona la potenza di ricarica necessaria e sufficiente ad effettuare il rifornimento energetico del veicolo nei diversi momenti previsti.

In relazione alle assunzioni di progetto, per tutte le architetture è necessario dimensionare la potenza di ricarica al deposito mentre quella ai capolinea ed alle fermate dovrà essere calcolata solo quando sia previsto il biberonage in fase di esercizio.

Il calcolo della potenza richiede in input l'energia da erogarsi, il tempo di ricarica previsto e il valore del rendimento della ricarica. L'espressione generale è data da:

$$W = \frac{C}{t * \eta}$$

Dove:

W rappresenta il valore di potenza cercato [kW];

C rappresenta il consumo di progetto [kWh];

t è il tempo di netto di ricarica [h]

η è il rendimento di ricarica (<1), determinato sia dalle caratteristiche intrinseche della stazione di ricarica e dell'accumulo di bordo sia dalle modalità di ricarica

In caso di solo rifornimento notturno, l'energia da erogarsi al deposito corrisponde, a meno dei rendimenti della ricarica, esattamente con quella consumata nel corso del servizio e quindi al consumo nell'arco

dell'intera giornata critica, considerati i coefficienti di sicurezza, gli stessi con i quali si determina la capacità dell'accumulo (vedi paragrafo precedente).

Per le soluzioni che prevedono la ricarica anche durante il servizio, l'energia da erogarsi al deposito è quella consumata dopo l'ultima ricarica; in linea di principio essa corrisponde con i consumi per il trasferimento al deposito dopo l'ultima corsa, valori sui quali si è ragionato nel merito delle verifiche preliminari di fattibilità che prendono in esame l'incidenza dei trasferimenti sui consumi di progetto. In base alle limitazioni imposte in quella circostanza, si verifica facilmente che per la modalità di esercizio di ricarica ai capolinea, l'energia di progetto per il dimensionamento della potenza di ricarica al deposito coincide con il consumo di progetto dell'accumulo di bordo (consumo della corsa critica) mentre per la modalità di ricarica alle fermate, la massima energia da assorbire sarà pari al 70% del consumo della corsa critica.

Il tempo di ricarica al deposito è posto pari a 6 ore, assumendo che il servizio degli autobus abbia luogo fra le 6 del mattino e mezzanotte; si ricorda (vedi par. precedente) che per la ricarica lenta al deposito si assume un rendimento pari a 88%.

L'energia richiesta ai capolinea in caso di rifornimento solo durante le soste terminali corrisponde al consumo della corsa critica; in questo caso si assume un tempo netto di ricarica pari a 8' e un rendimento di ricarica pari a 85%.

In caso di biberonage anche alle fermate intermedie, abbiamo visto in precedenza come i valori di potenza degli impianti di ricarica utilizzati nel corso del servizio siano stati fissati a priori per determinare le dimensioni dell'accumulo di bordo: 600 kW per le stazioni alle fermate e 50 kW per quelle ai capolinea, per tempi netti di ricarica pari, rispettivamente, a 15" e 3'.

Si osservi che, essendo stata effettuata precedentemente la verifica di compatibilità fra consumo di progetto e potenzialità dei sistemi di ricarica, non si rende necessario effettuare una verifica di compatibilità fra i valori di potenza risultanti dalle procedure di calcolo ora illustrate ed i valori massimi di potenza resi disponibili dal tipo di impianti che si suppone di utilizzare di caso in caso. Tuttavia, per fissare i valori di potenza da installare effettivamente (sicuramente più bassi del limite massimo ammissibile), è bene considerare quali siano le possibilità concretamente offerte dal mercato delle infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici.

La normativa Internazionale IEC 61851-1 stabilisce 4 modi per effettuare la ricarica dei veicoli elettrici; a questi se ne può aggiungere un quinto, specifico della ricarica molto veloce ("flash") di veicoli in servizio di trasporto pubblico locale; la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riassume le principali caratteristiche elettrotecniche e costruttive degli impianti di ricarica in funzione della modalità di esercizio prevista mentre le immagini a seguire mostrano qualche esempio di impianto disponibile sul mercato per la ricarica in corrente alternata e per la ricarica in corrente continua.

Tabella 11: Caratteristiche degli impianti di ricarica in funzione della modalità utilizzata

	Impiego	Tipo impianto	Tipo connettore	Esempi	Output		Input			
					Potenza [kW]	Tipo corrente [AC/DC]	Tipo corrente [Φ]	Intensità corrente [A]	Tensione di alimentazione [V]	Connessione
MODO 1 (lenta)	Domestico	Wall box	1		3,6-7,4	AC	AC-1 Φ	16-32	230	BT
MODO 2 (Rapida)	Domestico e pubblico	Wall box o stazione con cavo connettore	2	ENEL Pole ABB SC	10-22	AC	AC-3 Φ	16-32	400	BT/MT
MODO 3 (Veloce)	Domestico e pubblico	Stazione con cavo connettore	2/3	ENEL 43 kW	43	AC	AC-3 Φ	63	400	MT
MODO 4 (Ultraveloce)	Domestico e pubblico	Stazione con cavo connettore	4 (Combo o Chademo)	ABB Terra 53 CJG	50-200	DC	AC-3 Φ	125+	400+	MT
Ricarica flash (conduzione)	TPL	Stazione con connessione automatica al veicolo	Braccio robotizzato o pantografo rovesciato	TOSA	150-600	DC	DC	300+	400+	MT



Figura 27: Gamma Enel per la ricarica in AC di veicoli elettrici

Fonte: jumpjack.wordpress.com



Figura 28: Stazione ABB Terra 51 per la ricarica di veicoli elettrici veloce in DC

Fonte: ABB



Figura 29: Autobus elettrico a ricarica automatica in c.c. con pantografo rovesciato

Fonte: ABB

I connettori rappresentano un elemento importante nel determinare potenzialità e costi della ricarica. Ve ne sono disponibili di diversi tipi, in funzione dei parametri elettrici della ricarica e degli standard costruttivi adottati dalle case automobilistiche. La seguente figura illustra i principali tipi di connettori utilizzati per la ricarica a corrente alternata; in Italia, e più generalmente in Europa, salvo alcune eccezioni, le tipologie più diffuse lato stazione sono la 2 in ambiente domestico e il cavo fisso per stazioni accessibili al pubblico.

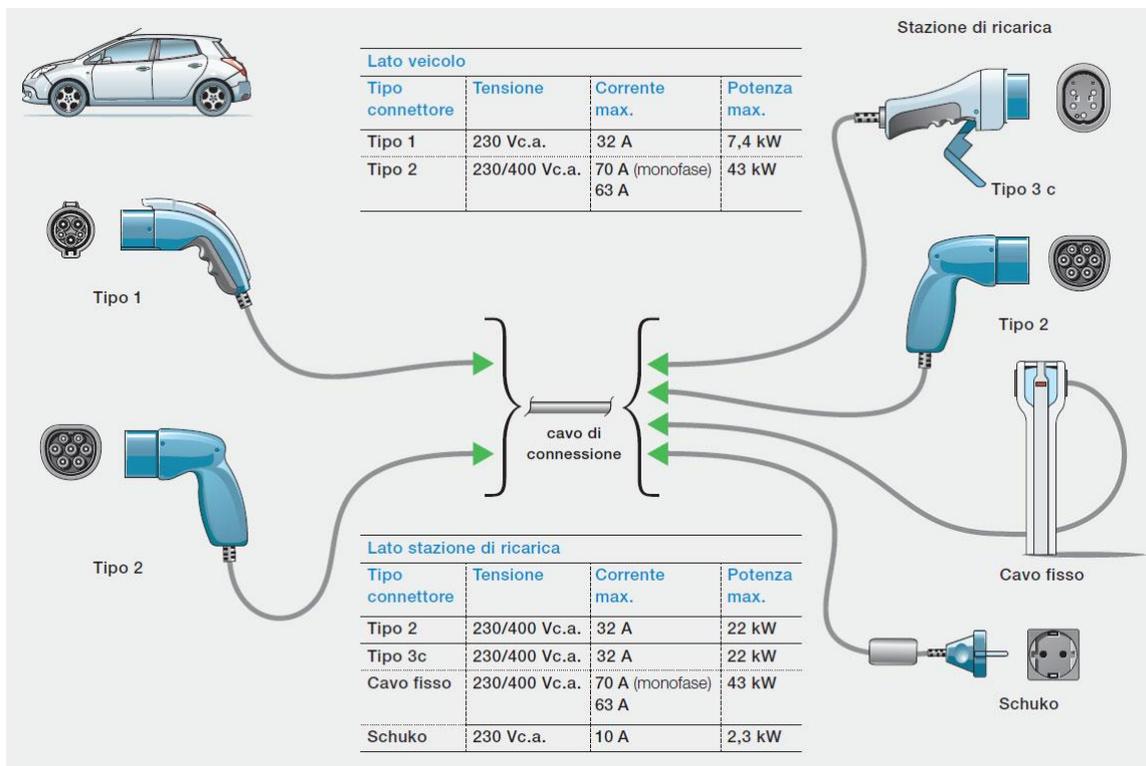


Figura 30: Connettori per la ricarica di veicoli elettrici in corrente alternata

Fonte: e-Station

Per la ricarica a potenze più elevate (sempre in corrente continua) i connettori a cavo sono realizzati secondo gli standard Combo o Chademo, entrambi atti a gestire valori di intensità di corrente e di tensione molto

elevati; le seguente immagine fornisce due esempio di connettori per ricarica in corrente continua di standard Combo.



Figura 31: Esempi di connettori per la ricarica di veicoli elettrici in corrente continua

Fonte: insideevs.com

La precedente panoramica evidenzia che la ricarica in corrente alternata è concretamente resa disponibile per valori discreti di potenza: intorno a 3,4 kW o 7,2 kW per gli impianti alimentati in monofase, a circa 10, 22 o 40 kW per gli impianti alimentati in trifase. Nel determinare la potenza effettiva degli impianti da utilizzare per la ricarica degli autobus durante il ricovero notturno (al deposito) è bene considerare tali imposizioni costruttive, impiegando il seguente algoritmo:

$$W_e = \text{Max}(\text{Range}_{W_t})$$

dove :

W_e rappresenta la potenza effettiva di un impianto di ricarica al deposito, fissato in relazione alla disponibilità di mercato

W_t rappresenta la potenza teorica dell'impianto calcolata il funzione dei consumi energetici e dei tempi di ricarica di progetto, come descritto precedentemente

Range_{W_t} rappresenta l'intervallo di valori di potenza di mercato entro cui ricade la potenza teorica

La seguente tabella esplicita i limiti da considerare per stabilire un valore di potenza in linea con la disponibilità di mercato, nel caso di ricarica notturna al deposito.

Tabella 12: Range di potenza per determinare la potenza effettiva degli impianti per la ricarica al deposito

ID Range	Minimo [kW]	Max [kW]	Tipo di alimentazione da prevedere
RANGE 1	0	3,6	Corrente alternata monofase a 16 A
RANGE 2	3,61	7,4	Corrente alternata monofase a 32 A
RANGE 3	7,41	11	Corrente alternata trifase a 16 A
RANGE 4	11,1	22	Corrente alternata trifase a 32 A
RANGE 5	22,1	43	Corrente alternata trifase a 63 A

Nel caso di impianti a corrente continua, invece, il mercato è ancora in evoluzione, per cui è più difficile stabilire quali siano i valori di potenza correntemente disponibili; per questa tipologia di impianto, inoltre, è presumibile che sussista una maggior possibilità di *tailerizzazione* del prodotto sulle esigenze specifiche del

cliente. In considerazione di ciò, la potenza degli impianti utilizzati per la ricarica ultraveloce al capolinea o per la ricarica lampo alle fermate rimane quella determinata dal calcolo in base ad energia e tempi di ricarica, a meno di opportuni arrotondamenti.

6 Il modello per il confronto economico fra alternative di progetto

6.1 Introduzione

Obiettivo del modello è di fornire all'utente la possibilità di verificare a priori quali della soluzioni di elettrificazione prese in esame risulti economicamente più vantaggiosa e se gli elevati investimenti iniziali che comporta l'elettrificazione siano giustificati o meno dai vantaggi per contro attesi, in termini di risparmio sui costi dell'energia e, per altri versi, di riduzione delle esternalità negative rispetto alle tecnologie tradizionali.

Il modello utilizza gli schemi di un'Analisi Costi/Benefici (ACB) di tipo economico, più adatta alla valutazione di investimenti nel settore pubblico rispetto ad un'analisi di tipo finanziario. L'analisi economica dovrebbe considerare il valore dei beni e servizi in gioco, al netto di utili, tasse e imposte; tuttavia nella prassi spesso tali valori sono assimilati ai prezzi di mercato, al netto di tasse e imposte, di più facile reperimento e comunque sufficientemente indicativi delle grandezze economiche. In questa forma l'analisi diviene più significativa per gli investitori, nel caso specifico le Aziende di Trasporto Pubblico Locale, che così possono misurarsi con i propri vincoli di spesa. Per tale motivo, si è ritenuto opportuno tenere separato il bilancio dei costi concretamente sostenuti dall'operatore (costi interni) da quello delle esternalità negative (costi esterni), che invece ricadono sulla collettività; queste ultime sono esaminate attraverso uno specifico modello, trattato nel successivo capitolo.

Il confronto fra alternative di progetto in termini di costi interni viene operato attraverso il Valore Attuale Netto (VAN)²⁴ delle seguenti voci di costo:

- investimenti iniziali per l'acquisto di veicoli e l'acquisto e l'installazione degli impianti di ricarica;
- investimenti intermedi per la sostituzione dell'accumulo a bordo dei veicoli elettrici o dei veicoli nella loro interezza e degli impianti di ricarica;
- costi energetici per la realizzazione del servizio (solo trazione);
- costi di manutenzione ordinaria dei veicoli e delle infrastrutture di ricarica.

A completamento del quadro economico, per gli investimenti effettuati o i rinnovi degli stessi viene fornita anche una stima degli eventuali valori residui in corrispondenza della loro sostituzione a fine vita tecnica e/o a conclusione del periodo di analisi.

Non sono state inserite altre grandezze economico-finanziarie, come ad esempio ricavi, costi del personale di amministrazione e di guida, ecc., in quanto esse non influiscono sul confronto fra le diverse alternative di analisi.

Ipotesi di base dell'analisi è che per ogni scenario considerato si effettui il completo rinnovo della flotta veicolare immediatamente prima dell'inizio del periodo di analisi (anno zero); per gli scenari di elettrificazione si assume che anche l'acquisto e l'installazione degli impianti di ricarica sia immediatamente antecedente l'istante iniziale convenzionale dell'analisi.

In un'analisi costi/benefici, generalmente una certa soluzione progettuale viene considerata economicamente fattibile quando il VAN è maggiore di 0 e la soluzione preferibile è quella per cui il VAN è il più alto fra tutti; nel caso di specie, tuttavia, essendo la maggior parte dei flussi negativi, la scelta cadrà sull'alternativa con il VAN meno negativo.

Il modulo della valutazione economica si applica in due fasi successive del processo di analisi del DSS: per la selezione della soluzione di elettrificazione più idonea fra le tre possibilità di esercizio considerate (ricarica notturna al deposito, biberonage ai soli capolinea e biberonage ai capolinea ed alle fermate); per il confronto fra l'alternativa di elettrificazione selezionata e le alternative di alimentazione convenzionale, a gasolio e a metano. Di volta in volta, la procedura considera solamente le voci economiche che hanno un ruolo discriminante tra le alternative considerate.

²⁴ Il Valore Attuale Netto di un costo sostenuto in un generico momento all'interno del periodo di analisi è il valore riportato all'istante iniziale del periodo stesso, tenendo conto dell'immobilizzazione del capitale utilizzato, per un fissato valore del costo del denaro (tasso di sconto).

Di seguito la Figura 32 e la Figura 33 riportano lo schema generale riprodotto all'interno del modello per la valutazione economico-finanziaria degli scenari nelle due fasi appena viste.

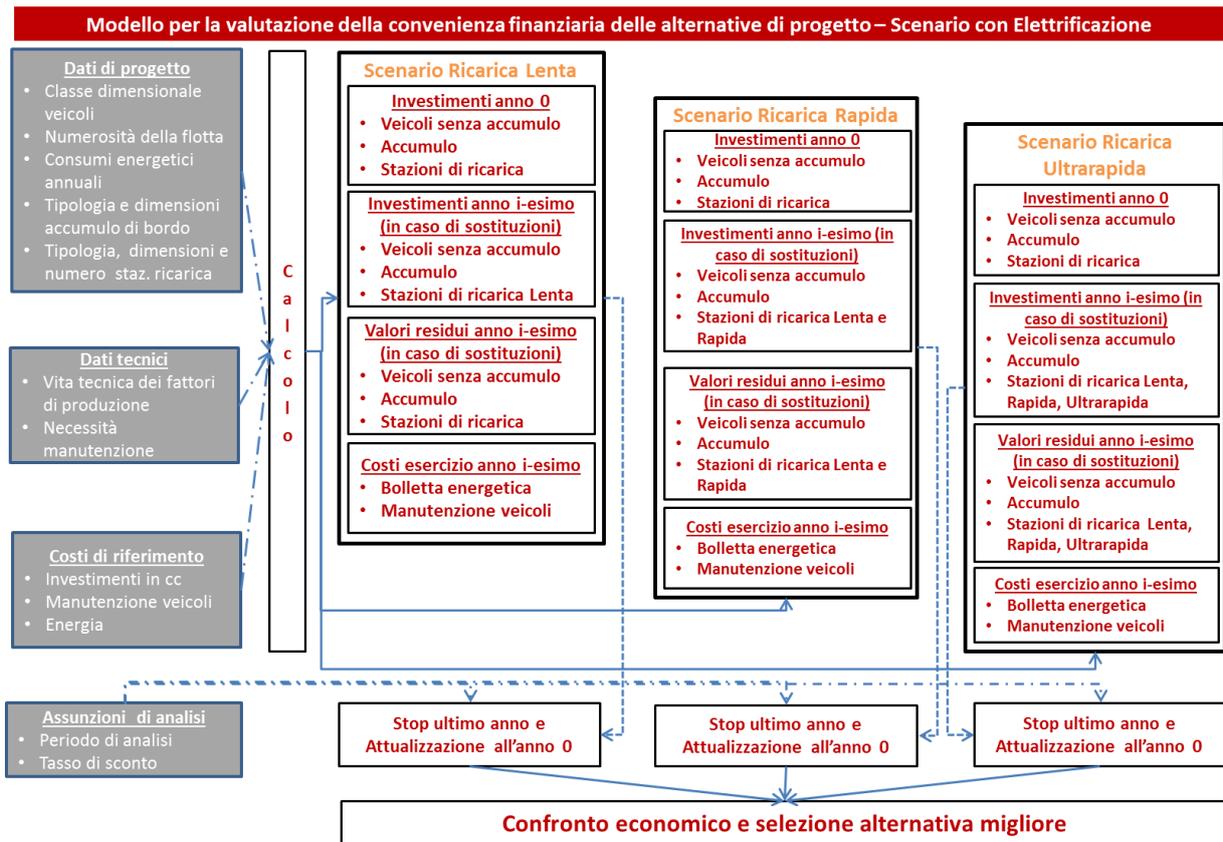


Figura 32: Procedura per il confronto economico delle scelte tecnologiche di elettrificazione

Fonte: Elaborazione ENEA

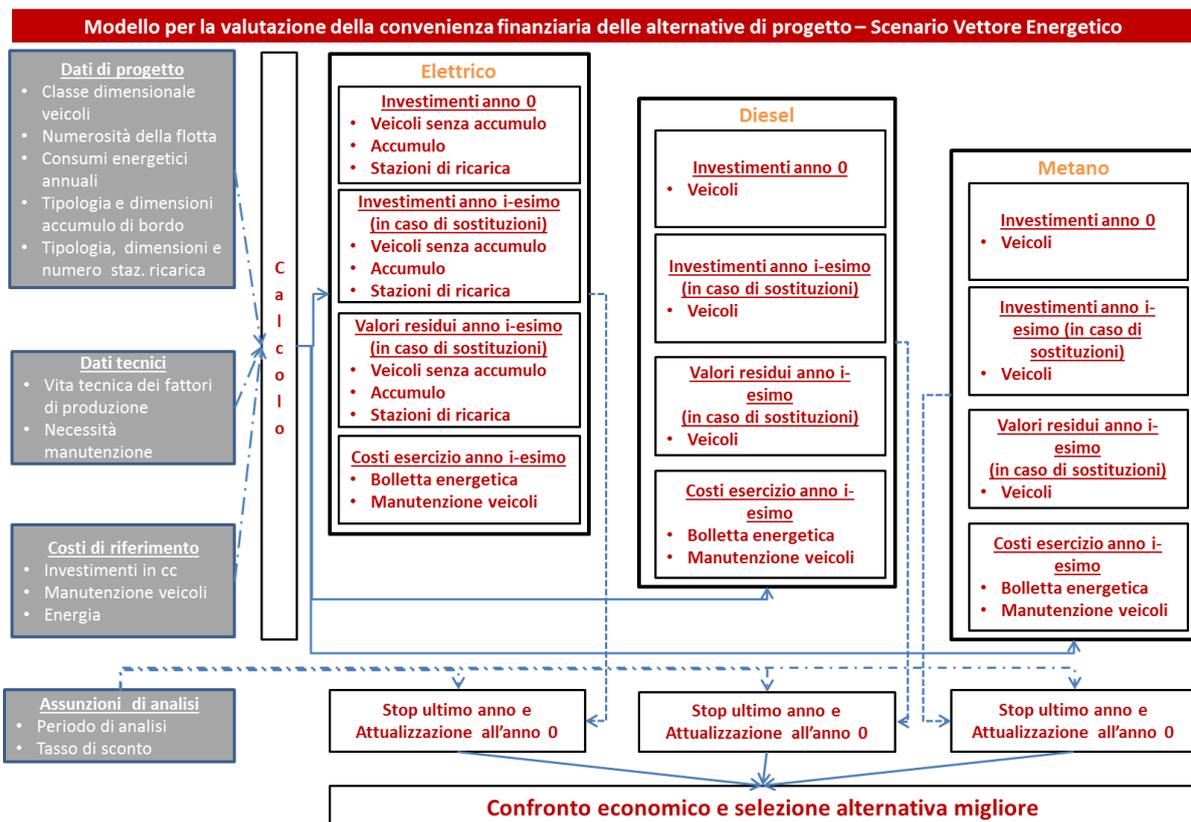


Figura 33: Procedura per il confronto economico delle alternative di alimentazione energetica

Fonte: Elaborazione ENEA

Prima dell'applicazione della procedura illustrata nei grafici precedenti, sono previsti alcuni calcoli preliminari per predisporre parte degli input. In particolare, due procedure preliminari calcolano rispettivamente:

- il valore annuale di percorrenza, comune a tutte le alternative di progetto, a partire dai dati di esercizio delle quattro giornate tipiche considerate dal modello e dell'incidenza di ciascuna di esse nell'arco dell'anno;
- i valori di consumo annuo per ciascuna alternativa tecnologica considerata, a partire dai risultati dei moduli di calcolo applicati nelle fasi precedenti per lo scenario di riferimento e tenendo in considerazione le variazioni rispetto a questo in termini di carico dei veicoli e, nel caso di alimentazione elettrica, delle dimensioni dell'accumulo.

Un terzo calcolo consente, per ogni alternativa considerata, di dimensionare la consistenza della flotta sulla base della frequenza del servizio e dei tempi tecnici dell'approvvigionamento energetico.

I dati di input dell'intero processo, a partire dai calcoli preliminari sino alla stima degli indicatori di redditività economica degli investimenti, sono riassunti nella seguente Tabella 13, distinguendo l'origine concettuale dei dati stessi.

Tabella 13: Dati di input utilizzati nel modello di valutazione economica

Dati generali di progetto	
Esercizio giornate tipiche: <ul style="list-style-type: none"> • corse per ogni percorso • tempi di percorrenza • lunghezza dei percorsi 	n. corse/giorno e ora di punta minuti km
Giorni di esercizio annui per ogni giornata tipica	n. giorni
Classe dimensionale veicoli	Mini – midi – full- articulated
Risultati dei modelli precedenti	
Consumi energetici disaggregati	kg gasolio o metano, kWh di energia elettrica
Capacità accumulo di bordo	kWh
Numero stazioni di ricarica per tipologia e tensione di alimentazione	n. stazioni per tipologia e tensione di alimentazione
Potenza da impegnare per tensione di alimentazione	kW in BT e MT
Punti di prelievo energia elettrica per tensione di alimentazione	n. punti di prelievo in BT e MT
Dati specifici dell'analisi economica – Assunzioni di calcolo	
Tasso di sconto	%
Durata periodo di analisi	Anni
Dati specifici dell'analisi economica – Dati tecnici	
Vita tecnica dei veicoli	km
Vita tecnica stazioni di ricarica	Anni
Vita tecnica dell'accumulo di bordo	n. cicli di carica/scarica
Unità di personale di manutenzione	Unità/bus/anno
Consumo specifico lubrificante	g/km
Dati specifici dell'analisi economica – Costi unitari	

Costo annuo personale di manutenzione	€/addetto/anno
Costo materiale di manutenzione	€/km
Costo veicoli	€/bus
Costo fisso di acquisto e installazione stazione di ricarica	€/impianto
Costo variabile di acquisto e installazione stazione ricarica	€/kW
Costo accumulo elettrico	€/kWh
Costo dell'energia	€/l - €/kg - €/kWh
Costo potenza elettrica impegnata	€/kW
Costo allaccio rete elettrica	€/punto prelievo

Fonte: Elaborazione ENEA

6.2 Dati generali comuni alle alternative considerate

Tra i dati di input visti precedentemente, ve ne sono alcuni che sono comuni a tutte le soluzioni tecnologiche prospettate. Esse riguardano le grandezze progettuali generali, le assunzioni a base dell'analisi economica ed alcuni valori di costo.

Le grandezze progettuali riguardano la classe dimensionale dei veicoli utilizzate per l'esercizio della linea in esame e le caratteristiche del servizio in termini di frequenza delle corse e tempi di percorrenza.

Riguardo alle assunzioni per l'analisi economica, la durata del periodo di analisi rappresenta un elemento molto importante nel caso di progetti di investimento caratterizzati da vita tecnica diversa. Nel modello, il periodo di analisi è un valore intero maggiore o uguale a 1 fissato dall'utente per rispondere alle proprie esigenze di contabilità; in considerazione della tipologia di investimento, si ritiene opportuno stabilire la durata dell'analisi in un periodo medio-lungo, oscillante tra i 10-15 anni. Si assume che sin dall'inizio del primo anno di analisi la linea in esame sia perfettamente operativa, essendo già stati acquisiti e posti in esercizio in una fase precedente (Anno 0) tutti i fattori di produzione necessari; i tempi tecnici per l'espletamento delle gare per l'acquisto di beni e servizi nelle diverse ipotesi, quindi, sono considerati invarianti ai fini della valutazione delle alternative.

Al fine di rendere confrontabili i progetti di investimento, che dispiegano i loro effetti in momenti temporali diversi, si procede con l'operazione di attualizzazione dei flussi di cassa. Ciò avviene applicando un tasso di sconto intertemporale (Tds) opportunamente individuato. Il tasso di attualizzazione rappresenta il costo medio ponderato del capitale proprio e quello di debito che costituiscono la struttura finanziaria dell'azienda in esame. L'applicazione del tasso di sconto permette di stimare il valore equivalente delle grandezze monetarie rispetto ad un medesimo riferimento temporale che, per le caratteristiche degli investimenti considerati in questo contesto, usualmente viene posto coincidente con l'inizio del primo anno di esercizio. La Guida per la valutazione di progetti di investimento della Commissione Europea, per investimenti in beni e servizi di natura pubblica suggerisce un tasso di sconto finanziario pari al 5%; tuttavia il software può essere facilmente impostato su altri valori a scelta dell'utente.

Con riferimento ai valori economici comuni a tutte le alternative tecnologiche esaminate, si specifica che essi riguardano i costi unitari del personale impiegato per le necessità di manutenzione dei veicoli e degli impianti. Il costo annuale di tale personale è stato desunto dal Contratto Collettivo Nazionale del Lavoro.

6.3 Calcoli preliminari

6.3.1 Dimensionamento della flotta

Nel computo dei costi di investimento e di esercizio di una linea di trasporto pubblico gioca un ruolo rilevante il numero di veicoli che si rendono necessari e realizzare il servizio con le caratteristiche desiderate.

Il numero di veicoli necessari a realizzare il servizio dipende dalle caratteristiche della linea e del servizio stesso nonché dai tempi di approvvigionamento energetico; in relazione a quest'ultima variabile, può essere necessario un diverso numero di veicoli a seconda della tecnologia considerata. Ciò non sarà privo di effetti sulla stima della convenienza economica di una soluzione progettuale rispetto ad un'altra.

In generale il numero di veicoli necessari e sufficienti è funzione del tempo di corsa e della frequenza delle corse nell'ora di maggiore intensità di servizio e dei tempi di sosta al capolinea.

Detti:

T il tempo medio di corsa nell'ora di punta

I l'intervallo medio fra corse nell'ora di punta

S il tempo medio di sosta al capolinea

il numero di veicoli necessari e sufficienti per il servizio sarà dato da:

$$V = \text{Sup} \left[2 * \left(\frac{T + S}{I} \right) \right]$$

dove il termine a numeratore in parentesi rappresenta il tempo di giro completo di un veicolo nel caso di un servizio che non preveda un percorso circolare; in questo ultimo caso non va applicato il fattore 2.

Nel caso di esercizio in elettrico, i tempi di sosta al capolinea possono essere condizionati dalle necessità di ricarica, quando questa sia prevista in corrispondenza di tali postazioni; nel caso di ricarica alle fermate, poi, anche i tempi medi di corsa potrebbero aumentare per motivi analoghi.

In generale, quindi, la flotta per l'esercizio di una linea in elettrico con ricariche nel corso del servizio potrebbe essere leggermente più numerosa di quella necessaria per un esercizio con veicoli di tipo convenzionale o elettrici con ricarica al deposito.

Per poter cogliere tali differenze è necessario fare delle assunzioni sui tempi di sosta ai capolinea ed alle fermate nei diversi casi di esercizio.

Ragionevolmente si può pensare che il tempo medio di sosta al capolinea di un veicolo convenzionale nell'ora di punta si aggiri intorno ai 5÷10 minuti. Un veicolo elettrico a ricarica notturna non richiede modificazioni del programma di esercizio rispetto ad un veicolo convenzionale, per qualsiasi valore programmato del tempo di sosta; al contrario, per veicoli elettrici alimentati alla fine di ogni corsa si renderà necessario fissare dei tempi di sosta compatibili con i tempi di ricarica previsti. È credibile pensare che la sosta debba eccedere di qualche minuto (un paio) il tempo di ricarica. Perciò, se nel caso di *biberonage* al solo capolinea si prevedono tempi netti ricarica pari a 8' (valori ragionevoli per le capacità di accumulo previste in tali casi), il tempo minimo effettivo di sosta da prevedersi nel programma di esercizio della linea elettrificata risulta pari a 10'. Analogamente, per le soluzioni con rifornimento alle fermate, assumendo un tempo di ricarica al capolinea pari a 3', il tempo minimo di sosta da stabilire nel programma sarà di 5'; si osservi che in questo caso non si determinano sostanziali variazioni rispetto all'esercizio tipico di un veicolo convenzionale e potrebbe darsi il caso che le operazioni di ricarica non richiedano aggiustamenti del programma di esercizio. Differenze possono invece verificarsi sui tempi di corsa a causa delle necessità di ricarica alle fermate; si può assumere forfettariamente una maggiorazione pari al 10% rispetto ad un veicolo a combustione interna.

Fissiamo le idee con alcuni esempi.

Se nel caso di esercizio con veicoli convenzionali fosse: I = 15', T = 20', S = 10', il numero di veicoli necessari per effettuare il servizio, in andata e ritorno sarebbe pari a $V = \text{SUP}[2*(20+10)/15] = 4$

Se la ricarica elettrica al capolinea richiedesse complessivamente 12' nel caso di esercizio in elettrico si avrebbe:

- nel caso della ricarica rapida al capolinea, $V = \text{SUP}[2*(20 + 12)/15] = 5$
- nel caso della ricarica ultrarapida alle fermate, $V = \text{SUP}[2*(22 + 10)/15] = 5$

Quindi si verifica in questo caso che piccoli aumenti dei tempi di esercizio influenzano il dimensionamento della flotta (+25%).

Viceversa se si avesse: $I = 12'$, $T = 20'$, $S = 10'$ il numero di veicoli necessari per effettuare il servizio in elettrico sarebbe lo stesso che per un servizio con bus convenzionali, come si può facilmente verificare numericamente.

Il calcolo della numerosità della flotta nei diversi casi richiede in input il numero di corse ed i tempi medi di corsa realizzate nell'ora di punta da un veicolo di tipo convenzionale; tali valori sono desumibili dal Database dei dati aziendali acquisiti. Per quanto riguarda il tempo di sosta al capolinea, non essendo questo dato generalmente disponibile in formato "open", si è assunto un valore di $10'$.

6.3.2 Dimensionamento del numero di stazioni di ricarica necessarie all'esercizio

Il numero delle stazioni necessarie per garantire che tutti i veicoli possano effettuare la ricarica nei momenti e nei tempi richiesti dal programma di esercizio rappresenta un'altra importante variabile di costo dell'alimentazione elettrica.

Nel caso delle stazioni per la ricarica notturna al capolinea si può assumere di dover garantire un impianto di ricarica per ogni veicolo presente nella flotta.

Al capolinea, il numero di impianti necessari sarà dato dal numero di veicoli contemporaneamente in carica al terminale, date le caratteristiche del servizio nell'ora di maggiore offerta (ora di punta), e a meno di anomalie; tale valore, deterministicamente, è dato dalla formula seguente:

$$V_{cc} = Sup\left(\frac{TL_r}{I}\right)$$

dove:

V_{cc} è il n° di veicoli contemporaneamente in carica al capolinea (incognita)

TL_r è il tempo lordo di ricarica di ogni veicolo (tempo netto di carica + perditempo)

I è l'intertempo medio fra corse nell'ora di punta

Considerato che il tempo lordo di ricarica al capolinea per l'architettura di tipo B è stato fissato pari a $10'$ ($8+2$) e che l'intertempo medio fra due corse consecutive difficilmente scende al di sotto dei $5'$, il valore massimo atteso è di 2 impianti per ogni terminale. Si stabilisce comunque un limite superiore di 2, in considerazione della flessibilità di esercizio di cui sono dotati i veicoli grazie al sovradimensionamento dell'accumulo di bordo che consente, se necessario, di "saltare" qualche operazione di biberonage.

Quanto agli impianti alle fermate per l'architettura di tipo C, stabilendo che fra due stazioni di ricarica consecutive il consumo del veicolo debba essere pari all'energia erogabile da una stazione nel tempo di rifornimento previsto e considerata la presenza delle stazioni di ricarica ai due capolinea, il numero da installare lungo il percorso più critico della linea sarà quindi dato dalla soluzione della seguente espressione:

$$R_f = Sup\left(\frac{CC_{crit}}{2,2}\right) - 1$$

dove:

R_f è il numero di stazioni di ricarica alle fermate lungo il percorso critico

CC_{crit} è il consumo della corsa critica

2,2 è l'energia erogabile da una stazione di ricarica installata alla fermata, secondo le assunzioni di progetto.

Per il percorso di ritorno si suppone un medesimo numero di stazioni. Nel caso in cui si trattasse di un percorso circolare, nella precedente espressione andrebbe eliminata la sottrazione finale e, nel calcolo del numero di stazioni necessarie all'esercizio, non bisognerebbe considerare le necessità del percorso di ritorno.

6.3.3 Stima delle percorrenze annuali

La percorrenza annuale è un valore utilizzato nel calcolo di tutti quei costi i cui valori unitari sono dati in relazione alla percorrenza.

L'algoritmo del calcolo della percorrenza complessiva in anno di esercizio della linea in esame recepisce i dati relativi a quattro giornate tipo dell'esercizio nei diversi periodi caratteristici dell'anno (feriale invernale ed estivo, festivo invernale ed estivo); per ciascuna di queste giornate l'Azienda fornisce il numero di giorni dell'anno di cui la giornata è rappresentativa e il programma tipo di esercizio della linea, che si assume essere identico per le diverse alternative tecnologiche. In base a questi dati si ricava, per ogni linea, la percorrenza giornaliera in ogni giornata tipica e poi, con un'operazione di media pesata sul numero di giorni rappresentati, la percorrenza annuale. In formule:

$$PA = \left(\sum_{g=1}^G PA_g * ng_g \right) / \sum_{g=1}^G Ng_g$$

dove:

PA è la percorrenza annua sulla linea (incognita)

PA_g è la percorrenza giornaliera nella giornata tipica g-esima, data dalla somma delle percorrenze elementari nella stessa giornata

Ng_g è il numero di giorni di esercizio annui della giornata tipica g-esima

G è il numero di giornate tipiche considerate

6.3.4 Stima dei consumi annuali

L'analisi costi/benefici calcola i costi dell'energia in base ai consumi annuali nelle diverse alternative tecnologiche, che variano in funzione del tipo di alimentazione e di ricarica.

Il calcolo dei consumi annuali parte dai risultati disaggregati della simulazione dei consumi nella situazione di riferimento di ogni tipo di alimentazione; per ogni percorso in ciascuna giornata caratteristica analizzata è facilmente ricavabile il consumo totale mediante operazioni di somma.

I valori di consumo così calcolati, tuttavia, sono relativi a determinate condizioni di carico del veicolo (esprese in percentuale rispetto alla capacità del veicolo stesso) e, per il veicolo elettrico, alle dimensioni del sistema di accumulo di bordo standard; è perciò necessario ricalcolare nuovi valori di consumo in relazione al carico effettivo medio dei veicoli e dell'accumulo dimensionato nella fase di progettazione del sistema elettrico.

L'assunzione di base è la stessa vista nel caso del dimensionamento dell'accumulo elettrico, e cioè che il consumo sia linearmente dipendente dal peso lordo del veicolo, il quale, a sua volta è dato dalla somma della tara, del carico pagante e, nel caso dell'elettrico, dell'accumulo di bordo. Per riproporzionare il consumo è necessario perciò operare il rapporto fra i due valori di peso lordo del veicolo, quello di riferimento e quello effettivo.

Un elemento di complessità del ricalcolo dei consumi per i casi di alimentazione convenzionale (diesel e metano) è dato dal fatto che, per convenzione, nella base di dati iniziale, il carico effettivo dei veicoli è espresso in percentuale rispetto alla capacità del veicolo elettrico, diversa, in linea di principio, da quella degli omologhi veicoli diesel e metano. Per effetto di questa scelta nell'esprimere i dati iniziali, il calcolo del rapporto fra consumo annuale di base e consumo annuale effettivo assume la seguente espressione:

$$\frac{CA_{pg}}{CAB_{pg}} = \frac{T + LF_{pe} * CAP_e * P_p}{T + LF_r * CAP_d * P_p}$$

dove:

CA_{pg} (incognita) è il consumo annuo effettivo sul percorso p-esimo nella giornata tipica g-esima

CAB_{pg} è il consumo annuo di base sul percorso p-esimo nella giornata tipica g-esima

T è la tara del veicolo convenzionale di riferimento (diesel o metano)

CAP_d è la capacità del veicolo convenzionale di riferimento

CAP_e è la capacità del veicolo elettrico di riferimento

LF_r è il Load Factor utilizzato nella simulazione dello scenario di riferimento (usualmente 100% della capacità del veicolo di riferimento per il tipo di alimentazione in esame)

LF_{pe} il Load Factor effettivo giornaliero medio sul percorso p -esimo nella giornata tipica g -esima rispetto alla capacità del veicolo elettrico di riferimento

P_p è il peso di riferimento di un passeggero

Risolviendo la precedente equazione rispetto a CA_{pg} e poi effettuando semplici operazioni di media pesata sul numero di giorni di esercizio annuali di ogni giornata, si ottiene il consumo annuale effettivo sulla rete in esame. In formule:

$$CA = \left(\sum_{p=1}^P \sum_{g=1}^G CA_{pg} * Ng_g \right) / \sum_{g=1}^G Ng_g$$

dove:

CA è il consumo annuo effettivo sulla rete

CA_{pg} è il consumo giornaliero effettivo sul percorso p -esimo nella giornata tipica g -esima

Ng_g è il numero di giorni di esercizio annui della giornata tipica g -esima

P è il numero di percorsi della rete, appartenenti ad una qualsiasi linea della stessa

G è il numero di giornate tipiche considerate

Nel caso del calcolo del consumo annuale per l'alimentazione elettrica, scompare la complessità dovuta all'ambiguità dei valori di Load Factor, sempre riferiti allo stesso veicolo elettrico, ma si presenta la necessità di considerare la variazione dell'accumulo nella situazione di riferimento ed in quella effettiva. In questo caso il rapporto fra consumi effettivi e consumi di base è dato da:

$$\frac{CA_{pg}}{CAB_{pg}} = \frac{T + LF_{pe} * CAP_e * P_p + ACC}{P_{rif}}$$

Dove ACC sta ad indicare il peso dell'accumulo effettivo del veicolo, ossia quello dimensionato con le procedure esposte nel precedente capito, e P_{rif} il peso complessivo del veicolo elettrico nella configurazione di riferimento.

Risolta la precedente equazione nell'incognita CA_{pg} , il calcolo del consumo annuale effettivo si riporta al caso precedente.

6.4 Calcolo degli investimenti iniziali

L'analisi degli investimenti fa riferimento all'acquisto degli autobus e, solamente per lo scenario di elettrificazione, anche all'acquisto degli accumuli di bordo e delle stazioni di ricarica. La seguente Figura 34 riassume le voci di investimento e i relativi algoritmi di calcolo nel caso dell'alimentazione elettrica.

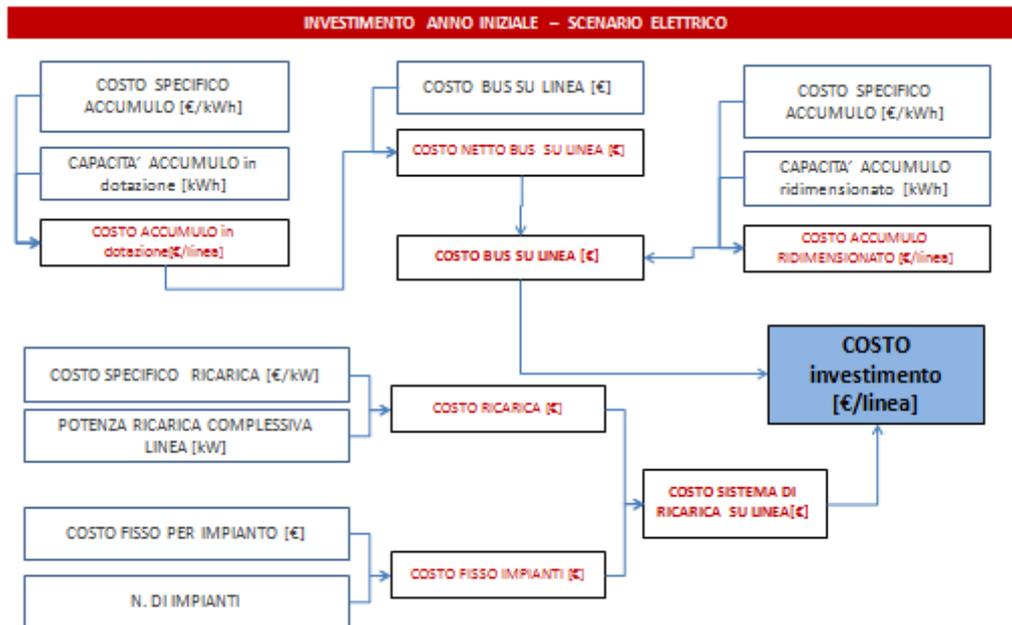


Figura 34: Flusso logico investimenti

6.4.1 Acquisto degli autobus e dell'accumulo di bordo

Il costo d'acquisto di una flotta omogenea di bus di tipo convenzionale non pone particolari problemi di calcolo in quanto è dato dal semplice prodotto del costo di un singolo veicolo per il numero di veicoli componenti la flotta. In formule:

$$CF = V * CV$$

dove:

- CF = costo di acquisto della flotta (incognita) [€]
- V = numerosità della flotta [n. veicoli]
- CV = costo di un autobus, al netto dell'IVA [€/bus]

Nel caso dei veicoli elettrici, il calcolo si complica leggermente in quanto questi si trovano sul mercato già con il loro pacco batteria installato, di tipologia e capacità generalmente diversa da quella dimensionata per il caso in esame. Per calcolare il costo d'acquisto del veicolo dotato del corretto accumulo di bordo è necessario dapprima scomputare il costo del pacco batteria in dotazione all'autobus per poi sommarvi il costo della batteria sulla base del ridimensionamento operato, è stato assunto come invariante invece il costo del caricabatteria di bordo. In formule:

$$CF = V * CV_r$$

dove:

- CF = costo di acquisto della flotta con capacità della batteria ridimensionata (incognita) [€]
- V = numerosità della flotta [n. veicoli]
- CV_r = costo del bus con capacità della batteria ridimensionata, al netto dell'IVA [€]

A sua volta sarà:

$$CV_r = CV_n * (1 - sc_v) + CB_r * (1 - sc_b) = (CV - b * CU_b) * (1 - sc_v) + b_r * CU_p * (1 - sc_b)$$

con:

- CV_n = costo del bus al netto del costo del pacco batteria di dotazione [€]

- CB_r = costo della capacità della batteria ridimensionata [€]
 CV = costo di acquisto dell'autobus [€/bus]
 b = capacità della batteria in dotazione [kWh]
 b_r = capacità della batteria ridimensionata [kWh]
 CU_b = costo unitario dell'accumulo in dotazione [€/kWh]
 CU_p = costo unitario dell'accumulo di progetto [€/kWh]
 Sc_v = sconto [%]
 Sc_b = sconto [%]

Nel modello di calcolo, si fa riferimento a valori medi di mercato, per fissare i quali si è resa necessaria un'approfondita analisi dell'offerta disponibile a livello nazionale. I risultati più significativi della ricerca sono riportati nelle tabelle in appendice da cui, a titolo esemplificativo, è stata estrapolata la tabella di seguito, che riporta alcuni prezzi di listino al netto dell'IVA relativi ad un periodo che va da 2011 al 2015, per le varie classi dimensionali considerate e per ciascuna alimentazione; per facilità di interpretazione, nella tabella sono riportate anche le caratteristiche tecniche salienti, come la potenza di trazione, il numero di posti e il peso, indispensabili per poter effettuare un confronto economico corretto.

Tabella 14: Prezzi di listino di alcuni autobus distinti per classe dimensionale e per alimentazione

Classe	Marca	Modello	Lung. (m)	Posti totali (n.)	Peso lordo (kg)	Tara con conduc. (kg)	Potenza cv (kW)/giri - kW di picco	Cilindrata c.c. - Capacità (Ah)	Standard Emissivi	Costo Totale (€)
DIESEL										
Mini	Iveco	Daily Pop	7	28	4.500	2.700	107(150)/3.500	3.000	Euro6	70.000
Midi	Rampini	ALE'	8	47	10.500	6.900	180(132)/2.400	4.580	Eev	220.000
Full	Mercedes	CITARO	12	105	19.000	10.770	287(210)/2.200	n.d.	Euro5	347.000
Articul.	Bredamenarini	AVANCITY +S	18	147	28.000	17.000	320(2.300)/1.900	n.d.	Eev	479.000
METANO										
Mini	Iveco	DAILY POP CNG 50C PRA	7	28	5.600	3.500	136(100)/2.730-3.500	2.998	Euro6	75.200
Midi	Bredamenarini	VIVACITY+ C CNG	8	53	13.000	9.100	231(170)/2.200	6.880	Eev	305.000
Full	Mercedes	CITARO CNG	12	99	19.000	12.300	326(240)/2.000	11.960	Eev	439.000
Articul.	Bredamenarini	AVANCITY + S CNG	18	149	28.000	17.500	310(228)/2.000	12.800	Eev	560.000
ELETTRICO										
Mini	Bredamenarini	Zeus Classe I	6	32	6.500	3.950	60	69	n.d.	219.000
Midi	Rampini	ALE' EL Classe I	8	44	11.800	n.d.	150	180	n.d.	440.000
Full	Solaris (Polonia)	URBINO ELECTRIC Classe I	12	85	19.000	n.d.	160	210	n.d.	n.d.
Articul.	Solaris - Bombardier	Urbino 18 electric	18	126	27.000	17.550	240	90	n.d.	n.d.

Fonte: Elaborazione ENEA su varie fonti

L'autobus diesel, generalmente, ha un prezzo di mercato molto conveniente rispetto alle altre due alimentazioni esaminate, in particolare il prezzo di un autobus elettrico è in genere, nell'ordine di grandezza pari al doppio del prezzo di un bus diesel della stessa classe dimensionale. Anche il prezzo di un autobus a metano solitamente è maggiore del rispettivo bus alimentato a gasolio. I sistemi di trazione a metano anche se caratterizzati da margini di miglioramento tecnico, sono tecnologicamente ormai maturi, gli autobus elettrici invece sono ancora in una fase di continua, rapida innovazione tecnologica, basti pensare alla chimica del pacco batteria e all'elettronica del sistema di alimentazione, di controllo e sicurezza.

Il sovrapprezzo rispetto ai bus diesel, costituisce una prima importante barriera alla diffusione dei sistemi di trazione ambientalmente più sostenibili ma ai fini della scelta di una determinata tipologia di autobus l'azienda deve considerare anche la riduzione dei costi energetici e delle esternalità negative, come illustrato nel seguito.

La Tabella 15 illustra i prezzi di riferimento assunti all'interno del modello di calcolo per le tre alimentazioni esaminate e per le varie classi dimensionali con caratteristiche omogenee, sulla base di quanto già visto nella Tabella 14, integrata con una stima sui costi dei bus elettrici di grossa taglia mancanti, attraverso assunzioni sulla base dei prezzi che erano noti. I costi riportati fanno riferimento ad un'ipotetica gara per la fornitura di una flotta di autobus composta da un numero di veicoli sufficiente ad ottenere un ribasso del 10-20% sul prezzo di listino.

Tabella 15: Valori di riferimento dei costi di acquisto dei veicoli

			Costo al netto dell'IVA	Sconto
			[€/bus]	[%]
Elettrico	Mini	70 kWh	219.000	20%
	Midi	180 kWh	440.000	
	Full	160kWh	550.000	
	Articulated	90 kWh	650.000	
Diesel	Mini		129.000	10%
	Midi		220.000	
	Full		347.000	
	Articulated		479.000	
Metano	Mini		75.200	10%
	Midi		305.000	
	Full		439.000	
	Articulated		560.000	

Fonte: Elaborazione ENEA su varie fonti

Attualmente, la differenza di prezzo tra i veicoli elettrici e veicoli convenzionali giustificerebbe lo stanziamento di incentivi pubblici, considerando anche i lunghi tempi di ritorno dell'investimento. In futuro, tuttavia, si prevede che il gap possa ridursi grazie a maggiori economie di scala nella produzione di veicoli a batteria.

Contemporaneamente, dovrebbe ridursi il costo dell'accumulo di bordo. La chimica dell'accumulo di energia è in fervida e continua evoluzione, in particolare quella basata sugli ioni di litio, dominatrice incontrastata del segmento *storage* e trascinata in modo determinante dalla Cina. Questo interesse da parte dell'industria e della ricerca crea le basi per economie di scala e ritrovati tecnologici che consentono riduzioni dei costi maggiori di quelli previsti dalla maggior parte degli studi specializzati, anche del recente passato. Dal 2010 al 2015 il costo delle batterie si è ridotto con un tasso medio annuo dell'8% circa. Nel 2015, il costo di produzione delle batterie al litio per i leader del settore automotive elettrico, Tesla e Nissan, si è aggirato intorno ai 300 \$/kWh, raggiungendo così l'obiettivo che era stato posto dal Dipartimento dell'Energia degli

Stati Uniti per lo stesso anno; la GM statunitense ha dichiarato nel corso della conferenza annuale del 2015 di aspettarsi un costo di produzione di soli 145 \$/kWh nel 2016; il successivo traguardo è di 125 \$/kWh, da raggiungersi nel 2022 secondo il Dipartimento dell'Energia statunitense.

Il costo dei supercapacitori per unità di energia resa disponibile è molte volte più elevato di quello delle batterie di analoga funzione ma questi sistemi di accumulo presentano caratteristiche vantaggiose rispetto alla capacità di fornire potenza ed alla durabilità. La convenienza dei supercapacitori è rilevabile, per ora, solo nel lunghissimo periodo.

Nella seguente tabella (Tabella 16) si riportano i dati economici utilizzati per il calcolo degli investimenti in accumulo di bordo per i diversi casi esaminati.

Tabella 16: Costi unitari dei sistemi di accumulo di bordo

	Costo specif. batteria completa [€/kWh]	Costo specif. celle [€/kWh]	Sconto [%]
Litio FePo4	400	270	30%
SuperCap	15.000	10.000	10%

Nel caso delle batterie al litio, la riduzione di prezzo ipotizzata è da intendersi in relazione non solo a possibili economie di scala nell'acquisto ma anche in relazione all'evoluzione della produzione industriale attesa da qui a breve.

6.4.2 Acquisto ed installazione dell'infrastruttura di ricarica

Per il calcolo degli oneri di acquisto e installazione degli impianti di ricarica, si è impostato un algoritmo generale che considera la quota dei costi fissi e quella dei costi variabili in funzione della potenza di ricarica. Il semplice algoritmo di calcolo viene di seguito espresso in formule:

$$CS = ((W * CW) + (CF * I)) * (1 - sc)$$

dove:

- CS = costo complessivo della stazione di ricarica [€]
- W = potenza da installare [kW]
- CW = costo specifico in funzione della potenza [€/kW]
- CF = costi fissi di hardware e installazione [€/stazione]
- I = numero di impianti [n.]
- sc = sconto per economie di scala nell'acquisto e per evoluzioni di prodotto e di produzione [%]

I costi fissi comprendono sia il valore dei componenti dell'impianto indipendenti dalla potenza sia la manodopera necessaria all'installazione della stazione. Essi crescono in misura inversamente proporzionale ai tempi impiegati per realizzare la ricarica, in quanto per ricariche veloci si profila la necessità di introdurre una componentistica più sofisticata e complessa.

Il costo per unità di potenza installata, comprende il costo dell'hardware le cui dimensioni variano al variare della potenza dell'impianto (caricabatteria e altra componentistica) nonché il costo della manodopera necessaria per la realizzazione delle connessioni alla rete.

La precedente espressione si specializza in funzione della tipologia di impianto considerata e quindi se si tratti di un impianto utilizzato per la ricarica al deposito, al capolinea o alle fermate; in particolare, per gli impianti utilizzati per la ricarica al deposito, poiché, come visto in precedenza, viene determinato un valore di potenza in linea con l'offerta di mercato, l'espressione si semplifica eliminando il termine relativo ai costi variabili, che viene inglobato all'interno dei costi fissi. Negli altri casi, invece, poiché in generale il valore di potenza richiesto potrebbe non corrispondere ad un preciso prodotto sul mercato, si rende necessario utilizzare l'algoritmo nella sua forma completa.

I costi complessivi dell'intero sistema di ricarica saranno dati dalla somma dei costi di ogni tipologia di impianto, dove presente. Solo l'opzione che prevede la ricarica anche alle fermate, quindi, conterrà tutte le tipologie di infrastruttura.

La potenza complessiva ed il numero delle stazioni di ricarica per ogni tipologia di impianto sono forniti in output dai precedenti algoritmi.

Per completare il calcolo è però necessario stabilire i valori dei costi unitari fissi e variabili. A tal fine è stata consultata una vasta documentazione, oltre ad aver raccolto informazioni direttamente dai fornitori.

In particolare, uno studio del Rocky Mountain Institute del 2014²⁵ riporta i costi suddivisi per le varie voci di spesa per ogni classe di stazione di ricarica, come mostra Tabella 17: Voci di costo per le infrastrutture di ricarica secondo il RMI. Da questi valori si desume un costo medio di acquisto e installazione di una stazione di ricarica lenta di tipo domestico da circa 7 kW pari a \$ 1.200; il costo medio di una stazione di ricarica rapida in AC da circa 20 kW installata all'interno di spazi chiusi sarebbe pari a circa \$ 5.500, valore che scenderebbe a \$ 4.000 nel caso di acquisti multipli; una stazione di ricarica rapida della stessa tipologia precedente ma installata a bordo strada costerebbe circa \$ 9.000, prezzo che scenderebbe a \$ 5.800 nel caso fossero acquistate più unità; la stazione di ricarica veloce in DC, infine avrebbe un costo complessivo di \$ 60.000.

Tabella 17: Voci di costo per le infrastrutture di ricarica secondo il RMI

	Level 2 Home	Level 2 Parking Garage	Level 2 Curb-side	DC Fast Charging	Description/Key Assumptions
Charge station hardware	\$450-\$1,000	\$1,500-\$2,500	\$1,500-\$3,000	\$12,000-\$35,000	
Electrician Materials	\$50-\$150	\$210-\$510	\$150-\$300	\$300-\$600	<ul style="list-style-type: none"> • \$1.50-2.50/ft for conduit and wire, plus misc other materials • \$50-80/hour (per dist?) • \$500-1000 if new breaker is required • Assume 2x electrical cost for level 3 • \$25-100/ft for trenching/boring—depends on surface, soil, and underground complexity • Mounting, signage, protection, and restoration also included here, but don't usually contribute more than a few hundred dollars
Electrician Labor	\$100-\$350	\$1,240-\$2,940	\$800-\$1,500	\$1,600-\$3,000	
Other Materials		\$50-\$100	\$50-\$150	\$100-\$400	
Other Labor		\$250-\$750	\$2,500-\$7,500	\$5,000-\$15,000	
Transformer	NA	NA	NA	\$10,000-\$25,000	• 480V transformer installed by utility
Mobilization	\$50-\$200	\$250-\$500	\$250-\$500	\$600-\$1,200	<ul style="list-style-type: none"> • Home: 1-3 hours of electrician time for a home installation • Public: \$250-500 of time for 1-2 electricians and other labor. We found that the work could usually be completed in a single visit from each contractor.
Permitting	\$0-\$100	\$50-\$200	\$50-\$200	\$50-\$200	• Varies city to city, often a flat fee for one or several stations

Fonte: Rocky Mountain Institute

Riportando i valori precedenti in €, al tasso di cambio col dollaro statunitense del 2014 (circa 1,33 \$/€) si ottengono valori medi riportati nella successiva tabella.

Tabella 18: Costo medio in € 2014 delle infrastrutture di ricarica secondo il RMI

	Home level 2	Quick level 2 - parking	Quick level 2- curbside	Fast DC - curbside
Costo medio hardware	621	1.833	1.938	31.389
Costo medio lavoro	263	2.138	4.912	11.065
Costo totale medio	884	3.971	6.850	42.454

Fonte: Elaborazione ENEA su dati RMI

²⁵ Riferimento

Un altro studio, danese questa volta²⁶ ci mostra, nella Tabella 19, un costo di soli 500 € per una stazione di ricarica lenta da 7 kW con connettore di tipo 1 mentre quello di una stazione da 43/44 kW con connettore di tipo 2 si aggirerebbe intorno ai 2000 euro; infine un impianto di ricarica veloce in DC con connettore di tipo Chademo costerebbe € 25.000 per un range di potenza fra 20 e 50 kW.

Tabella 19: Costi di acquisto di stazioni di ricarica secondo DTU Electrical Engineering [€ 2013]

	Connector or outlet	DC power	AC power	Est. Price	Weight
Report EVSE	Conn. Type 2	-	43kW	2000 €	10kg
Bosch PowerMax	Conn. Type 1	-	7.2kW	500 €	9kg
RWE eSTATION SMART	Outlet Type 2	-	2x22kW	6000 €	42kg
RWE eBOX	Outlet Type 2	-	1x11kW	600 €	10kg
Electrodrive	Outlet Type 2	-	1x22kW	1000 €	5kg
Schneider EVLink	DC CHAdeMO	50kW	-	25000 €	600kg
ABB Terra 52	DC CHAdeMO Outlet Type 2	50kW	1x22kW	25000 €	600kg
Efacec QC50	DC CHAdeMO Outlet Type 2	50kW	1x43kW	25000 €	800kg
Eaton DCQC	DC CHAdeMO	20-50kW	-	25000 €	350kg

Fonte: DTU Electrical Engineering

In un articolo pubblicato su web nel 2012²⁷, a proposito dell'economicità delle stazioni di ricarica in grado di sfruttare l'inverter di bordo, per una stazione da 22 kW, si forniva un costo di circa 2.000 € (o meno) e per un impianto da 43 un valore di 3.500 €.

In un lavoro Enea dello stesso anno²⁸, si stimava un costo di acquisto pari a 5.000 euro per una stazione da 43 kW in AC e a 20.000 euro per una stazione da 50 kW in DC.

Infine, il listino prezzi della e-station, reperibile on-line, per impianti atti alla ricarica domestica, mostra valori variabili fra 630 e 645 € per potenze da 3,7 a 7,4 kW; il prezzo sale a circa 800 € per potenze da 11 a 22 kW.

Per le stazioni in AC, al costo delle stazioni con potenze maggiori ai 7 kW va aggiunto quello del caricabatteria con isolamento galvanico (200 €/kW) mentre per le potenze inferiori, il costo del caricabatteria è incluso nel prezzo del veicolo.

In un quadro generale, i costi delle stazioni di ricarica sembrano mostrare un trend in discesa che apre le possibilità di penetrazione dell'elettrificazione dei trasporti.

Componendo le informazioni acquisite dalle diverse fonti, ed estrapolando i dati mancanti, si fissano i valori riassunti nella seguente tabella e utilizzati dal modello per il calcolo degli investimenti per l'acquisto e l'installazione delle tipologie di impianto sin qui considerate.

Tabella 20: Costi di riferimento per acquisto e installazione di alcune tipologie di impianto di ricarica

Stazioni di Ricarica	Ricarica al deposito				Ricarica al capolinea	Ricarica al capolinea o fermate
	3,6 kW	7,2 kW	22 kW	43 kW	50 kW	200-600 kW
Costo Variabile (€/kW)		200 (caricabatteria con isolamento galvanico)			100	
Costo Fisso medio (stazione+installazione) (€)	650	650	2.000	2.000	25.000	70.000

Fonte: Elaborazione ENEA su dati di fonti varie

²⁶ J.S. Johansen, "Fast-charging electric vehicles using AC", DTU Electrical Engineering, 2013

²⁷ L.J. Masson, "Cheap EV Charging Station Arrive in Europe, Ottobre 2012

Per le stazioni di ricarica in CC, il costo del caricabatteria è incluso nel costo della stazione stessa. Circa gli impianti per la ricarica lampo da installarsi alle fermate o al capolinea, secondo l'ABB, che di recente ha avviato la produzione di un sistema idoneo a questo tipo di applicazione, attualmente, in mancanza di un mercato consolidato, il costo fisso si aggira attorno ai 70.000 €, valore comprensivo del pantografo con il quale viene realizzata la connessione con il veicolo; a tali costi fissi sono da aggiungersi i costi variabili con la potenza, il cui valore unitario sarebbe di circa 100 €/kW; tutto ciò considerato, il costo complessivo di una stazione da 200 kW per i rifornimenti al capolinea si attesterebbe sui 90.000 € mentre l'investimento per un impianto da 600 kW è stimato intorno ai 130.000 €.

Ipotizzando un acquisto minimo di due stazioni, lo studio del Rocky Mountain Institute ipotizza sconti commerciali variabili, nello specifico un risparmio del 5% nel caso della ricarica lenta mentre nel caso di quella rapida e veloce, un risparmio più corposo pari a circa i 2/5 del costo complessivo. Tale abbattimento del costo potrebbe essere giustificato nel caso di ordini di acquisto molto consistenti così come nella prospettiva che si creino delle economie di scala nella produzione industriale tali da consentire un ribasso dei costi.

6.5 Calcolo degli investimenti per rinnovo

Il modello di verifica economica, per ogni anno del periodo di analisi verifica se viene raggiunto il termine della vita tecnica di ciascuno dei fattori di produzione del servizio acquistati in conto capitale (veicoli, accumulo di bordo, impianti di ricarica) ed imputa, nel caso, il costo del rispettivo rinnovo dell'investimento all'anno in esame.

Ogni tecnologia è caratterizzata da una vita tecnica specifica, espressa in una certa unità di misura. Ad esempio, la vita tecnica dei bus si riporta in termini di km percorribili, quella dell'accumulo in termini di cicli di carica/scarica e quella delle stazioni di ricarica in termini di anni. Il modello calcola il numero di cambi che è necessario effettuare nell'anno *i*-esimo sulla base della durata tecnica e dell'utilizzo previsto, espresso nella stessa unità di misura dalla vita tecnica; se tale valore è diverso da zero, il modello imputa l'investimento necessario ad effettuare il numero di sostituzioni stimate.

Il processo logico per l'imputazione del costo all'anno *i*-esimo è riportato nella Figura 35.

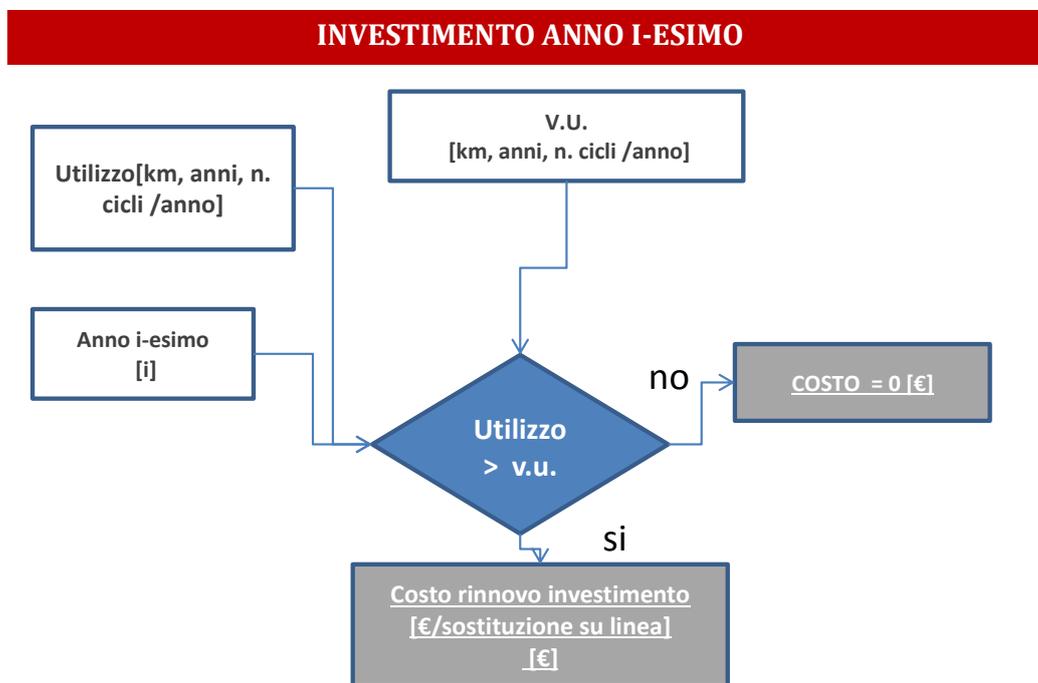


Figura 35: procedura per il calcolo degli investimenti per rinnovi

In pratica, per ogni fattore di produzione del servizio in conto capitale (veicoli, accumuli di bordo, infrastrutture di ricarica) si stima la frequenza annuale di sostituzione FS secondo la formula:

$$FS = UA/VU$$

dove UA rappresenta l'utilizzo medio annuale e VU è il limite di usura. Nel caso in cui il limite di usura sia espresso in numero di anni, il valore a numeratore è pari a 1.

Se risulta $FS < 1$ (meno di un cambio all'anno), per l'anno i -esimo si pone:

- 1 cambio se $UA * i > VU$
- 0 cambi altrimenti

Se, invece, risulta $FS \geq 1$ (almeno un cambio all'anno), per l'anno i -esimo il numero di cambi sarà calcolato come:

- $INF(FS * i) - INF(FS * (i-1))$

dove INF sta ad indicare l'intero inferiore dell'argomento in parentesi.

Una volta stabilito il numero di sostituzioni necessarie in un generico anno i -esimo, l'investimento relativo sarà dato dal prodotto di tale valore per il numero di elementi da sostituire per il costo unitario di ciascuno di essi.

Nel caso delle stazioni di ricarica, poiché la vita tecnica è espressa in anni, la procedura di calcolo di semplifica alquanto in quanto è sufficiente controllare se l'anno i -esimo corrisponde alle durata tecnica o ad un suo multiplo, per ciascuna delle configurazioni tecnologiche presenti nell'architettura di ricarica in esame, avendo assunto l'acquisto contemporaneo di tutti gli impianti all'anno zero.

Anche per i veicoli si assume il rinnovo completo della flotta al momento iniziale dell'analisi (anno zero) nonché un medesimo livello di utilizzo per ciascun esemplare della flotta, ragion per cui la sostituzione avverrà per tutti essi contemporaneamente. Poiché la vita utile dei veicoli si misura in termini di percorrenza, l'utilizzo annuale da utilizzarsi nel calcolo della frequenza di sostituzione dovrà essere espresso con lo stesso criterio. La percorrenza annuale di ogni veicolo è calcolata effettuando il rapporto fra la percorrenza complessiva lungo la linea in esame e il numero di veicoli componenti la flotta.

Nel caso di trazione elettrica, si stimano separatamente le necessità di rinnovo dell'accumulo di bordo; in generale, infatti, l'accumulo di bordo arriva ad usura ben prima del resto delle componenti veicolari e quindi, per esso si considerano un tasso ed un costo di sostituzione specifici, disgiunti da quello dei veicoli; in base a ciò, nel costo di sostituzione dei veicoli viene detratto il costo dell'accumulo, ipotizzando che l'accumulo residuo possa essere trasferito sui nuovi veicoli.

Un elemento di complessità della procedura di calcolo del numero di sostituzioni annuali dell'accumulo di bordo è rappresentato dal conteggio di numero di cicli di carica e scarica durante l'esercizio. Infatti, mentre nel caso di sola ricarica notturna al deposito si può considerare che l'accumulo subisca un ciclo di carica e scarica per ogni giornata di servizio del veicolo, nel caso di esercizio con ricarica rapida in servizio si pone il problema di come valutare il peso di scariche e ricariche parziali, quali quelle che avvengono in particolare approvvigionando i veicoli al capolinea. Si è visto in precedenza (vedi paragrafo 5.3) che per tale sistema si provvede a sovradimensionare l'accumulo di bordo proprio in relazione alla necessità di contenimento del degrado; in considerazione di ciò, piuttosto che assumere che ogni corsa rappresenti un ciclo di scarica e ricarica, si ipotizza che per questo tipo di esercizio il degrado sia k volte più veloce che nel caso di ricarica notturna. In questa sede, sulla base di esperienze maturate e maturande nei laboratori di test della batterie, si è ritenuto di porre $k=2$. Per la ricarica alle fermate, invece, ogni ricarica rappresenta effettivamente la chiusura di un ciclo, motivo per cui la stima dell'utilizzo annuale di un generico accumulo di bordo si deve calcolare il numero di ricariche effettuate mediamente da ogni veicolo nel periodo; la scelta di utilizzare supercondensatori per questo sistema di approvvigionamento si giustifica proprio in base alla loro durabilità rispetto alle frequenti operazioni di scarica e carica richieste.

La Tabella 21 mostra il valore della durata della vita tecnica ipotizzato per ciascuna tecnologia. Un autobus convenzionale può percorrere 600-700 mila km, la durata dei motori elettrici è maggiore di quelli a combustione interna, pertanto, si stima che un autobus elettrico possa raggiungere e superare il milione di km di percorrenza. La vita tecnica dell'accumulo differisce a seconda che si tratti di batterie al Litio o di

supercondensatori, nel primo caso la vita tecnica oscilla tra 1.000 – 2.000 cicli di carica/scarica²⁹, in funzione dell'intensità di carica e scarica rispetto alla capacità della batteria, nel secondo caso si ha un intervallo molto più lungo pari a circa 0,5-1 milione di cicli. Le stazioni di ricarica, indipendentemente dalla loro tipologia, si stima possano avere una vita tecnica durata di 15 anni.

Tabella 21: Vita tecnica delle tecnologie

Autobus	
<i>Alimentazione</i>	<i>km</i>
Elettrica	1.200.000
Gasolio	700.000
Metano	700.000
Accumulo di bordo	
<i>Tipologia</i>	<i>n. di cicli</i>
Li-io	2.000
Ultracaps	1.000.000
Stazioni di ricarica	
<i>Tipologia</i>	<i>n. anni</i>
Lenta, Rapida e ultrarapida	15

Fonte: Elaborazione ENEA

6.6 Calcolo dei valori residui

La procedura per il calcolo del valore residuo degli investimenti, avviene in due occasioni: al generico anno *i*-esimo, in caso di esaurimento della vita tecnica, e all'ultimo anno del periodo di analisi, al fine di computare eventuali valori positivi ancora in essere al momento della chiusura della valutazione economico-finanziaria, relativi alla possibilità di ulteriore utilizzo o di vendita dei fattori di produzione del servizio.

Nel caso di sostituzione in un anno intermedio del periodo di analisi, il valore residuo è stimato come frazione del valore d'acquisto.

Non è facile definire tale percentuale, in mancanza di analisi specifiche sul tema. Nel nostro modello, dovendo comunque fare delle assunzioni, si è ipotizzata una percentuale pari al 5% sia per i veicoli sia per gli impianti di ricarica.

Il valore a fine vita delle celle delle batterie è attualmente stimato intorno ai 150-200 €/kWh³⁰, nel prossimo futuro si prevede che questo valore possa scendere data la maggiore disponibilità di celle dismesse, per tale motivo nel modello è stato posto un valore di 100 €/kWh³¹. Tuttavia, la riduzione del valore delle batterie alla fine del primo ciclo di utilizzo corrisponde ad una generale riduzione di costo dei sistemi di accumulo, di cui pure si è tenuto conto nel modulo di calcolo. Per quanto riguarda i supercapacitori, il valore residuo a fine vita utile è da considerarsi nullo.

All'ultimo anno di analisi, il valore residuo è stimato proporzionalmente al rapporto fra vita residua e vita tecnica, considerando l'uso dall'anno di messa in esercizio sino a quel momento; inoltre, in caso in cui risultassero necessarie sostituzioni, si computa il valore residuo delle parti sostituite, come nel caso degli anni intermedi appena esaminato.

In generale, dunque, l'algoritmo per il calcolo del valore residuo all'ultimo anno di analisi prende la seguente forma matematica:

²⁹ <https://cleantechnica.com/2016/05/31/battery-lifetime-long-can-electric-vehicle-batteries-last/>

³⁰ <http://energystoragereport.info/the-second-life-threat-to-non-lithium-batteries/>

³¹ <http://energystoragereport.info/the-second-life-threat-to-non-lithium-batteries/>

$$VR = Q * VRU * (1 - sc) * [\inf(UA/VU * D) - \inf(UA/VU * (D - 1))] + \\ + Q * C * (1 - sc) * (1 - dec(UA * D/VU))$$

Dove:

- VR = valore residuo all'ultimo anno [€]
- Q = quantità da sostituire [q]
- VRU = valore unitario residuo a fine vita [€/q]
- C = costo unitario di acquisto [€/q]
- Sc = sconto sul costo d'acquisto [%]
- UA = utilizzazione media annua della tecnologia [km o cicli o anni]
- VU = vita utile della tecnologia [km o cicli o anni]
- D = durata del periodo di analisi [n. di anni]

e *dec* sta ad indicare la parte decimale dell'argomento nella relativa parentesi.

Il primo termine dell'espressione rappresenta il valore residuo delle eventuali sostituzioni nell'ultimo anno mentre il secondo termine rappresenta il valore residuo dei fattori ancora in esercizio a fine periodo di analisi.

Nel caso in cui la vita utile sia espressa in anni, come per gli impianti di ricarica, UA assume il valore unitario e l'espressione precedente si semplifica in:

$$VR = Q * VRU * (1 - sc) * \left[\inf\left(\frac{D}{VU}\right) - \inf\left(\frac{D - 1}{VU}\right) \right] + \\ + Q * C * (1 - sc) * (1 - dec(D/VU))$$

I valori di Vita Utile utilizzati nel modello sono stati esposti in precedenza mentre quelli del valore residuo unitario a fine vita sono contenuti nella seguente tabella.

Tabella 22: Valori residui dei fattori in conto capitale

	Valore unitario residuo a fine vita
Batterie Litio FePo4	1/3 del costo unitario di acquisto [%]
SuperCap	0
Veicoli	5% del costo unitario acquisto
Stazioni di ricarica	5% del costo unitario acquisto

6.7 Calcolo dei costi annuali di esercizio

Il costo di esercizio in generale comprende le voci relative all'operatività dei veicoli e quelle del personale di guida; nel nostro caso questa seconda voce è stata trascurata in quanto considerata invariante rispetto alle alternative progettuali esaminate.

Quanto ai costi operativi dei veicoli, essi comprendono le necessità di manutenzione ordinaria e straordinaria e quelle di alimentazione energetica. Nel caso della trazione elettrica bisogna considerare anche le necessità di manutenzione delle infrastrutture di ricarica.

La Figura 36 seguente illustra lo schema generale di calcolo dei costi annuali di esercizio nel caso più generale.

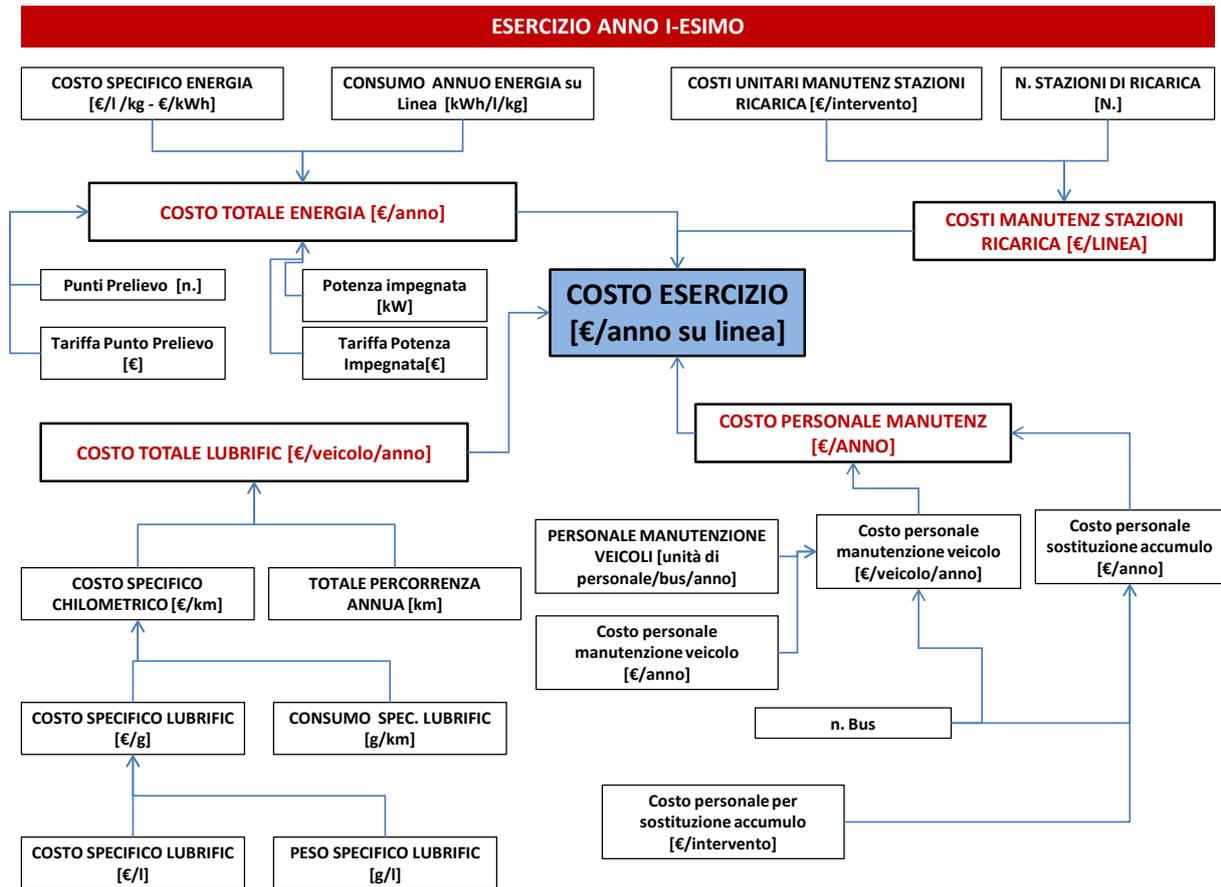


Figura 36: Schema di calcolo dei costi annuali di esercizio

6.7.1 Trazione

Il calcolo del costo per la trazione è molto semplice per quanto riguarda gli autobus convenzionali, risulta più complesso per gli autobus elettrici. Partendo dai primi, il modulo calcola la spesa energetica rapportando il consumo annuale della flotta, output di precedenti modelli, per il costo del vettore energetico al netto dell'iva.

$$C_e = CA * C_{Ue}$$

dove:

C_e = costo annuo del vettore energetico convenzionale [€]

CA = consumi annui di energia [litri, kg, kWh]

C_{Ue} = costo unitario del vettore energetico convenzionale [€/l, €/kg, €/kWh]

Nel caso del gasolio, poiché il consumo fornito da ECOTRIP è espresso in peso mentre il prezzo unitario è dato in €/litro, è necessario operare una conversione di unità di misura utilizzando il valore di densità di 0,86 kg/l.

Il prezzo per la fornitura di energia elettrica si presenta più complesso e articolato; infatti le componenti dell'onere elettrico si distinguono in tre categorie di costo: costi proporzionali al consumo di energia elettrica espressi in termini di €/kWh, costi proporzionali all'impegno di potenza richiesta al gestore della rete elettrica, espressi in €/kW, e costi proporzionali al numero di punti di prelievo necessari in funzione delle caratteristiche degli impianti di ricarica, della loro numerosità e distribuzione sul territorio. Di conseguenza, il calcolo della spesa relativa alla fornitura di energia elettrica richiede che al costo del vettore energetico si aggiungano i costi fissi per allacci e per potenza impegnata, calcolati come segue:

$$C_a = C_{Ua} * N_a$$

$$C_p = C_{Up} * P$$

dove:

- Ca = costo annuo per l'allaccio alle rete
- CUa = costo annuale per punto di allaccio [€/anno/punto prelievo]
- Na = numero punti di allaccio
- Cp = costo annuo per la potenza impegnata [€]
- CUp = costo annuo per unità di potenza impegnata [€/kW]
- P = potenza impegnata [kW]

Riguardo ai valori di prezzo, per il gasolio si è fatto riferimento al prezzo medio rilevato dal Ministero per lo Sviluppo Economico al 26/09/2016³² al netto dell'IVA e comprensivo della quota parte di accisa non rimborsata³³, ammonta a 0,94 €/litro. Per il metano si è fatto riferimento al prezzo medio di luglio 2016 come dichiarato da Assogasmetano³⁴, pari a 0,98 €/kg, da cui è stata detratta la quota relativa all'IVA (22%), ottenendo un prezzo netto di 0,81 €/kg. Al prezzo del combustibile sono da aggiungersi i costi di esercizio del rifornimento; nel caso del gasolio, molto spesso le Aziende di Trasporto Pubblico locale dispongono di propri impianti di erogazione che riducono al minimo tali costi; nel caso del metano, invece, dato l'esiguità della flotta veicolare, il più delle volte le aziende ricorrono ad un servizio di rifornimento operato da terzi, che andrà a pesare sul costo unitario del vettore energetico. Facendo riferimento al bando di gara per la fornitura di metano dell'azienda di Trasporto CTT NORD srl di Pisa, è stato stimato un aggravio dell'impegno di spesa pari a circa 0,2 €/km; tale valore, tuttavia, è sensibilmente dipendente dalle dimensioni dell'azienda e della flotta di veicoli alimentati a metano. Nel caso di grandi aziende che già dispongano di una consistente flotta di bus a metano, ad esempio, si può ipotizzare la disponibilità di strutture di rifornimento proprie, senza la necessità di fare ricorso a servizi acquistati da terzi.

Nel merito dei prezzi dell'energia elettrica, l'Autorità garante (AEEG) annualmente pubblica le tariffe da applicarsi nel triennio successivo³⁵. Nel caso in esame si è tenuto conto delle condizioni economiche praticate per i clienti non domestici. I costi sono ulteriormente diversificati a seconda che si richieda di essere connessi in bassa tensione (BT) e comunque con una potenza maggiore di 16kW (BT6), oppure in media tensione (MT). Per quest'ultima, inoltre, sono previsti costi diversi per le utenze a seconda del *range* di potenza impegnata, così caratterizzati: fino a 100 kW, da 100 kW a 500 kW e superiori a 500 kW. Il costo dell'energia elettrica, al netto della quota potenza e prelievo e degli oneri fiscali, è di 0,08 €/kWh se in Bassa Tensione (BT) e di 0,11 €/kWh se in Media Tensione (MT), a prescindere dalla potenza impegnata. Tale elemento è invece determinante nella determinazione dei prezzi degli allacci e dell'impegno di potenza. 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, elemento che invece pesa sul prezzo degli altri vettori energetici, in particolare sul gasolio, nonostante gli sgravi previsti nel caso di specie.

Nella Tabella 23 sono raccolti sinteticamente i dati sopra descritti.

³² Ministero dello Sviluppo Economico – Statistiche dell'energia -
http://dgsaie.mise.gov.it/dgerm/prezzi/italia/Prezzi_2016_09_26.xls

³³ Agenzia delle Dogane nota RU 37533 del 25/03/2016

³⁴ <http://www.assogasmetano.it/prezzo/prezzo-medio-luglio-2016/>

³⁵ <http://www.autorita.energia.it/it/prezzi.htm>

Tabella 23: Costi dei vettori energetici e dei servizi di somministrazione

Combustibili convenzionali			Energia elettrica				
	Diesel	Metano		Prelievo (€/punto prel.)	Potenza impegnata (€/kW)	Energia (€/kWh)	
						Consumi mensili fino a 8 GWh	Consumi mensili superiori a 8 GWh
Vettore energetico	0,94€/l	0.81€/kg	BT6	153,24	30,17	0,08	0,08
			MTA1	1.241,14	34,12	0,11	0,01
Servizio di rifornimento		0.2€/km	MTA2	1.196,25	30,64	0,11	0,01
			MTA3	1.182,59	26,88	0,11	0,01

Fonte: Elaborazione ENEA su dati MiSE, Assogasmetano, AEEG

6.7.1.1 Dimensionamento della potenza elettrica impegnata

Per potenza impegnata si intende la frazione della potenza installata per la quale l'utente richiede alla società di distribuzione dell'energia elettrica di avere garantito la disponibilità in qualsiasi momento. Per stabilire tale valore, è necessario determinare quali e quanti impianti ad alimentazione elettrica possano essere contemporaneamente utilizzati.

Per l'esercizio di una linea di trasporto pubblico, abbiamo già visto che gli impianti di ricarica si distribuiscono, in generale, al deposito, ai capolinea ed alle fermate. Nei primi due casi, con elevata probabilità le stazioni installate sono utilizzate tutte contemporaneamente, durante il ricovero notturno dei veicoli o durante le soste ai terminali fra una corsa e l'altra, per cui la potenza da impegnare coincide con la potenza complessivamente installata. Nel caso di ricarica alle fermate, invece, non è detto a priori che le stazioni siano contemporaneamente tutte impegnate; per evitare di incorrere in onerosi sovradimensionamenti della potenza da richiedere al gestore della rete è quindi opportuno fare ricorso ad un'analisi statistica che stabilisca la probabilità con cui un certo numero di veicoli siano contemporaneamente in fase di ricarica durante la corsa.

Detti:

- N il numero di veicoli contemporaneamente in corsa nell'ora di punta (Andata + Ritorno)
- R il numero di stazioni di ricarica presenti sulla linea p.s.m. (media dei due versi)
- t il tempo medio netto di ricarica alle fermate
- T il tempo di corsa nell'ora di punta

utilizzando le nozioni del calcolo delle probabilità, in particolare sul numero di combinazioni di N elementi a k e k (con k variabile fra 1 e N) e sulla probabilità composta, la probabilità che k veicoli siano contemporaneamente in ricarica si può scrivere nella forma seguente:

$$P(k) = \frac{N!}{K!(N-K)!} \cdot \left(\frac{R \cdot t}{T}\right)^k \cdot \left(\frac{T - R \cdot t}{T}\right)^{(N-k)}$$

dove:

- Il primo fattore rappresenta il numero di combinazioni di N veicoli a k a k

$$C_{N,K} = \frac{N!}{K!(N-K)!}$$

- il secondo fattore rappresenta la probabilità che k qualsiasi veicoli siano in fase di ricarica nello stesso istante t qualsiasi
- il terzo fattore rappresenta la probabilità che (N-k) veicoli qualsiasi non siano fase di ricarica nello stesso istante t qualsiasi

Si tratta ora di ricondurre le grandezze al caso di specie, di cui sono generalmente note le variabili riguardanti le caratteristiche del servizio come la lunghezza del percorso, la durata e la frequenza delle corse.

Quanto al numero di ricariche R che deve affrontare ogni veicolo durante una corsa, esso è pari al numero di impianti di ricarica necessari per assicurare il rifornimento di energia necessario ad ogni veicolo per effettuare il servizio desiderato, determinato nella fase precedente di progetto insieme al valore di potenza media di ciascuno di essi W .

Il tempo netto di ricarica t è anch'esso una grandezza progettuale, per la quale si fissa un valore di riferimento.

Il numero massimo di veicoli contemporaneamente in corsa sulla linea N può essere espresso in funzione della frequenza delle corse, o meglio dell'intervallo medio fra esse I , e del tempo di corsa T nell'ora di punta, secondo la semplice equazione:

$$N = 2 * [\text{Inf}(T/I) + 1]$$

dove il fattore 2 sta a considerare il servizio effettuato nei due sensi di marcia, a meno che non si tratti di una linea circolare. In base a quest'ultima posizione, l'espressione della probabilità $P(k)$ per una linea non circolare diventa:

$$P(k) = \frac{2 * [\text{inf}(T/I) + 1]!}{k! * 2 * [\text{inf}(T/I) + 1 - k]!} * \left(\frac{R}{T} * t\right)^k * \left(1 - \frac{R}{T} * t\right)^{[2 * \text{inf}(T/I) + 1 - k]}$$

Fissato k , ossia il valore delle ricariche contemporanee, per ogni caso di specie sono note tutte le altre variabili indipendenti (R , T , t , I) che determinano il valore di $P(k)$.

Si osserva che la funzione di probabilità in studio è essenzialmente dipendente da variabili temporali: il tempo di corsa T , l'intervallo medio fra corse, il rapporto T/R che è una proxy dell'intervallo medio fra ricariche. Si osserva altresì che T e R non sono indipendenti fra loro in quanto:

$$R = \text{Arrotonda}(L/d - 1)$$

dove L rappresenta la lunghezza del percorso della linea e d la distanza media fra due stazioni di ricarica consecutive; essendo inoltre notoriamente $L = V * T$, dove V rappresenta la velocità commerciale media nell'ora di punta, quando V sia espressa in km/h e T sia espresso in minuti, R risulta essere:

$$R = \text{Arrotonda}[V * (T/60) / d - 1]$$

Le variabili indipendenti che determinano il valore di $P(k)$ passano allora da quattro a cinque: V , d , T , t e I .

Obiettivo dell'analisi è di individuare per ogni combinazione possibile delle variabili indipendenti il valore più elevato di k (numero di ricariche contemporanee) per il quale la probabilità risulti al di sotto di un limite massimo prefissato (ad es. 1%). Per arrivare a questo risultato si analizza l'andamento della funzione di probabilità $P(k)$ al variare delle variabili indipendenti all'interno di intervalli realistici.

Nella fattispecie si assume che:

- la velocità commerciale vari fra 5 e 50 km/h
- il tempo di corsa T si ponga fra 10' e 80';
- la frequenza delle corse nell'ora di punta, o meglio l'intervallo medio fra di esse I , vari fra 5' e 30'.
- il tempo netto di ricarica alle fermate t possa variare fra 10'' e 15''

Inoltre si impone che la lunghezza del percorso non possa essere inferiore a 2 km ne' superiore a 20 km e che la distanza media fra stazioni di ricarica oscilli fra 0,5 e 3,0 km; ciò implica che il numero di stazioni di ricarica R lungo un percorso possa variare da un minimo di 1 a un massimo di 39.

Se si discretizzassero i valori di T, l e t con cadenza di 5', quelli di V con cadenza di 5 km/h e quelli di d con cadenza di 0,5 km, lo studio di P(k) richiederebbe il calcolo di 1800 valori per ogni combinazione [R, k] possibile. Eliminando la variazione di t lo studio riguarderebbe 900 punti per ogni [R, k].

In realtà molte combinazioni delle variabili indipendenti risultano incompatibili in relazione ai range di variabilità stabiliti. Si osservi, ad esempio, nella seguente tabella, le combinazioni effettivamente possibili per la terna [T, V, d] in funzione dei limiti imposti sulla lunghezza della corsa L e, per ogni combinazione possibile, quale valore assuma R, se ammissibile (positivo).

Tabella 24: Valori ammissibili del numero di stazioni di ricarica R al variare di [T, V, d]

T= 10'

Velocità V [km/h]	Distanza media fra ricariche d [km]				
	1	1,5	2	2,5	3
5	V non compatibile con T per L (< 2 km)				
10					
20	2	1	1	R non ammissibile	
30	4	2	2	1	1
40	6	3	2	2	1
50	7	5	3	2	2

n° valori ammissibili di R 7

T=20'

Velocità V [km/h]	Distanza media fra ricariche d [km]				
	1	1,5	2	2,5	3
5	V non compatibile con T per L (< 2 km)				
10	2	1	1	R non ammissibile	
20	6	3	2	2	1
30	9	6	4	3	2
40	12	8	6	4	3
50	16	10	7	6	5

n° valori ammissibili di R 12

T=30'

Velocità V [km/h]	Distanza media fra ricariche d [km]				
	1	1,5	2	2,5	3
5	2	1	R non ammissibile		
10	4	2	2	1	1
20	9	6	4	3	2
30	14	9	7	5	4
40	19	12	9	7	6
50	V non compatibile con T per L (> 20 km)				

n° valori ammissibili di R 11

T=40'

Velocità V [km/h]	Distanza media fra ricariche d [km]				
	1	1,5	2	2,5	3
5	2	1	1	R non ammissibile	
10	6	3	2	2	1
20	12	8	6	4	3
30	19	12	9	7	6
40	V non compatibile con T per L (> 20 km)				
50					

n° valori ammissibili di R 10

T= 50'

Velocità V [km/h]	Distanza media fra ricariche d [km]				
	1	1,5	2	2,5	3
5	3	2	1	1	R n.a.
10	7	5	3	2	2
20	16	10	7	6	5
30	V non compatibile con T per L (> 20 km)				
40					
50					

T= 60'

Velocità V [km/h]	Distanza media fra ricariche d [km]				
	1	1,5	2	2,5	3
5	4	2	2	1	1
10	9	6	4	3	2
20	19	12	9	7	6
30	V non compatibile con T per L (> 20 km)				
40					
50					

n° valori ammissibili di R

8

n° valori ammissibili di R

9

T= 70'

Velocità V [km/h]	Distanza media fra ricariche d [km]				
	1	1,5	2	2,5	3
5	5	3	2	1	1
10	11	7	5	4	3
20	V non compatibile con T per L (> 20 km)				
30					
40					
50					

n° valori ammissibili di R

7

T= 80'

Velocità V [km/h]	Distanza media fra ricariche d [km]				
	1	1,5	2	2,5	3
5	6	3	2	2	1
10	12	8	6	4	3
20	V non compatibile con T per L (> 20 km)				
30					
40					
50					

n° valori ammissibili di R

7

In realtà, lo studio della funzione $P(k)$ si semplifica grandemente introducendo le variabili ausiliarie $X1 = \inf(T/l)+1$ e $X2 = T/R$, che rappresentano rispettivamente il numero massimo di veicoli in corsa p.s.m. e l'intertempo medio fra due successive ricariche di uno stesso veicolo (proxy).

$X1$ assume i valori tabellati di seguito, sulla base della discretizzazione stabilita per T e l .

Tabella 25: N° massimo di veicoli contemporaneamente in corsa p.s.m. in funzione delle variabili di base

Intertempo fra corse l [minuti]	Tempo di corsa T [minuti]															
	10	15	20	25	30	25	40	45	50	55	60	65	70	75	80	
5	3	4	5	6	7	6	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
10	2	2	3	3	4	3	5	5	6	6	7	7	8	8	9	
15	1	2	2	2	3	2	3	4	4	4	5	5	5	6	6	
20	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5	
25	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	
30	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	

Si osserva una certa ricorrenza di valori di $X1$, per cui, eliminando le ripetizioni, evidenziate in giallo, nello studio di $P(k)$ possono essere presi in esame 17 casi (rispetto alle 90 combinazioni originarie di T ed l).

Quanto a $X2$, si osserva che essa può essere scritta anche come d/V , per cui se ne studia la variabilità in funzione di queste due ultime grandezze, come riportato nella seguente Tabella 26.

Tabella 26: Intertempo fra successive ricariche [min.] in funzione della distanza media fra stazioni di ricarica d e della velocità media V

d [km]	V [km/h]									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0,5	6,00	3,00	2,00	1,50	1,20	1,00	0,86	0,75	0,67	0,60
1	12,00	6,00	4,00	3,00	2,40	2,00	1,71	1,50	1,33	1,20
1,5	18,00	9,00	6,00	4,50	3,60	3,00	2,57	2,25	2,00	1,80

2	24,00	12,00	8,00	6,00	4,80	4,00	3,43	3,00	2,67	2,40
2,5	30,00	15,00	10,00	7,50	6,00	5,00	4,29	3,75	3,33	3,00
3	36,00	18,00	12,00	9,00	7,20	6,00	5,14	4,50	4,00	3,60

Anche in questo caso si verifica una certa ricorrenza dei valori al variare delle grandezze primarie (in giallo valori ripetuti), per cui si contano solo 38 valori effettivi sulle 60 possibili combinazioni.

In sostanza, in base alla discretizzazione stabilita ed ai limiti imposti, per ogni valore del tempo netto di ricarica t , lo studio di $P(k)$ può limitarsi a 646 coppie $[X1;X2]$.

Dallo studio della funzione emerge che, imponendo che la potenza impegnata sia dimensionata per il numero massimo di ricariche contemporanee la cui probabilità non superi l'1%, i coefficienti da applicare al valore della potenza media di un impianto di ricarica W per ottenere il valore di potenza da impegnare presso la società di distribuzione dell'energia elettrica sono quelli riportati nella Tabella 27 per il caso di una linea non circolare e quelli contenuti nella Tabella 28 nel caso di linea circolare.

Tabella 27: Coefficiente moltiplicativo per la determinazione della potenza impegnata in funzione delle variabili di base nel caso di linee non circolari

		X2, rapporto T/R = d/V [minuti]																																										
X1, (N. veic in corsa psm)		0,6	0,67	0,75	0,86	1	1,2	1,33	1,5	1,71	1,8	2	2,25	2,4	2,57	2,67	3	3,33	3,43	3,6	3,75	4	4,29	4,5	4,8	5	5,14	6	7,2	7,5	8	9	10	12	15	18	24	30	36					
	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
2	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
3	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	7	6	6	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	
5	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
6	9	8	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
7	10	9	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
8	11	10	10	9	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
9	12	11	11	10	9	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
10	13	12	11	10	9	8	8	7	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1
11	14	13	12	11	10	9	8	8	7	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1
12	15	14	13	12	11	10	9	8	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
13	16	15	14	13	12	10	10	9	8	8	7	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
14	17	16	15	14	12	11	10	9	9	8	8	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
15	18	17	16	14	13	11	11	10	9	9	8	8	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
16	19	18	17	15	13	12	11	10	9	9	8	8	8	7	7	7	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
17	20	19	17	16	14	12	12	11	10	9	9	8	8	8	7	7	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2

Tabella 28: Coefficiente moltiplicativo per la determinazione della potenza impegnata in funzione delle variabili di base nel caso di linee circolari

		X2, rapporto T/R = d/V [minuti]																																													
X1 (N. veic. in corsa psm)		0,6	0,67	0,75	0,86	1	1,2	1,33	1,5	1,71	1,8	2	2,25	2,4	2,57	2,67	3	3,33	3,43	3,6	3,75	4	4,29	4,5	4,8	5	5,14	6	7,2	7,5	8	9	10	12	15	18	24	30	36								
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
6	5	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
8	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1			
9	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1			
10	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1			
11	8	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1			
12	9	8	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1		
13	9	9	8	8	7	6	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1		
14	10	9	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	
15	11	10	9	8	8	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
16	11	10	10	9	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
17	12	11	10	9	8	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1

Si osserva che nella maggioranza dei casi il coefficiente da applicare per determinare il valore della potenza impegnata rientra nell'ordine delle unità; ciò avviene certamente nei casi più frequentemente attesi, evidenziati con sfondo blu nelle tabelle.

Le tabelle esposte in precedenza sono state incluse nei dati di input del DSS; per il loro pratico impiego, si è stabilito, in ottemperanza al criterio di prudenza, di utilizzare come valori di ingresso delle variabili X1 e X2 quelli che approssimano per difetto i valori calcolati per il caso di studio.

6.7.2 Manutenzione

Nei costi di manutenzione sono contemplati i costi del materiale e del personale di manutenzione; fra il materiale di ricambio, nel caso di motorizzazione a combustione interna, l'olio lubrificante merita una speciale considerazione mentre nello scenario di elettrificazione occorre tenere conto della frequenza con cui avvengono i cambi della batteria e anche riconoscere un valore per la manutenzione delle stazioni di ricarica. Di seguito la procedura per il calcolo del costo annuo per il consumo di **olio lubrificante in base ai dati disponibili**.

$$C_{lub} = CS_{lub} * \frac{CU_{lub}}{PS_{lub}} * Pa$$

- C_{lub} = costo annuo del consumo di olio lubrificante [€]
- CS_{lub} = consumo specifico di olio lubrificante [g/km]
- CU_{lub} = costo specifico olio lubrificante [€/l]
- PS_{lub} = peso specifico olio lubrificante [g/l]
- Pa = percorrenza annua su linea [km]

Il consumo specifico di olio lubrificante [g/km] varia a seconda che il parco sia costituito da autobus con alimentazione convenzionale o con energia elettrica. Il consumo specifico per i bus a gasolio e a metano si assume essere uguale a 1,25 g/km mentre per quelli elettrici si considera nullo.

Per quanto riguarda i costi annui di **manutenzione**, la formula utilizzata per il calcolo dei costi di personali è la seguente:

$$C_p = ((C_{Up} * U_p) + C_s) * F + C_{pr_{d,c,f}}$$

- C_p = Costo annuale del personale di manutenzione [€/anno]
- C_{Up} = costo contrattuale annuo del personale di manutenzione [€]
- U_p = unità di personale di manutenzione veicoli [unità/bus]
- $C_{pr_{d,c,f}}$ = costo annuale personale manutenzione stazione di ricarica [€/anno]
- F = numerosità della flotta [n. veicoli]
- C_s = costo sostituzione accumulo

dove la variabile C_{pr} è calcolata secondo l'algoritmo esposto di seguito.

$$C_{pr_{d,c,f}} = \frac{C_{r_{d,c,f}}}{I_{r_{d,c,f}}} * I_{d,c,f}$$

- $C_{r_{d,c,f}}$ = costo per intervento di manutenzione delle stazioni di ricarica [€/intervento]
- $I_{r_{d,c,f}}$ = intervallo temporale interventi sulle stazioni di ricarica [n. anni]
- $I_{d,c,f}$ = numero di impianti al deposito, al capolinea, alla fermata [n.]

Per il calcolo dei costi per l'acquisto dei materiali necessari alla manutenzione, escluso l'olio lubrificante, la formula applicata è la seguente:

$$C_m = C_{Um} * Pa * F$$

- C_m = costo annuale del materiale di manutenzione [€/flotta]

- CUm = costo unitario materiale di manutenzione [€/km]
 Pa = percorrenza media annua [km/veicolo]
 F = numerosità della flotta [n. veicoli]

Per i costi operativi unitari connessi all'impiego di lubrificanti e alla manutenzione del bus a gasolio, si è fatto riferimento ai valori unitari, nello specifico riferiti alla classe dimensionale "full" utilizzata per il calcolo dei consumi di riferimento, forniti da ASSTRA³⁶ e al costo tabellare annuo del personale di manutenzione in base alla contrattazione di primo livello (CCNL 2012). Sulla base di questi e incrociando i dati con l'esperienza maturata all'interno di ENEA, sono stati ipotizzati dei rapporti di proporzionalità da cui sono scaturiti i valori unitari per le altre categorie dimensionali. In particolare, si assume che gli autobus con classe dimensionale *Mini* e *Midi*, abbiano dei valori inferiori del 20% rispetto a quelli della classe di riferimento, mentre quelli degli *Articulated* si è assunto possano essere maggiori del 20%. Ottenuti questi valori unitari per l'autobus a gasolio, si sono operate delle assunzioni per le rispettive classi dimensionali delle altre due alimentazioni, elettrica e a metano, riassunti nella Tabella 29. Il costo di manutenzione per un autobus a metano risulta essere più onerosa per il personale³⁷ e meno per il materiale di sostituzione³⁸.

I costi di manutenzione dell'autobus elettrico sono indubbiamente inferiori rispetto a quelli di un autobus convenzionale, nello specifico il costo del personale di manutenzione è stato posto pari ad 2/5 di quello per il diesel ed il costo del materiale pari a 1/2. Occorre considerare, inoltre, i costi del personale per la sostituzione periodica dell'accumulo e per la manutenzione delle stazioni di ricarica. Il primo è stato calcolato in base al costo orario del personale, ottenuto dividendo il costo contrattuale annuo per le ore di lavoro annue (1.680 ore) e ipotizzando un tempo pari ad una ora per operare la sostituzione della batteria.

Tabella 29: Valori unitari di manutenzione

		Unità personale di manutenzione	Costo unitari del materiale di manutenzione	Costi sostituzione accumulo	Consumo di lubrificante
		<i>unità/veicolo /anno</i>	<i>[€/km]</i>	<i>€/intervento</i>	<i>[g/km]</i>
Elettrico	Mini	0,06	0,06	20	0,0
	Midi	0,06	0,06	20	0,0
	Full	0,08	0,08	20	0,0
	Articulated	0,10	0,09	20	0,0
Diesel	Mini	0,15	0,12	-	1,25
	Midi	0,15	0,12	-	1,25
	Full	0,20	0,15	-	1,25
	Articulated	0,25	0,18	-	1,25
Metano	Mini	0,18	0,10	-	1,25
	Midi	0,18	0,10	-	1,25
	Full	0,24	0,12	-	1,25
	Articulated	0,30	0,14	-	1,25

Fonte: Elaborazione ENEA su varie fonti

Il costo della manutenzione delle stazioni di ricarica, in alcuni studi, viene quantificato pari ad una percentuale del 10% del costo di installazione, tuttavia in una ricerca del 2012³⁹, si afferma che essendo il costo di

³⁶ Commissione ASSTRA costi standard automobilistici "Un modello di calcolo del costo standard per il trasporto pubblico locale e regionale automobilistico", Roma 3 luglio 2013

³⁷ <http://www.metauto.it/con-gli-autobus-a-gas-il-mercato-si-riaccende/>

³⁸ Viaggiare a metano conviene? - Università degli Studi del Piemonte Orientale Facoltà di scienze politiche, 2004

³⁹ Luskin Center for Innovation, "Financial Viability of non-residential electric vehicle charging stations", 2012

installazione fortemente variabile, potrebbe determinare dei valori irragionevolmente troppo elevati, sicché viene suggerito di applicare detta percentuale, al costo del materiale utilizzato (infrastruttura). Lo stesso criterio viene indicato in un'analisi tedesca coeva⁴⁰.

Ulteriormente, si è ritenuto necessario desumere il costo fisso del solo materiale, assumendo che questo fosse pari al 50% del costo complessivo delle stazioni di 7 kW e al 60% del costo delle stazioni da 22 e 43 kW, sulla base delle indicazioni dello studio del Rocky Mountain Institute già precedentemente citato (par. 6.4.2). Per le stazioni in DC il costo del materiale è stato assunto pari al 60% del costo fisso della stazione da 50 kW e pari all'80% del costo fisso per le stazione ultrafast. A tali valori è stata poi applicata la percentuale del 10% ottenendo i risultati mostrati in Tabella 30 da cui si evince un'ampia variabilità dei costi annuali di manutenzione delle infrastrutture di ricarica, che oscillerebbero tra i 100 € per le stazioni di ricarica lenta ed i 5.500 € per quelle ultraveloci, sulle quali incide la presenza del pantografo.

Tabella 30: Valori indicativi del costo di manutenzione delle stazioni di ricarica

Tipo impianto	Ubicazione	Costo fisso complessivo €/impianto	Costo materiale €/impianto	Costi di manutenzione €/anno/impianto
3,6-7,2 kW AC	Deposito	2.000	1.000	100
11-22kW AC	Deposito	6.400	3.500	350
43 kW AC	Deposito	10.600	6.000	600
50 kW DC	Capolinea	25.000	15.000	1.500
200-600 kW DC	Capolinea/fermate	70.000	55.000	5.500

Fonte: Elaborazione ENEA

6.8 Confronto economico delle alternative

La procedura della valutazione economico-finanziaria si conclude con l'operazione di attualizzazione al momento iniziale dell'analisi (anno zero) e di somma delle singole voci di costo sopra descritte, imputate per ogni anno del periodo considerato.

Per attualizzare un valore economico relativo ad un determinato anno i -esimo è necessario utilizzare il valore del tasso di sconto t fissato in precedenza.

Il VAN complessivo sarà dato da:

$$VAN = I_0 + \sum_{i=0}^D \frac{(C_i - R_i)}{(1 + t)^i}$$

dove:

- I_0 = investimento all'anno zero
- C_i = voci di costo all'anno i -esimo
- R_i = rientri all'anno i -esimo
- D = durata del periodo di analisi
- t = tasso di sconto

Generalmente, si ritiene conveniente operare l'investimento quando il risultato del VAN è ≥ 0 . In questo caso, avendo operato solo sugli investimenti e le relative voci di costo operativo e avendo ritenute invariati gli effetti della tre voci economico-finanziaria, si otterranno in tutti i casi dei risultati negativi. Ne deriva che la scelta dovrebbe cadere sulla soluzione tecnologica con un VAN meno negativo rispetto agli altri.

⁴⁰ A. Schroeder, T. Traber, "The Economics of Fast Charging Infrastructure for Electric vehicles", in Energy Policy 43 (2012), 136-144

7 Il modello per il calcolo dei costi esterni

7.1 Generalità

I trasporti generano una serie di esternalità che impattano sulla collettività indistinta, senza però, che i relativi costi siano sostenuti dal singolo individuo che effettua un viaggio; obiettivo di questa parte del modello è il confronto del danno sociale provocato dalla realizzazione di un servizio di trasporto pubblico locale, nelle varie ipotesi di alimentazione prese in esame.

Le esternalità considerate nel modello fanno riferimento alle emissioni in atmosfera di inquinanti e di gas serra e alle emissioni acustiche, mentre congestione e sicurezza non sono state prese in esame in quanto ritenute invariabili nei diversi scenari tecnologici. Nello specifico, gli inquinanti esaminati sono il particolato sottile (PM₁₀), gli ossidi di azoto (NO_x), gli ossidi di zolfo (SO₂) e i composti organici volatili non-metanici (NMVOC) mentre i gas-serra presi in esame sono l'anidride carbonica (CO₂) e il metano (CH₄), trascurando il protossido di azoto (N₂O), considerate le esigue emissioni.

I costi esterni legati alle emissioni nocive (inquinanti atmosferici e gas serra), vengono calcolati sia con riferimento al momento d'uso dei veicoli, nella così detta fase Tank to Wheel (TtW), ossia dal serbatoio alla ruota, sia con riferimento alle fasi di produzione e distribuzione dell'energia, nella così detta fase Well to Tank (WtT), ossia dal pozzo al serbatoio. Quest'ultima fase si scompone in due sottofasi: la prima nota, come Well to Processing (WtP), comprende l'estrazione (up-stream) e il trasporto del combustibile fino al primo processo di lavorazione, quindi va dal pozzo all'impianto di raffinazione o alla centrale elettrica; la seconda, nota come Processing to Tank (PtT), interessa la fase successiva, ossia dalla raffineria o dalla centrale elettrica sino al sistema di stoccaggio a bordo del veicolo (down-stream). In questo lavoro, è stata esclusa la stima dei danni prodotti nella fase WtP in quanto spesso estranea al contesto nazionale.

Esiste una ampia varietà di metodologie che possono essere utilizzate per la stima dei costi esterni, nessuna delle quali è riconosciuta universalmente valida ed alcune sono in contraddizione con altre. Tuttavia, si ritiene opportuno effettuare una valutazione seppur approssimativa e controversa piuttosto che rinunciare del tutto alla quantificazione del danno sociale.

Fra la vasta letteratura, l'ultimo Manuale sui costi esterni dei trasporti del 2014⁴¹ commissionato della Commissione Europea fornisce valori di riferimento elaborati sulla base di numerose ricerche e che vengono pertanto applicati nel presente modello.

Secondo queste recenti stime europee il danno prodotto dal trasporto terrestre, per unità di tonnellata emessa, relativamente a ciascuno degli inquinanti considerati in questa sede, è riconducibile, per l'Italia, ai valori riportati nella seguente Tabella 31.

Tabella 31: Costi esterni unitari dei principali inquinanti del trasporto terrestre in Italia (€/tonn.)

Inquinante	Ambito	Valore €2010/t
CO ₂	tutti	90
PM 2.5	urbano	197.361
PM 2.5	suburbano	50.121
PM 2.5	rurale	24.562
NO _x	tutti	10.824
VOC	tutti	1.242
SO ₂	tutti	9.875

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

Si osservi che per il PM viene considerata solo la frazione più fine, quella al di sotto dei 2,5 µ; essa tuttavia rappresenta la quota prevalente delle polveri di dimensioni inferiori ai 10 µ, fornite in output dal modello di calcolo dei consumi e delle emissioni nocive in atmosfera interno al DSS, per cui non si commette un'eccessiva sovrastima applicando i valori unitari di danno della frazione ultrasottile al totale delle polveri sottili.

⁴¹ Update of the Handbook on External Costs of Transport, Gennaio 2014

Il valore del danno provocato dalle emissioni inquinanti è generalmente diversificato in funzione della sensibilità del contesto in cui si verifica l'emissione. Ciò diventa particolarmente vero per il particolato, che si concentra nel luogo di emissione senza diffondersi troppo nell'atmosfera e produce danni diretti alla salute degli esseri viventi 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.

Il valore di costo unitario della CO₂ si applica anche alle emissioni degli altri gas serra emessi dai veicoli stradali espresse in CO₂ equivalente. Il calcolo delle emissioni di metano (CH₄) parte dalle emissioni totali di tutti gli idrocarburi (HC) fornite da ECOTRIP, assumendo un'incidenza del 10% nel caso del diesel e del 90% nel caso del metano; ogni unità di peso di tali emissioni, inoltre, viene moltiplicata per 26, il valore del potere climalterante del metano rispetto alla CO₂ secondo le ultime valutazioni dell'IPCC, il Panel Intergovernativo sui cambiamenti climatici.

Per il calcolo del danno da rumore, il Manual Europeo fornisce i costi per unità di percorrenza in funzione della tipologia veicolare nei diversi periodi del giorno e condizioni di traffico; la Tabella 32 riporta i valori relativi ai veicoli pesanti alimentati a gasolio. Si nota che, anche in questo caso, gli impatti in ambito urbano sono decisamente più importanti rispetto a quelli rilevati nelle altre aree a causa della maggiore sensibilità del contesto. Inoltre, i valori sono maggiori in caso di traffico scorrevole, in quanto, a maggiori velocità corrispondono maggiori emissioni acustiche.

Tabella 32: Costi specifici del rumore nelle diverse fasce orarie e condizioni di traffico

	Diurno traffico denso	Diurno traffico scorrevole	Notturmo traffico denso	Notturmo traffico scorrevole
	[€/1000vkm]			
Urban	44	107	80,3	194,7
Suburban	2,4	6,8	4,5	12,7
Rural	0,4	0,8	0,7	1,5

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

La rumorosità dell'autobus diesel è la più alta tra quella delle varie alternative tecnologiche prese in esame nel DSS: un Euro 0 ha un fattore emissivo superiore a 82 dB, mentre la normativa attuale limita il rumore dei veicoli più potenti a 80 dB. L'autobus a metano è più silenzioso dell'omologo diesel, riuscendo ad abbattere il rumore di 3-5 dB rispetto a quest'ultimo. Tale riduzione, corrisponde ad un abbattimento pari alla metà del rumore percepito.

Per quanto riguarda l'autobus elettrico, l'unica componente significativa è quella del rumore da rotolamento che dipende dal tipo di pneumatico montato e dalla rugosità della superficie stradale, ossia da fattori indipendenti dal tipo di alimentazione e di motore; si ritiene plausibile attribuire ai veicoli elettrici un abbattimento pari ai $\frac{3}{4}$ del rumore percepito prodotto da analoghi bus a gasolio.

Lo schema riportato nella Figura 37: Flow chart calcolo dei costi esterni illustra la procedura utilizzata per il calcolo delle esternalità prese in esame in funzione dei valori forniti dal Manuale Europeo e dei dati di progetto disponibili. Si osservi che il calcolo del danno prodotto dalle emissioni nocive al punto d'uso attiene solo ai veicoli a combustione interna mentre quello per la fase di produzione del vettore energetico riguarda anche i bus elettrici.

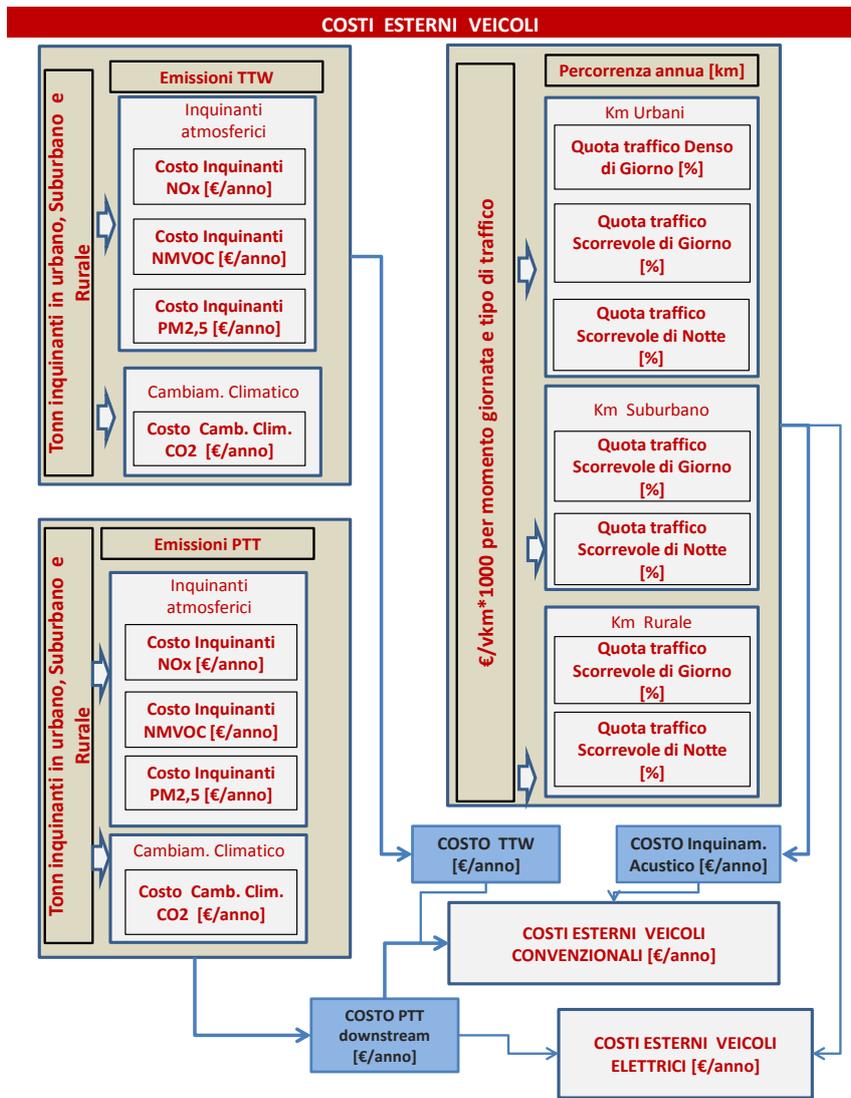


Figura 37: Flow chart calcolo dei costi esterni
 Fonte: Elaborazione ENEA

Una volta calcolati tutti i costi esterni con cadenza annuale, si procederà alla loro attualizzazione così da poter operare il confronto fra le varie alternative tecnologiche del totale risultante.

7.2 Calcolo dei costi esterni delle emissioni nocive in atmosfera

7.2.1 Emissioni TTW (al punto d'uso)

Gli impatti delle emissioni nocive generate in fase di esercizio del veicolo sono connessi ai soli autobus a combustione interna.

Nel caso dei veicoli a gasolio, le sostanze inquinanti più rilevanti sono le polveri sottili (PM₁₀) e gli ossidi di azoto (NO_x), 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).

Per quanto riguarda gli autobus a metano, occorre sottolineare il peso delle emissioni ad effetto serra, dovute all'elevata componente di CH₄, un gas il cui potere climalterante è circa trenta volte più elevato di quello dell'anidride carbonica.

A solo titolo indicativo, nei grafici seguenti si riportano i valori di emissione specifica forniti da ISPRA per autobus urbani a gasolio di standard emissivo EURO VI e a metano di standard emissivo EEV. Saltano agli occhi le grandi differenze nelle emissioni di ossidi di azoto e di metano, entrambe a svantaggio del metano; nel caso dell'azoto, la differenza è da attribuirsi agli effetti di una più stringente regolamentazione delle emissioni dei veicoli a gasolio, sebbene le vicende del diesel gate abbiano gettato un'ombra sulla reale efficacia di tale regolamentazione.

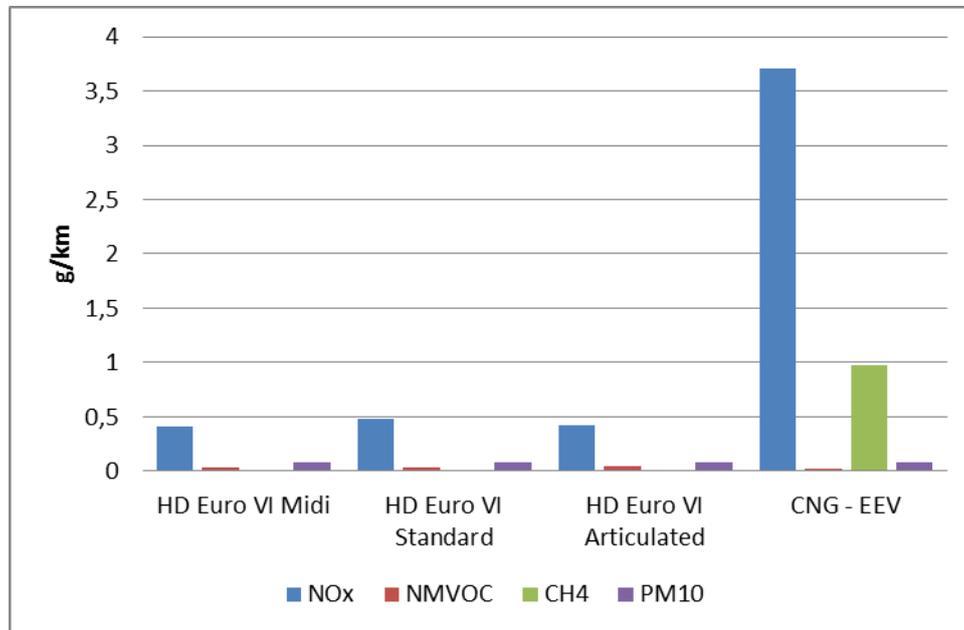


Figura 38: Fattori emissivi di bus urbani a gasolio e a metano

Fonte: Elaborazione ENEA su dati ISPRA-Sinanet

All'interno della catena modellistica del DSS, le emissioni dei bus al punto d'uso sono stimate dal software ECOTRIP per ogni arco di percorso fra due fermate consecutive, al quale è possibile attribuire un ambito di appartenenza (urbano, suburbano o rurale) sulla base delle caratteristiche del contesto territoriale. A partire da questi dati disaggregati di emissione si calcola il valore cumulativo di emissione annuale per ogni contesto di riferimento da utilizzarsi nell'algoritmo di calcolo dei costi esterni prodotti annualmente secondo la formula:

$$CE_{ttw} = \sum_{i=1}^I \sum_{c=1}^C t_{ic} * c_{ic}$$

dove:

- CE_{ttw} = costo annuale totale delle emissioni nocive al punto d'uso[€]
- t_{ic} = peso delle emissioni dell'inquinante i-esimo nel contesto c-esimo [t]
- c_{ic} = costo unitario dell'inquinante i-esimo nel contesto c-esimo [€/t]
- I = numero di inquinanti considerati ($PM_{2,5}$, NO_x , SO_2 , HC, CO_2)
- C = n° di contesti considerati (Urbano, Suburbano, Rurale)

Il VAN relativo alle emissioni prodotte nella fase TTW dagli autobus a combustione interna, sarà dato da:

$$VAN_{CE_ttw} = \sum_{a=0}^A \frac{(CE_{ttw})_a}{(1+t)^a}$$

dove:

- a = anno a-esimo [1÷A]
- $(CE_{ttw})_a$ = costo totale delle emissioni nocive al punto d'uso nell'anno a-esimo[€]

- A = durata del periodo di analisi [n. anni]
- t = tasso di sconto [%]

7.2.2 Emissioni PTT

Le emissioni PTT riguardano tutte le tipologie di alimentazione esaminate dal modello.

In questo caso, la stima delle emissioni parte da quella dei consumi energetici, per mezzo di opportuni fattori di emissione differenziati in relazione alla sostanza considerata. Per arrivare alla determinazione del costo, si applicano poi i valori monetari unitari visti in precedenza.

L’algoritmo di calcolo è quindi:

$$CE_{ptt} = \sum_{i=1}^I \sum_{c=1}^C \frac{ratio_i}{10^6} * C_c * c_{ic}$$

dove:

- CE_{ptt} = costo annuale totale delle emissioni in fase downstream [€]
- ratio_i = fattore emissivo dell’inquinante i-esimo [g/kWh, g/kg]
- C_c = consumo del vettore energetico (elettricità, gasolio, metano) nel contesto c-esimo [kWh, kg]
- c_{ic} = costo unitario dell’emissione dell’inquinante i-esimo nel contesto c-esimo [€/t]
- I = numero di inquinanti considerati (PM_{2,5}, NO_x, SO₂, HC, CO₂)
- C = n° di contesti considerati (Urbano, Suburbano, Rurale)

Nel concreto, come abbiamo visto, solo il costo del PM è differenziato per ambito emissivo; per esso si è deciso di considerare il valore previsto in ambito rurale, ipotizzando che i grandi impianti di raffinazione e di produzione di energia elettrica e le infrastrutture di trasporto delle fonti energetiche siano ubicati lontano dai centri abitati. Con questa assunzione, la formula precedente si semplifica nella successiva:

$$CE_{ptt} = \sum_{i=1}^I \frac{ratio_i}{10^6} * C * c_i$$

La Tabella 33: Fattori di emissione della fase PTT riporta i fattori di emissione dei vari inquinanti per ciascuno dei tre vettori energetici considerati dal DSS.

Tabella 33: Fattori di emissione della fase PTT

	PM_ratio	NOx_ratio	NMVOC_ratio	CO ₂ _ratio	SO ₂ _ratio	CH ₄ _ratio
	g/kWh - g/kg					
Elettrico	0,0043	0,19	0,03	323,63	0,12	0,00
Diesel	0,01	0,26	0,16	395,51	0,54	0,67
Metano	0	0	0,49	13,51	0	7,64

Fonte: Elaborazione ENEA su dati ISPRA, JRC e Meet-Lewis

Si osservino i valori relativi al metano, molto bassi in quanto per tale carburante è stata considerata la filiera di importazione tramite gasdotti, piuttosto che quella della produzione dalla materia prima italiana, in quanto questa incide per una quota decisamente minoritaria dei consumi.

Il calcolo del VAN relativo ai costi esterni generati nella fase PtT, valida sia per gli autobus a combustione interna sia per gli autobus elettrici, sarà dato da:

$$VAN_{CE_ptt} = \sum_{a=0}^A \frac{(CE_{ptt})_a}{(1+t)^a}$$

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 (Figura 39) 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.

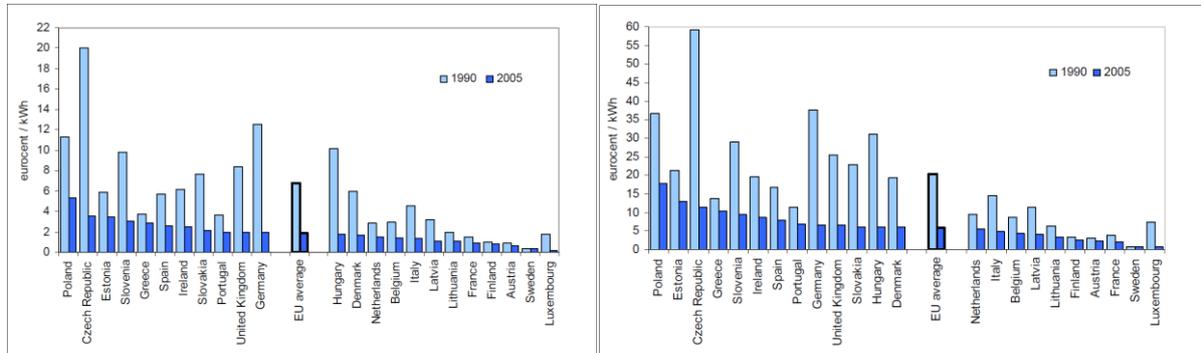


Figura 39: Costi esterni della produzione di energia elettrica, confronti europei

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. Dal 2005 ad oggi 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 CO₂ del parco elettrico italiano riportati nel grafico seguente (Figura 40).

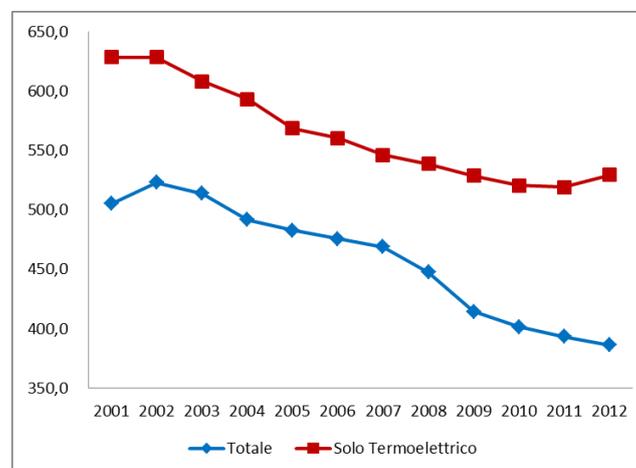


Figura 40: Fattori di emissione del parco elettrico italiano, elaborazione ENEA su dati ISPRA

7.3 Calcolo dei costi esterni del rumore veicolare

L'impatto delle emissioni acustiche è determinato da varie grandezze. Innanzitutto occorre considerare i diversi ambiti di emissione che possono essere, nello specifico urbano, suburbano e rurale; si considera poi il momento della giornata nel quale l'impatto deve essere valutato, distinguendo tra giorno e notte; infine si tiene conto della situazione del traffico che potrà variare da intenso fino a scorrevole. Per ciascuna combinazione il manuale europeo suggerisce dei valori di costo diversi.

La metodologia suggerita da Manuale Europeo richiede che siano stabilite le fasce orarie dei periodi diurni e notturni e quelle delle diverse condizioni di traffico. A tal proposito si è ipotizzato che il periodo diurno si estenda dalle 6:00 alle 22:00 mentre il periodo notturno va dalle ore 22:01 alle ore 5:59. Si assume inoltre che

il traffico nelle aree rurali e suburbane sia scorrevole in ogni momento della giornata, diurno o notturno, mentre nelle aree urbane il traffico varia in funzione del momento della giornata: scorrevole dalle ore 19:01 alle ore 6:59, più o meno congestionato dalle ore 7:00 alle ore 19:00. La Tabella 34: Suddivisione del giorno in fasce orarie significative per il calcolo dei danni da rumore veicolare mostra le fasce orarie di attribuzione delle diverse condizioni di traffico e dei periodi del giorno nei vari contesti di riferimento.

Tabella 34: Suddivisione del giorno in fasce orarie significative per il calcolo dei danni da rumore veicolare

Categoria di strada	Fasce orarie di intensità di traffico		Fasce orarie Diurne e notturne	
	Dense	Thin	Day	Night
Urbana	7.00-19.00	19.01 – 6.59	6.00 – 22.00	22.01 – 5.59
Suburbana	Mai	0 – 24	6.00 – 22.00	22.01 – 5.59
Rurale	Mai	0 – 24	6.00 – 22.00	22.01 – 5.59

Ai fini del calcolo dell’impatto acustico del servizio di linea, accettando una certa approssimazione di calcolo, la percorrenza delle varie corse è attribuita alle diverse fasce orarie sulla base dell’ora di partenza dal capolinea.

La procedura per i calcolo delle emissioni acustiche annue è indicata di seguito. Detti:

- Pa = percorrenza annua dei veicoli [km]
- ratio_kmi = percentuale delle percorrenze percorse nei diversi momenti della giornata (giorno, notte) e per le diverse situazioni di traffico (intenso, scorrevole) [%]
- Ru_i = costo unitario delle emissioni acustiche nei diversi momenti della giornata (giorno, notte) e per le diverse situazioni di traffico (intenso, scorrevole) [€/1.000*vkm]
- %m = quota di rumore percepito per un autobus a metano rispetto ad un bus a gasolio [%]
- %e = quota di rumore percepito per un autobus elettrico rispetto ad un bus a gasolio [%]
- RU_d = costo complessivo inquinamento acustico di un bus diesel [€]
- RU_m = costo complessivo inquinamento acustico di un bus a metano [€]
- RU_e = costo complessivo inquinamento acustico di un bus elettrico [€]

per un autobus diesel la formula di calcolo è la seguente:

$$RU_d = \frac{Pav}{1.000} * \Sigma (Ratio_{kmi} * Ru_i)$$

Per un autobus a metano la formula è la seguente:

$$RU_m = \frac{Pav}{1.000} * \Sigma (Ratio_{kmi} * Ru_i) * \%m$$

Per un autobus elettrico la formula è la seguente:

$$RU_e = \frac{Pav}{1.000} * \Sigma (Ratio_{kmi} * Ru_i) * \%e$$

Il calcolo del VAN relativo ai costi esterni generati dalle emissioni acustiche, per gli autobus alimentati a gasolio, per gli autobus alimentati a metano e per gli autobus elettrici, sarà dato da:

$$VAN_{RU_{d,m,e}} = \sum_{a=0}^A \frac{(RU_{d,m,e})_a}{(1 + t)^a}$$

8 Il Software

8.1 Generalità

Il software per effettuare il confronto tecnico economico delle alternative tecnologiche è stato sviluppato in Matlab.

E' stata acquistata la licenza dalla MathWorks dell'ultima versione disponibile sul mercato, Matlab 2016b, insieme ad una serie di pacchetti aggiuntivi utili alla realizzazione di questa linea di attività della Ricerca di Sistema Elettrico:

- Statistics and Machine Learning
- Curve Fitting
- Optimization
- Fuzzy Logic
- Database Toolbox
- Spreadsheet link EX
- Simulink

Matlab è un linguaggio di programmazione adatto ad ambiti tecnico scientifici dove i problemi sono espressi in notazione matematica. Il linguaggio è di tipo interpretato e l'ambiente di sviluppo è caratterizzato da una finestra di comando che permette di interagire interattivamente con l'esecuzione del programma. Il linguaggio è inoltre caratterizzato da un set di istruzioni atte all'elaborazione e alla visualizzazione dei dati, soprattutto in forma vettoriale o matriciale. Questo approccio rende Matlab uno dei linguaggi più idonei per lo sviluppo di algoritmi ad elevato contenuto scientifico, soprattutto negli ambiti di ricerca.

In Matlab sono state sviluppate tutte le procedure descritte nei capitoli precedenti ed alcuni script per garantire l'accesso al database, sviluppato in ambiente PostgreSQL 9.5 su piattaforma Linux.

L'avvio del software avviene utilizzando lo script 'masiva' che attiva una serie di funzioni all'interno del programma. Si attiverà dapprima il modulo delle verifiche di fattibilità tecnica e di dimensionamento del sistema elettrico in relazione alle caratteristiche dell'istanza in esame; successivamente, nel caso in cui siano fattibili più alternative tecnologiche di elettrificazione, viene attivato il modulo per il confronto economico fra di esse; infine, selezionata la tecnologia elettrica migliore, viene nuovamente richiamato lo script dell'analisi economica, ma questa volta per il confronto fra la soluzione elettrica prescelta e le due alternative convenzionali.

Per lo sviluppo previsto negli anni successivi si potrà sfruttare la caratteristica di Matlab di trasformare i propri script in programmi eseguibili o librerie dinamiche (DLL).

Tutti i dati di input della catena modellistica messa a punto sono archiviati, insieme ad altri (cfr. Report RdS/PAR2015/206), in un database; inoltre all'interno dello stesso archivio sono memorizzati i risultati delle procedure di calcolo, ai fini della visualizzazione da parte dell'utente anche in tempi differiti rispetto all'esecuzione del calcolo.

Non sempre la struttura dei dati disponibili in formato "open" GTFS (General Transit Feed Specification) dalle Aziende di Trasporto pubblico locale rispecchia la struttura richiesta dai moduli per il dimensionamento e il confronto economico ed ambientale delle alternative progettuali. Per ovviare a ciò, le tabelle di dati utili ai moduli suddetti sono state memorizzate in un archivio apposito, denominato *tpl*, adottando per esse una nomenclatura totalmente italiana, come descritto nel successivo paragrafo 8.2. Uno schema delle relazioni esistenti tra le tabelle dell'archivio *tpl* viene visualizzato nella figura che segue.

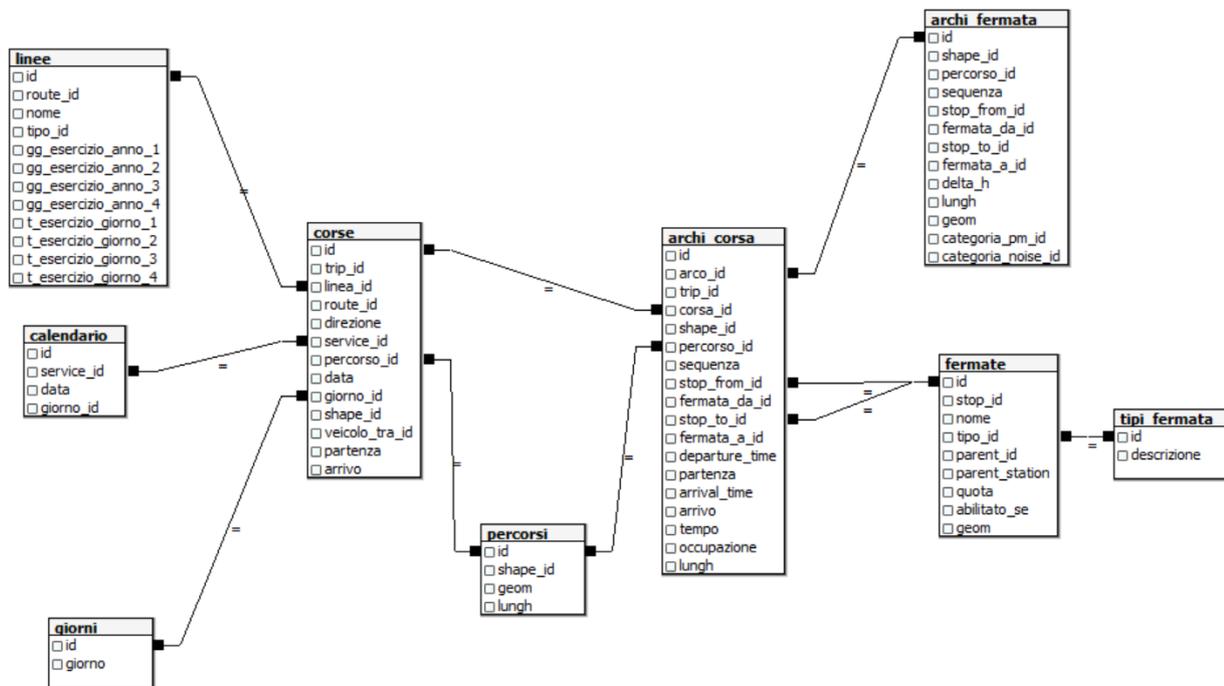


Figura 41: Schema ER dell’archivio *tpl* per la rappresentazione della rete di trasporto pubblico

La realizzazione della banca dati *tpl* ha richiesto lo sviluppo di software in linguaggio SQL per l’elaborazione dei dati in formato GTFS .

Inoltre, sia in linguaggio Matlab che in Python, sono stati creati degli script connettori che permettono la coesione tra il mondo del database e quello del calcolo. E’ stato sviluppato un comando Matlab per ciascuna delle operazioni necessarie per l’acquisizione dei dati di input o archiviazione dei risultati. Quindi, attraverso un semplice comando, è possibile richiamare, ad esempio, i dati di una linea o di una particolare corsa o i parametri di configurazione degli algoritmi di calcolo.

Questo approccio è stato scelto per disaccoppiare la fase di sviluppo del motore di calcolo da quella di realizzazione del DB eliminando i dettagli tecnici della forma del DB dagli script dedicati al calcolo.

8.2 Tabelle dei dati di input

Ogni modulo che compone il software di calcolo sviluppato in Matlab attinge a diversi dati di input, a volte comuni a più di un modulo.

Tutti i dati di input del software sono archiviati nelle tabelle descritte di seguito e classificate in relazione all’ambito concettuale di appartenenza dei dati in esse contenuti. In particolare i dati possono riferirsi al caso di studio in esame, alle tecnologie ipotizzate per l’elettrificazione nei suoi tre diversi opzioni di ricarica e per le alternative convenzionali, alle assunzioni di progetto per il dimensionamento e la verifica del sistema elettrico e, infine, ai dati utilizzati per il confronto economico e ambientale. Per ogni ambito concettuale, si riporta la struttura dei dati relativi, rimandando ai capitoli precedenti per la lettura dei valori utilizzati, quando non specifici del caso di studio.

8.2.1 Dati sul caso di studio

In questa sezione si riportano i dati relativi alla linea presa ad esame; in particolare, nella Tabella dati_linea sono contenuti i dati invarianti rispetto ai diversi percorsi lungo i quali viene realizzato il servizio di linea e cioè i valori del numero di giorni di esercizio dei quattro periodi dell’anno considerati nel modello di calcolo, forniti dall’azienda di trasporto.

Tabella 35: “dati_linea”

Nome campo	Descrizione campo
id_linea	Identificativo della linea
gg_esercizio_anno_1	Giorni di esercizio anno feriale invernale
gg_esercizio_anno_2	Giorni di esercizio anno festivo invernale
gg_esercizio_anno_3	Giorni di esercizio anno feriale estivo
gg_esercizio_anno_4	Giorni di esercizio anno festivo estivo

Per ogni linea sono possibili, in generale, più percorsi⁴², a ciascuno dei quali, sulla base delle indicazioni dell’Azienda sul tipo di veicolo prevalentemente impiegato, viene associata una classe dimensionale di autobus fra le quattro considerate nel modello. La stessa Azienda dovrà dare indicazioni circa l’occupazione media del veicolo elettrico di riferimento per ogni corsa delle giornate caratteristiche⁴³. Dagli open data, invece, si estrapolano, mediante operazioni di somma e di media, i dati sulla lunghezza del percorso, sul numero di corse giornaliere e sul tempo medio di corsa per ciascuna delle giornate rappresentative dei quattro periodi annuali di esercizio.

I dati relativi ai percorsi di una linea sono raggruppati nelle tre tabelle seguenti in relazione al tipo di alimentazione. Si rende necessario differenziare le tabelle in quanto al loro interno sono inseriti anche i risultati della simulazione dei consumi energetici e delle emissioni in atmosfera effettuate per le tre opzioni energetiche considerate dal DSS. Nel caso delle alimentazioni convenzionali, inoltre, ai fini del calcolo dei costi esterni generati dal rumore veicolare (cfr. par. 7.3), per ogni percorso e per ogni giornata caratteristica dell’anno, sono date le percorrenze in relazione a diverse situazioni di traffico e diverse fasce orarie della giornata.

Tabella 36: “dati_percorso_elettrico”

Nome campo	Descrizione campo
id_linea	Identificativo della linea
id_percorso	Identificativo del percorso
id_direzione	Identificativo della direzione
id_data	Identificativo della data
id_classe_veicolo	Veicolo associato al percorso
n_corse_giorno	Numero delle corse giornaliere
n_corse_ora_punta	Numero delle corse dell’ora di punta
l_percorso	Lunghezza del percorso [km]
t_medio_corsa	Tempo medio di corsa ora di punta [min]
cons_elettrico_giorn	Consumo elettrico giornaliero [Wh]
occ_media_giorno	occupazione media pesata giorno
id_corsa_critica	ID corsa critica e cioè di massimo consumo
cons_elettrico_corsa_critica	Consumo elettrico della corsa critica [Wh]
occ_corsa_critica	occupazione media pesata corsa critica

⁴² Una linea può avere un solo percorso circolare oppure uno o più percorsi di andata o ritorno; può accadere, infatti, che alcune corse della linea siano deviate su un percorso diverso da quello abituale oppure che siano limitate o prolungate; per ciascuna di tali eventualità, è necessario definire uno specifico percorso.

⁴³ In alternativa questi dati possono esser derivati da idonee simulazioni di rete.

Tabella 37: "dati_percorso_diesel"

Nome campo	Descrizione campo
id_linea	Identificativo della linea
id_percorso	Identificativo del percorso
id_direzione	Identificativo della direzione
id_data	Identificativo della data
id_classe_veicolo	Veicolo associato al percorso
cons_diesel	Consumo giornaliero diesel [g]
pm_u	Emissioni giornaliere di particolato in ambito urbano [g]
pm_s	Emissioni giornaliere di particolato in ambito suburbano [g]
pm_r	Emissioni giornaliere di particolato in ambito rurale [g]
Nox	Emissioni giornaliere di ossidi di azoto [g]
Hc	Emissioni giornaliere di idrocarburi (metanici e non) [g]
co2	Emissioni giornaliere di biossido di carbonio [g]
noise_day_thin_u	percorrenza diurna in ambito urbano in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_day_dense_u	percorrenza diurna in ambito urbano in condizioni di traffico congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_night_thin_u	percorrenza notturna in ambito urbano in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_day_thin_s	percorrenza diurna in ambito suburbano in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_night_thin_s	percorrenza notturna in ambito suburbano in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_day_thin_r	percorrenza diurna in ambito rurale in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_night_thin_r	percorrenza diurna in ambito rurale in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]

Tabella 38: "dati_percorso_metano"

Nome campo	Descrizione campo
id_linea	Identificativo della linea
id_percorso	Identificativo del percorso
id_direzione	Identificativo della direzione
id_data	Identificativo della data
id_classe_veicolo	Veicolo associato al percorso
cons_metano	Consumo giornaliero metano in g
pm_u	Emissioni giornaliere di particolato in ambito urbano [g]
pm_s	Emissioni giornaliere di particolato in ambito suburbano [g]
pm_r	Emissioni giornaliere di particolato in ambito rurale [g]
Nox	Emissioni giornaliere di ossidi di azoto [g]
Hc	Emissioni giornaliere di idrocarburi (metanici e non) [g]
co2	Emissioni giornaliere di biossido di carbonio [g]
noise_day_thin_u	percorrenza diurna in ambito urbano in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_day_dense_u	percorrenza diurna in ambito urbano in condizioni di traffico congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]

noise_night_thin_u	percorrenza notturna in ambito urbano in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_day_thin_s	percorrenza diurna in ambito suburbano in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_night_thin_s	percorrenza notturna in ambito suburbano in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_day_thin_r	percorrenza diurna in ambito rurale in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]
noise_night_thin_r	percorrenza diurna in ambito rurale in condizioni di traffico non congestionato per il calcolo dei costi del rumore [km]

Per il dimensionamento del sistema elettrico con ricarica alle fermate e con ricarica ai capolinea, si rendono necessari in input i dati di consumo relativi alla corsa più critica dell'anno, ovvero quella corsa che, confrontata con tutte le altre, mostra di avere il valore di consumo più elevato⁴⁴; la seguente tabella riassume i dati in questione, desunti dal database popolato a valle dell'applicazione del modulo di calcolo dei consumi energetici. In questa tabella è presente anche il dato riguardante la possibilità di installare o meno una ricarica alle diverse fermate, informazione che viene fornita dall'azienda.

Tabella 39: "dati_corsa_critica"

Nome campo	Descrizione campo
id_corsa	Identificativo corsa
Id_arco	Identificativo arco fra due fermate consecutive
ricarica_YN	Valore booleano che indica se è possibile installare la ricarica o meno in corrispondenza del primo nodo dell'arco
cons_elettrico	Consumo elettrico [kWh]
occ_arco	Occupazione della capacità del veicolo di riferimento [%]

8.2.2 Dati sulle tecnologie

Nelle successive tabelle sono riportati i dati tecnici ed economici che caratterizzano i veicoli diesel, metano ed elettrici con i relativi sistemi di accumulo e di ricarica, utili al modello di dimensionamento del sistema elettrico ed a quello per il confronto economico fra alternative.

Tabella 40: "car_vei_diesel" e "car_vei_metano"

Nome campo	Descrizione campo
id_veicolo	Identificativo della classe dimensionale del veicolo
costo_acquisto	Costo acquisto veicolo [€]
pers_manut	Unità personale impegnate per la manutenzione di un veicolo in un anno [anni_uomo/veicolo/anno]
costo_mater_manut	Costo del materiale di ricambio per km percorso [€/km]
cons_lubrifi	Consumo specifico di lubrificante [g/km]
perc_vutile	Massima percorrenza del veicolo nella sua vita tecnica [km]
vresiduo	Valore residuo a fine vita tecnica, % sul costo di acquisto [%]
carico_max_pax	Carico massimo [n passeggeri]
tara_veicolo_rif	Peso a vuoto veicolo convenzionale (Chassis+motorizzazione) [kg]
lf_rif	Load factor utilizzato per la stima dei consumi di riferimento [%]

⁴⁴ Come esposto in precedenza, si assume, probabilisticamente, che all'interno della corsa critica risieda anche l'arco critico, ovvero l'arco di massimo consumo in assoluto nell'anno.

sconto_costo_vei	Sconto sul prezzo di riferimento [%]
------------------	--------------------------------------

Tabella 41: Tabella “car_vei_ele”

Nome campo	Descrizione campo
id_veicolo	Identificativo della classe dimensionale del veicolo
cap_acc_rif	Capacità accumulo utilizzata per il calcolo dei consumi di riferimento [kWh]
pot_rif	Potenza di riferimento [kW]
tara_veicolo_rif	Peso Chassis [kg]
carico_max_pax	Carico massimo [n passeggeri]
costo_acquisto	Costo acquisto veicolo [€]
pers_manut	Unità personale impegnate per la manutenzione di un veicolo in un anno [anni_uomo/veicolo/anno]
costo_mater_manut	Costo del materiale di ricambio per km percorso[€/km]
cons_lubrif	Consumo specifico di lubrificante [g/km]
perc_vutile	Massima percorrenza del veicolo nella sua vita tecnica [km]
vresiduo	Valore residuo a fine vita tecnica, % sul costo di acquisto [%]
lf_rif	Load factor utilizzato per la stima dei consumi di riferimento [%]
sconto_costo_vei_ele	Sconto sul prezzo di riferimento [%]
quota_rumore_ele	Assunzione sul rapporto fra i costi del rumore dell'alimentazione elettrica rispetto a quella diesel

Tabella 42: Tabella “car_sist_accum”

Nome campo	Descrizione campo
id_batteria	Identificativo del tipo di accumulo
cicli_vita_utile	Cicli di vita utile del tipo di accumulo in condizioni standard [n Cicli]
ener_cell	Energia nominale del componente elementare del sistema di accumulo [Wh]
volt_cell	Tensione nominale del componente elementare del sistema di accumulo [V]
energia_specif	Energia Specifica della batteria [Wh/kg]
recup_fren	Percentuale di recupero in frenatura [%]
rendimento	Rendimento [%]
costo_specif_acc	Costo specifico della batteria [€/kWh]
costo_specif_cell	Costo specifico delle componenti elementari [€/kWh]
valore_unit_residuo_acc	Valore unitario residuo a fine vita dell'accumulo [€/kWh]
sconto_costo_accum	Sconto sul prezzo di riferimento del sistema di accumulo [%]

Tabella 43: Tabella “car_sist_ricarica”

Nome campo	Descrizione campo
id_tipo_ricarica	Identificativo della modalità di ricarica (lenta, rapida, ultrarapida)
id_batterie	Identificativo del tipo di batteria di bordo associato alla modalità di ricarica
rend_ric	Rendimento Ricarica [%]
costo_specif_ricarica	Componente variabile con la potenza del costo di acquisto e installazione dell'impianto di ricarica [€/kW]
costo_fisso	Componente fissa del costo d'acquisto e installazione dell'impianto di ricarica [€]
n_anni_vutile	Vita tecnica dell'impianto [N. anni]
costo_pers_manut	Costo personale manutenzione [€/anno]
sconto_costo_ricarica	Riduzione del costo d'acquisto dell'impianto per sconto o altro [%]

8.2.3 Dati di Expertise per il progetto del sistema elettrico

All'interno delle procedure di verifica di fattibilità tecnica e dimensionamento delle architetture elettriche considerate dal modello, come descritto in precedenza, si utilizzano alcuni criteri di progettazione derivati dall'esperienza o dalle esigenze di servizio di trasporto pubblico.

La tabella seguente riassume l'insieme dei criteri imposti, diversificati in funzione della modalità di ricarica presa in esame di volta in volta.

Tabella 44: Tabella “expert_sist_ele”

Nome campo	Descrizione campo
id_tiporicarica	Identificativo della modalità di ricarica
max_consumi_cap_dep	Massima ratio consumi a/da deposito/consumo riferimento
peso_medio_pax	Peso medio dei passeggeri [kg]
coeff_autonomia	Coefficiente >1 per calcolo autonomia veicolo
cons_ottimo_ricariche	Consumo di riferimento per il dimensionamento dell'accumulo in caso di ricarica alle fermate [kWh]
tolleranza_cons_ricariche	Margine di tolleranza su consumo di riferimento
t_ricarica_dep	Tempo Netto Ricarica al deposito [h]
t_ricarica_cap	Tempo Netto Ricarica al capolinea [h]
t_ricarica_ferm	Tempo Netto Ricarica alle fermate [h]
ratio_t_sosta_ricarica	Rapporto fra tempo di Sosta al capolinea dei veicoli convenzionali e Tempo di sosta del veicolo elettrico a ricarica rapida
ratio_tcorsa_elettrico_conv	Coefficiente maggiorazione tempo di corsa per elettrico a ricarica ultrarapida rispetto a convenzionale
soc_residuo	Valore minimo dello Stato di carica dell'accumulo di bordo [%]
min_pot_ricarica_cap	Minima potenza di ricarica al capolinea [kW]
max_potenza_ricarica	Massima potenza di ricarica installabile [kW]
coeff_ricariche	Coefficiente di maggiorazione cicli di carica e scarica per tener conto dell'esercizio effettivo rispetto alle condizioni standard di misura
iterazione_cap_batteria	Criterio di stop iterazione per dimensionamento capacità batteria
vu_acc_sec_anni	Vita utile accumulo di riserva (per sistema con ricarica a fermate) [Anni]
crate_scarica_prog	Coefficiente per il calcolo della capacità dell'accumulo a partire dalla potenza di riferimento per la ricarica al capolinea
rend_conv_ac_dc	Rendimento di conversione AC/DC

8.2.4 Dati per l'analisi economica e dei danni ambientali

Già nelle precedenti tabelle figuravano alcuni dati utili all'analisi economica; le seguenti tabelle completano l'insieme dei dati impiegati nella stessa analisi e nella quantificazione monetaria dei danni prodotti dalle emissioni nocive in atmosfera e dal rumore da traffico veicolare.

Tabella 45: Tabella "dati_generali"

Nome campo	Descrizione campo
vu_progetto	Durata del periodo di analisi economica [anni]
tasso_sconto	Tasso di sconto applicato per il calcolo del Valore Attuale Netto [%]
costo_anno_pers_manut	Costo annuale del personale di manutenzione [€/anno]
costo_installaz_batt	Costo di personale per l'installazione delle batterie di ricambio [€/ricambio]
costo_specif_diesel	Costo specifico diesel [€/l]
peso-specif_diesel	Peso Specifico Diesel [kg/l]
costo_specif_metano	Costo specifico metano [€/kg]
costo_spec_lubrif	Costo specifico lubrificanti [€/l]
peso_specif_lubrif	Peso specifico olio lubrificante [kg/litri]
costo_pmu	Costo esterno unitario delle emissioni di particolato in ambito urbano [euro/t]
costo_pms	Costo esterno unitario delle emissioni di particolato in ambito suburbano [euro/t]
costo_pmr	Costo esterno unitario delle emissioni di particolato in ambito rurale [euro/t]
costo_nox	Costo esterno unitario delle emissioni di ossidi di azoto [euro/t]
costo_nmVOC	Costo esterno unitario delle emissioni di idrocarburi [euro/t]
costo_co2	Costo esterno unitario delle emissioni di CO2 [euro/t]
costo_so2	Costo esterno unitario delle emissioni di SOx [euro/t]
composizione_hc_diesel	Incidenza delle emissioni di metano sul totale delle emissioni di idrocarburi nella trazione Diesel
composizione_hc_metano	Incidenza delle emissioni di metano sul totale delle emissioni di idrocarburi nella trazione a Metano
conversione_ch4_co2	Coefficiente di conversione del metano in CO2 equivalente
Tempo_sosta_cap_conv	Tempo di sosta al capolinea del veicolo convenzionale [min]

Tabella 46: Tabella "dati_tarif_ele"

Nome campo	Descrizione campo
FasciaPotenza	Fascia potenza in Media o Bassa Tensione
costo_potenza_imp	Costo unitario della potenza impegnata [€/kW/anno]
costo_punto_prel	Costo unitario per punto di prelievo [€/anno]
costo_energia_min_8	Costo unitario dell'energia da 0 a 8 GWh [€/kWh]
costo_energia_magg_8	Costo unitario dell'energia sopra agli 8 GWh [€/kWh]

Tabella 47: Tabella "dati per calcolo well-to-tank"

Nome campo	Descrizione campo
pm_ratio	Rapporto tra consumo energetico e PM emesso nella fase WTT [g/kWh - g/kg]
nox_ratio	Rapporto tra consumo energetico e NOx emesso nella fase WTT [g/kWh - g/kg]
hc_ratio	Rapporto tra consumo energetico e HC emesso nella fase WTT [g/kWh - g/kg]
co2_ratio	Rapporto tra consumo energetico e CO2 emesso nella fase WTT [g/kWh - g/kg]
so2_ratio	Rapporto tra consumo energetico e SO2 emesso nella fase WTT [g/kWh - g/kg]

Tabella 48: Tabella "costi_rumore"

Nome campo	Descrizione campo
day_dense	costo specifico del rumore nel caso day_dense [€/1000vkm]
day_thin	costo specifico del rumore nel caso day_thin [€/1000vkm]
night_dense	costo specifico del rumore nel caso night_dense [€/1000vkm]
night_thin	costo specifico del rumore nel caso night_thin [€/1000vkm]

In particolare, la seguente tabella, per ogni coppia di valori di ingresso T/I (Tempo di corsa/Intertempo medio fra corse) e T/R (Tempo di corsa/Numero di ricariche lungo il percorso), fornisce il numero più probabile di impianti di ricarica alle fermate contemporaneamente impegnati, da utilizzarsi per la determinazione della potenza impegnata da considerare nella stima dei costi di fornitura dell'energia elettrica.

Tabella 49: Tabella "matrice_calcolo_n_ricariche_contemp"

Nome campo	Descrizione campo
Rapporto T/I	Rapporto fra tempo di corsa e intertempo fra corse (proxy n° veicoli in corsa p.s.m.)
Rapporto T/R	Rapporto fra tempo di corsa e n° di ricariche (Intertempo medio fra ricariche)

8.3 Tabelle dei dati di Output

Per ogni linea analizzata, i principali risultati della procedura di calcolo sono archiviati nel DB, organizzati come di seguito illustrato.

8.3.1 Risultati del dimensionamento del sistema elettrico

A valle del dimensionamento dei sistemi elettrici per le varie opzioni di ricarica sono memorizzati i risultati relativi alla capacità degli accumuli veicolari principali e di supporto, alla potenza installata per la ricarica suddivisa fra deposito, capolinea e fermate), alla potenza impegnata, al numero di punti di prelievo dell'energia elettrica e all'energia annualmente assorbita. La Tabella 50 illustra la struttura dei dati archiviati.

Tabella 50: Tabella "output_tecnici_scelta_arch"

Nome campo	Descrizione campo
id_linea	Identificativo Linea
id_tiporicarica	Identificativo modalità di ricarica
n_ricariche_dep	Numero di stazioni di ricarica al deposito
n_ricariche_cap	Numero di stazioni di ricarica al capolinea
n_ricariche_ferm	Numero di stazioni di ricarica alle fermate
cap_acc_veic	Capacità accumulo principale veicolo [kWh]
cap_acc_supp	Capacità accumulo supporto veicolo [kWh]
potenza_ricarica_dep	Potenza complessiva installata al deposito [kW]
potenza_ricarica_cap	Potenza complessiva installata al capolinea [kW]
potenza_ricarica_ferm	Potenza complessiva installata alle fermate [kW]
pot_ricarica_max_ferm	Massima Potenza installata alle fermate [kW]
pot_ricarica_media_ferm	Potenza installata media alle fermate [kW]
pot_impegnata_bt	Potenza impegnata BT [kW]
pot_impegnata_mt	Potenza impegnata MT [kW]
punti_prelievo_bt	Punti di prelievo in Bassa Tensione
punti_prelievo_mt	Punti di prelievo in Media Tensione
energia_bt	Energia consumata annuale BT [kWh]
energia_mt	Energia consumata annuale MT [kWh]

8.3.2 Risultati del confronto economico delle opzioni di ricarica elettrica

Sono archiviati i risultati relativi al confronto economico fra le tre possibili opzioni di elettrificazione, come riportato nella seguente tabella. Per ciascuna alternativa si registrano i valori attualizzati delle diverse voci di costo prese in considerazione e il Valore Attuale Netto complessivo, nonché se si tratti dell'opzione selezionata o meno.

Tabella 51: Tabella "output_economici_scelta_arch"

Nome campo	Descrizione campo
id_linea	Identificativo Linea
id_ricarica	Identificativo modalità di ricarica
costo_staz_ricarica	Valore attualizzato degli investimenti per acquisto stazioni di ricarica [€]
val_res_staz_ricarica	Valore Residuo attualizzato delle stazioni di ricarica [€]
costo_bus	Valore attualizzato degli investimenti per acquisto Bus [€]
val_res_bus	Valore residuo attualizzato dei Bus [€]
costo_acc	Valore attualizzato degli investimenti per acquisto accumulo di bordo [€]
val_res_acc	Valore residuo attualizzato dell'accumulo di bordo [€]
costo_pers_manut	Valore attualizzato delle spese per personale di manutenzione [€]
costo_mat_manut	Valore attualizzato delle spese per materiale di manutenzione [€]
costo_lubrif	Costo attualizzato delle spese per lubrificante [€]
costo_punto_prelievo	Valore attualizzato delle spese per allacci rete elettrica [€]
costo_potenza	Valore attualizzato delle spese per impegno di potenza [€]
costo_energia	Valore attualizzato delle spese per consumo di energia elettrica [€]
tot_costi_interni	Valore attualizzato del totale dei costi interni
flag_scelta	Flag che indica che architettura sia stata scelta (1 indica l'architettura scelta)

8.3.3 Risultati del confronto economico fra alternative energetiche

Del confronto economico fra alternative energetiche sono archiviati separatamente i risultati relativi all'architettura elettrica prescelta e alle due alternative convenzionali; a differenza del confronto fra le architetture elettriche, in questo caso i risultati sono espressi per tutti gli anni di analisi, per dare modo all'utente di analizzare nel dettaglio le ragioni della selezione finale.

Nella tabella seguente sono illustrati i dati dei flussi economici annuali archiviati per ciascuna alternativa energetica.

Tabella 52: Tabella "acb_elettrico", "acb_diesel" e "acb_metano"

Nome campo	Descrizione campo
id_linea	Identificativo Linea
id_ricarica	Identificativo modalità di ricarica
Anno	Anno i-esimo
costo_staz_ricarica	Costo investimento delle stazioni di ricarica [€]
val_res_staz_ricarica	Valore Residuo delle stazioni di ricarica [€]N.B. non c'è valore residuo a fine vita
costo_bus	Costo investimento dei Bus [€]
val_res_bus	Valore residuo dei Bus [€]
costo_motore	Costo sostituzione motore
res_motore	valore residuo motore
costo_acc	Costo dell'accumulo [€]
val_res_acc	Valore residuo dell'accumulo [€]

costo_pers_manut	Costo annuale del personale di manutenzione [€]
costo_mat_manut	Costo annuale del materiale di manutenzione [€]
costo_punto_prelievo	Costo punto prelievo [€]
costo_potenza	Costo annuale della potenza impegnata [€]
costo_energia	Costo annuale dell'energia [€]
costo_lubrif	Costo annuale del lubrificante [€]
costo_emissioni	Costo annuale delle emissioni [€]
costo_rumore	Costo annuale del rumore [€]
wtt	WTT [€]

In questa tabella vengono riportati, per le tre alimentazioni esaminate, i valori attualizzati delle varie voci di costo o di rientro nonché il Valore Attuale Netto del totale dei costi interni e quello inerente a tutte le externalità negative. Naturalmente, alcune voci di costo sono valorizzate come nulle quando non pertinenti con l'alimentazione indicata.

Tabella 53: Tabella "output_acb"

Nome campo	Descrizione campo
id_linea	Identificativo Linea
id_alimentazione	Identificativo energia utilizzata (elettrica, diesel o metano)
costo_staz_ricarica	Valore attualizzato dell'investimento per stazioni di ricarica [€]
val_res_staz_ricarica	Valore Residuo attualizzato delle stazioni di ricarica [€]
costo_bus	Valore attualizzato dell'investimento per acquisto Bus [€]
val_res_bus	Valore residuo attualizzato dei Bus [€]
costo_acc	Valore attualizzato dell'investimento per acquisto accumulo di bordo [€]
val_res_acc	Valore residuo attualizzato dell'accumulo [€]
costo_pers_manut	Valore attualizzato delle spese per personale di manutenzione [€]
costo_mat_manut	Valore attualizzato delle spese per materiale di manutenzione [€]
costo_lubrif	Valore attualizzato delle spese per acquisto olii lubrificanti [€]
costo_punto_prelievo	Valore attualizzato delle spese per allaccio alle rete elettrica [€]
costo_potenza	Valore attualizzato delle spese per impegno potenza elettrica [€]
costo_energia	Valore attualizzato delle spese per consumi energetici [€]
tot_costi_interni	Valore Attuale Netto dei costi interni [€]
costo_emissioni	Valore attualizzato dei costi esterni delle emissioni al punto d'uso [€]
costo_rumore	Valore Attualizzato dei costi esterni del rumore [€]
Wtt	Valore attualizzato dei costi esterni delle emissioni up-stream [€]
tot_costi_esterni	Valore Attuale Netto dei costi esterni
tot_costi	Valore Attuale Netto

8.4 Test

Per verificare il corretto funzionamento del software, è stato implementato un caso di test desunto dai dati open dell'ATAC di Roma.

La linea analizzata è lunga circa 11 km, sia in andata che in ritorno, tutta interna ad un contesto prettamente urbano; nei giorni feriali le corse effettuate per senso di marcia in un arco di 18 ore sono 94, di cui 7 nell'ora di punta, per una percorrenza annua di 735.000 km circa; il tempo medio di corsa è di circa 65 minuti. Il dislivello medio è pari a +2 km in andata e di -2 km in ritorno. In mancanza di informazioni specifiche in merito, si è

ipotizzato di utilizzare un veicolo di classe dimensionale 3 (12 metri circa), con il quale il fattore di carico medio annuale risulta pari a circa 20%.

Nella Tabella 54 sono riportate le percentuali delle percorrenze diurne e notturne nelle diverse condizioni di traffico, stimate dal modello per il calcolo dei costi del rumore; i valori relativi ai contesti extraurbani sono nulli per quanto detto in precedenza circa le caratteristiche della linea esaminata.

Tabella 54: Suddivisione delle percorrenze del servizio ai fini del calcolo dei costi esterni del rumore

Senso di marcia	day_thin urbano	day_dense urbano	night_thin urbano
Andata	0,21	0,71	0,08
Ritorno	0,21	0,71	0,08

La stima dei consumi e delle emissioni in atmosfera di base per le tre possibili alimentazioni energetiche (elettrica, diesel e metano) è stata effettuata con il modulo ECOTRIP (calcolo in base alla velocità media fra fermate), per un'occupazione costante di 43 passeggeri, pari al 50% della capacità del veicolo elettrico di riferimento. La stima ha riguardato le quattro giornate caratteristiche dell'anno ma nel seguito, a titolo esemplificativo, si riportano i risultati relativi alla sola giornata feriale invernale.

Tabella 55: Consumi di base veicolo elettrico nel giorno feriale invernale

Senso di marcia	Consumo giornaliero linea [kWh]	Consumo della corsa critica [kWh]	Consumo arco critico [kWh]
Andata	1.219	13,02	1,8
Ritorno	1.042	10,78	1,4

Tabella 56: Consumi ed emissioni di base veicolo diesel EURO VI nel giorno feriale invernale

Senso di marcia	Consumo [g]	PM Urbano [g]	NO_x [g]	HC [g]	CO₂ [g]
Andata	450.779	50,32	1.803	55,62	1.410.236
Ritorno	416.222	46,80	1.850	52,90	1.302.037

Tabella 57: Consumi ed emissioni di base veicolo metano EEV nel giorno feriale invernale

Senso di marcia	Consumo [g]	PM Urbano [g]	NO_x [g]	HC [g]	CO₂ [g]
Andata	481.377	5,28	2.645	1.058	1.323.878
Ritorno	478.491	5,26	2.629	1.052	1.315.938

Si osservi la differenza delle emissioni nocive dei veicoli a gasolio e a metano; come evidenziato in precedenza, l'alimentazione a metano riduce sensibilmente le emissioni di polveri sottili ma fa aumentare quelle di ossidi di azoto e di idrocarburi; per questi secondi, la ragione è una maggiore incidenza di emissioni di CH₄ mentre il gap sugli ossidi di azoto è dovuto alla stringente regolamentazione delle emissioni dei veicoli a gasolio. Anche in termini di consumi energetici il metano risulta essere meno efficiente del diesel; a tal proposito è bene sottolineare che le stime dei consumi dei veicoli a metano⁴⁵ non considerano il fattore pendenza che, invece, influenza sensibilmente i risultati relativi al gasolio, come si può osservare dal confronto fra Andata e Ritorno.

La procedura di verifica e dimensionamento del sistema elettrico dimostra la fattibilità di tutti i possibili schemi di ricarica, che assumono le caratteristiche tecniche riassunte nella tabella sottostante.

⁴⁵ Il modulo ECOTRIP utilizza funzioni di consumo ed emissione di derivazione COPERT che, per il metano, trascurano il fattore pendenza e quello di carico del veicolo.

Tabella 58: Caratteristiche tecniche delle alternative di elettrificazione

	N. veicoli	Capacità accumulo veicolo [kWh]	N. staz. ricarica dep.	Potenza ricarica al dep. [kW]	N. staz. ricarica capol.	Potenza ricarica al capol. [kW]	N. staz. ricarica ferm	Potenza ricarica alle ferm. [kW]	Potenza impegn. [kW]	Punti prelievo MT	Consumo energetico [kWh/anno]
Arch. A	18	205	18	774	0	0	0	0	774	1	621.523
Arch. B	18	80	18	65	4	400	0	0	465	3	552.252
Arch. C	19	3,4	19	68	2	100	12	4.300	1.888	15	555.483

La numerosità della flotta è simile nei tre casi di esercizio ma, dovendo effettuare la ricarica alle fermate, si rende necessario un veicolo aggiuntivo rispetto agli altri due schemi di esercizio, a causa di possibili maggiorazioni dei tempi di corsa.

I consumi della prima soluzione sono più elevati rispetto agli altri due per effetto del maggior peso dell'accumulo di bordo, dimensionato per effettuare il servizio giornaliero piuttosto che solo una parte di esso. I consumi energetici dell'architettura con biberonage solo al capolinea sono analoghi a quelli della soluzione che prevede il rifornimento lampo anche alle fermate; infatti, nonostante i diversi valori di capacità, i due accumuli hanno pesi confrontabili fra loro perché realizzati con diversa elettrochimica: batterie al litio nel primo caso, supercaps nel secondo caso.

Con l'architettura di tipo B si contiene sensibilmente la potenza da dover impegnare complessivamente, nonostante la necessità di disporre di due impianti di ricarica per ciascuno dei due capolinea; la combinazione di esigenze energetiche e tempi di ricarica previsti giocano a favore di questa soluzione rispetto alle altre due, anche per questo aspetto.

La stima dei costi condotta su un orizzonte di 12 anni e riportata nella figura seguente in termini di VAN delle diverse voci economiche, evidenzia la convenienza dello schema di ricarica di tipo B. Rispetto alla soluzione con ricarica solo al deposito si realizza un risparmio sui costi di acquisto e sostituzione dell'accumulo e sulla bolletta energetica che sopravanza i maggiori costi di acquisto/installazione degli impianti di ricarica ed i maggiori oneri di manutenzione dei veicoli (a causa dei più frequenti ricambi delle batterie); rispetto alla soluzione che prevede il biberonage anche alle fermate, il vantaggio è dato soprattutto dal risparmio sugli investimenti e sugli oneri di esercizio delle infrastrutture di ricarica, oltre che da una minore numerosità della flotta necessaria ad effettuare il servizio.

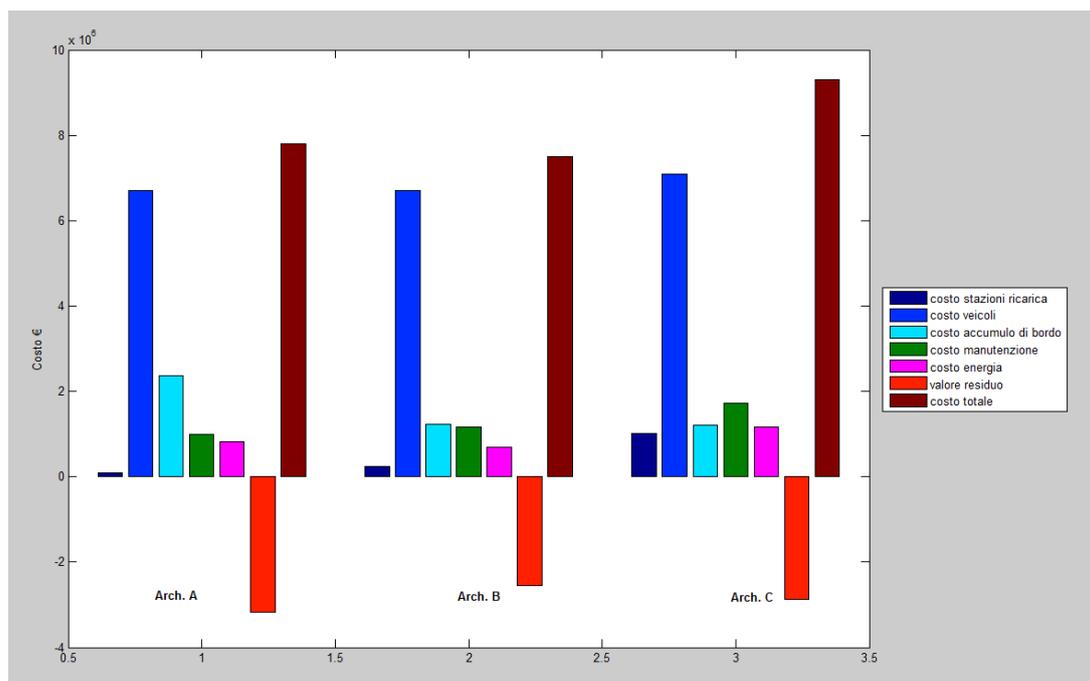


Figura 42: Confronto costi delle diverse tipologie di ricarica elettrica

L'elettificazione della linea secondo lo schema selezionato risulta essere economicamente preferibile anche rispetto alle due alimentazioni convenzionali, non solo in termini di riduzione delle esternalità negative e dei costi dell'energia, come era atteso, ma nel complesso dei costi. Gli aggravii di costo per l'acquisto dei veicoli elettrici, del relativo accumulo di bordo e delle stazioni di ricarica è ampiamente ripagato, nel periodo di 12 anni esaminato, dai risparmi sui costi energetici e di manutenzione dei veicoli, per non parlare dei vantaggi in termini di esternalità negative evitate.

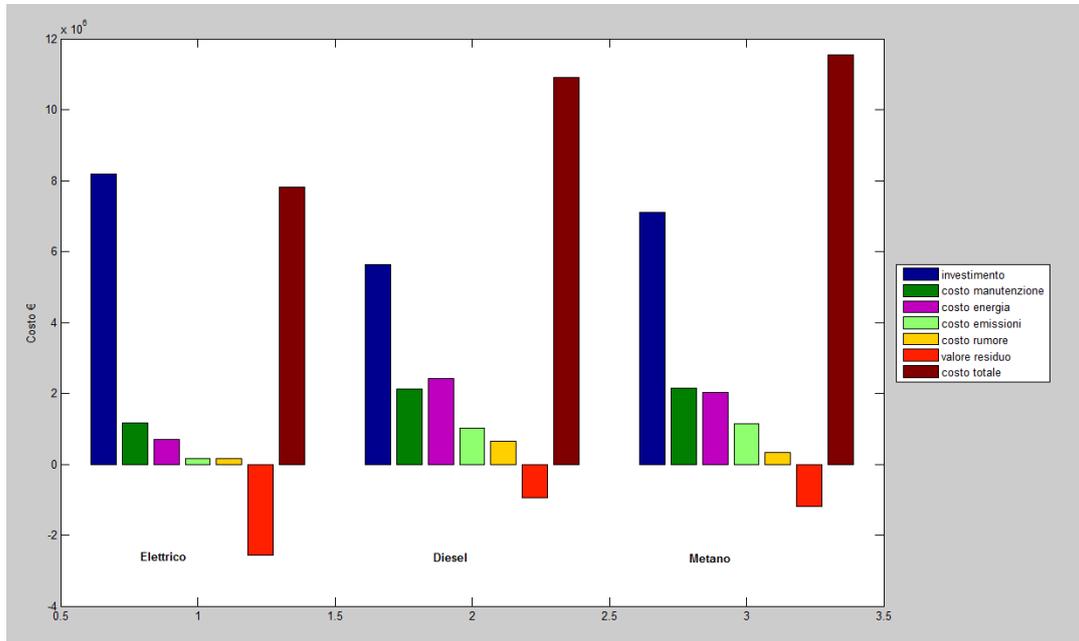


Figura 43: Confronto costi tra alimentazione elettrica, diesel e metano

In conclusione, il test effettuato dimostra il buon funzionamento del modulo software e dei modelli di calcolo in esso implementati.

9 Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto ha raggiunto gli obiettivi attesi, con lo sviluppo di una catena modellistica complessa in grado di verificare la fattibilità tecnica ed economica dell'elettificazione di una linea di trasporto pubblico su gomma, suggerendo alle Aziende interessate la soluzione tecnologica più conveniente e indicando le ricadute in termini di consumi energetici ed assorbimenti.

I modelli teorici sono stati altresì tradotti in termini informatici, dando vita ad un software perfettamente funzionante, in grado di interloquire con il Database relazionale contenente i dati di input dei modelli, spesso acquisiti direttamente dalle banche dati "open" delle Aziende di Trasporto Pubblico Locale, e strutturato per recepirne gli output.

Lo strumento messo a punto rappresenta un ausilio alle scelte di innovazione tecnologica del servizio di trasporto pubblico su gomma, in termini di individuazione delle linee maggiormente adatte alla trasformazione in elettrico, di indirizzamento verso la tecnologia più idonea, di quantificazione dei benefici economici interni ed esterni, di verifica delle ricadute sul sistema elettrico locale e nazionale.

Per i prossimi anni di ricerca si prevede di applicare lo strumento a casi di studio concreti, esaminando la possibilità di elettrificare in tutto o in parte le reti di trasporto pubblico locale di alcune realtà urbane significative e verificando le ricadute energetiche, ambientali ed economiche dell'operazione.

Inoltre, si intende realizzare un *upgrading* del sistema di supporto alle decisioni, in termini sia di ampliamento delle soluzioni tecnologiche esaminate sia di approfondimento del tema dell'ottimizzazione del sistema di ricarica in una configurazione di rete.

Per stabilire le priorità da rispettare nell'estensione dell'elettificazione sull'insieme delle linee è necessario affrontare il sistema nella sua globalità, aumentando in misura esponenziale la complessità dell'algoritmo ed i tempi di elaborazione. Grazie alla evoluzione della potenza di calcolo degli elaboratori, si può pensare di esplorare l'intero spazio delle possibili configurazioni di ricarica su un qualsiasi sottoinsieme delle linee della rete in esame e individuare quella migliore in assoluto. Contemporaneamente, col supporto di una Università, si vuole definire una adeguata procedura euristica per la soluzione del medesimo problema da utilizzare quando non si verifichi la disponibilità delle infrastrutture di supercalcolo. Lo sviluppo parallelo di due metodologie di soluzione del medesimo problema garantisce la validazione di entrambe e rappresenta un'occasione di sviluppo della Ricerca Operativa applicata ai trasporti.

10 Riferimenti bibliografici

1. Ricerca sul Sistema Energetico – RSE SpA, “Energia elettrica, anatomia dei costi, 2014”. Alkes, Milano.
2. Ricerca sul Sistema Energetico – RSE SpA, “E...Muoviti! Mobilità elettrica a sistema”, 2013. Alkes, Milano.
3. Anfia, “Autobus:Un settore industriale in estinzione?”, 2015.
4. ASSTRA Associazione Trasporti, “Un modello di calcolo del costo standard per il trasporto pubblico locale e regionale automobilistico”, 2013. Audizione presso la IX Commissione trasporti, poste e telecomunicazioni della Camera dei Deputati, Roma.
5. Charged EVs, “Geneve electric buses use ABB flash charging Technology”, 2016. www.chargedevs.com
6. Commissione Europea, “A Europea Strategy for low-emission Mobility”, SWD (2016) 244 Final.
7. Metauto, “Con gli autobus a gas il mercato si riaccende”, 2015. www.metauto.it
8. European Union Regional Policy, “Guide to Cost Benefir Analysis of Investment Projects”, 2008.
9. IDTechEx Research, “Batterie al litio er i bus elettrici 2016-2026, 2015. www.electricmotorsnews.com
10. LuskIn Center for innovation, “Financial viability of Non-Residential electric vehicle charging stations”, 2012.
11. E. Tironi, L. Piegari, V. Musolino, S. Grillo, “Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia quali supercondensatori e sistemi di accumulo misti”, Report Ricerca di Sistema Elettrico, settembre 2011.
12. Hans Bängtsson and Mats Alaküla (Electric&Hybrid Vehicle Centre-Svezia), “Cost Analysis of Electric Land Transport”, 2015.
13. Energy Storage Report, “The second life threat to non-lithium batteries”, 2016. www.energystoragereport.info
14. Piano Nazionale Infrastrutturale per la Ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, luglio 2013.
15. Batterie al litio ione: www.kokam.com
16. Hipower Energy Group, LiFePO₄ Battery specification
17. D. Ansean, M. Dubarry, A. Devieb, B.Y. Liaw, V.M. García, J.C. Viera, M. Gonzalez, “Fast charging technique for high power LiFePO₄ batteries: A mechanistic analysis of aging”, Journal of Power Sources, Aprile 2016
18. J.Wang, Ping Liu, J.Hicks-Garner, E. Sherman, S. Soukiazian, M. Verbrugge, H. Tataria, J. Musser, P. Finamore, “Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells”, Journal of Power Sources, Novembre 2010
19. E. Sarasketa-Zabala, I. Laresgoiti, I. Alava, M. Rivas, I. Villarreal, F. Blanco, “Validation of the methodology for lithium-ion batteries lifetime prognosi”, EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium 1, 17-20 Novembre 2013, Barcellona, Spagna.
20. Lithium-ion battery life: www.saftbatteries.com
21. E. Kim, K. G. Shin e J Lee, “Real-Time Discharge/Charge Rate Management for Hybrid Energy Storage in Electric Vehicles”
22. “Batterie al litio, calo prezzi oltre le previsioni: siamo ai livelli previsti per il 2020”: <http://www.qualenergia.it/>, Redazione QualEnergia, 25 marzo 2015
23. “Supercondensatori e condensatori agli ioni di litio”, Catalogo 2015 Socomec: <http://www.socomec.it/>
24. M. Winter, R. J. Brodd, “What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?”, 2004, American Chemical Society
25. “Nuove batterie al Litio con ricarica rapida e durata di 20 anni”, intervista a F.Testa, presidente ENEA, TVEfficienza energetica: <http://www.greenstyle.it/>
26. <http://ebus.com/bus-type/>
27. “Smart choices for cities Clean buses for your city”, Civitas, policy note,2013
28. A. Vance, “Proterra, an Electric Bus Maker, Aims to Follow the Tesla Model”, giugno 2014
29. “Parco veicoli. Schede Tecniche”. Gruppo Torinese Trasporti Trasporto pubblico locale: <http://www.gtt.to.it/>
30. “Bredamenarinibus – VIVACITY”, BusToCoach Rivista mensile on-line e Sito d’informazione sul trasporto passeggeri in Europa. www.ingegnerianet.it/ingegnere_silvestro_giordano/tesi.htm
31. “Guida tecnica. Le cabine di trasformazione MT/BT (utenti passivi)”, ABB
32. “Auto elettrica – la rete può rispondere alla domanda di ricarica”, Assoelettrica, Illumina Magazine.
33. A. Valsecchi, P. Gramatica, D. Bertini “Progetto 10: Impatto sul sistema elettrico della potenziale diffusione dei veicoli elettrici”. Ricerca sistema energetico RSE.

34. Prezzi Nazionali di alcuni Prodotti Petroliferi: <http://dgsaie.mise.gov.it/dqgerm/>
35. <http://www.assogasmetano.it/prezzo/prezzo-medio-aprile-2016/>
36. "Update of the Handbook on External Costs of Transport, Final Report", Report for the European Commission: DG MOVE, Ricardo-AEA/R/ ED57769 Issue Number 1, Gennaio 2014
37. Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 14 Novembre 1997 (in Gazzetta Ufficiale - Serie generale n. 280 del 1/12/97). "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore".
38. L. Piani, "Raccolta legislativa in materia di inquinamento acustico", ARPA FVG – Direzione Tecnico-Scientifica, Ottobre 2012
39. A. Burke, "Ultracapacitor Technologies and Application in Hybrid and Electric Vehicles", International Journal of Energy Research, Luglio 2009
40. A. Burke, Z. Liu, H. Zhao "Present and Future Applications of Supercapacitors in Electric and Hybrid Vehicles", IEEE International Electric Vehicle Conference 2014, Firenze, Italia, 17-19 Dicembre 2014
41. E. Tironi, L. Piegari, V. Musolino. S. Grillo, "Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia quali supercondensatori e sistemi di accumulo misti (batterie + supercondensatori)", Ricerca di Sistema Elettrico
42. "K-BUS. Simulazione di performance tecnico gestionale di sistema di biberonaggio energetico a ricarica rapida di autobus a trazione elettrica", Sequoia automation. www.sequoiaonline.com
43. F. Menolotto, "Filobus con batterie di supercondensatori per marcia autonoma a trazione elettrica", 1° convegno Sistema Gomma nel TPL. ASSTRA Associazione trasporti, Gennaio 2014
44. A. Lombardo, "TOSA, il demo bus con ricarica lampo: genesi del progetto e pillole di tecnica", Veicolo elettrici news, in Tecnologia, 4 giugno 2013.
45. LSMtron "LS Ultracapacitor. New-generation Energy Storage Devices with Low Resistance and Great Reliability", Maggio 2016. www.lsmtron.com
46. "MAXWELL technologies can communication specification. Applicable to Maxwell Technologies® BOOSTCAP® Energy Storage Modules for Heavy Duty Transportation Applications". www.maxwell.com
47. "Maxwell Heavy-Duty Transport Ultracap Modules for Electric Buses in Milan", Green Car Congress, Energy, technologies, issues and polizie for sustainable mobility, 2 Luglio 2008. <http://www.greencarcongress.com/>
48. Deliberazione 15 dicembre 2010 - ARG/elt 242/10, "Disposizioni speciali per l'erogazione dei servizi di trasmissione, distribuzione e misura e del servizio di dispacciamento ai fini della sperimentazione dei sistemi in bassa tensione di ricarica pubblica dei veicoli elettrici.
49. "Disposizioni speciali per l'erogazione dei servizi di trasmissione, distribuzione e misura e del servizio di dispacciamento ai fini della sperimentazione dei sistemi di ricarica pubblica dei veicoli elettrici. Documento di consultazione per la formazione di provvedimenti nell'ambito del procedimento avviato con deliberazione dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas 2 settembre 2010, ARG/elt 136/10.
50. L. J. Masson, J. Gartner, "EXECUTIVE SUMMARY: Electric Vehicle Charging Equipment in Europe. Residential, Commercial, DC Fast Charge, and Wireless Electric Vehicle Supply Equipment: Market Analysis and Forecasts, Research Report, Pike Research, 2012
51. J. Agenbroad, B. Holland, "Pulling Back the Veil on EV Charging Station Costs, RMIOUTLET plug into new ideas, Aprile 2014.
52. "Technical and economical challenges and stakes of the charge of electric vehicles", Nesem, Renault, Settembre 2013
53. E. Forward, K. Glitman, D. Roberts "An Assessment of Level 1 and Level 2 Electric Vehicle Charging Efficiency. to investigate potential applications of efficiency measures to various electric vehicles and their supply equipment, Vermont Energy Investment Corporation, Transportation Efficiency Group, Marzo 2013.
54. "Realizzazione nuova stazione di ricarica per autobus elettrici presso il deposito ATAF di Firenze, Le Cure", progetto esecutivo, relazione tecnica generale, ATAF, Giugno 2011.
55. "Energia corrente di trazione", brochure ENOTRAC. www.enotrac.com
56. G.Pede, "Fast charge and local public transport: an italian experience", ENEA, ESARS 2015, 3rd International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railways, Ship Propulsion and road vehicles, Aachen, Germania, 3-5 Marzo 2015.
57. FAST DC 20kW PLUG&CHARGE - CHAdEMO o CCS. www.e-station.it

58. *“Ricarica di veicoli elettrici. Guida al Servizio di Ricarica. Il vademecum essenziale per chi vuole offrire un servizio di ricarica a clienti, dipendenti, visitatori. Il punto di riferimento in Italia per qualità e competenza in sistemi di ricarica per veicoli elettrici.* www.e-station.it
59. J. Skov Johansen, *“Fast-Charging Electric Vehicles using AC”, Master’s Thesis, DTU Electrical Engineering, Settembre 2013*
60. *“EVlink. Soluzioni per la ricarica di veicoli elettrici TM. Catalogo 2012”, Shneider Electric.*
61. D. Chang, D. Erstad, E. Lin, A. Falken Rice, C. Tzun Goh, A. Tsao, J. Snyder, *“Financial Viability Of Non-Residential Electric Vehicle Charging Stations”, UCLA Luskin School of public Affairs.*
62. I. Carpinelli, *“Nuova soluzione di ricarica fast per autobus più "elettrici", Canale Energia, intervista ad ABB, ottobre 2015.* <http://www.canaleenergia.com/>
63. F. Caleno, *“I Progetti incentivati e approvati da AEEG. Progetto dimostrativo del modello DSO. Avanzamento e Risultati”, ENEL, Milano, 4 Ottobre 2012.*
64. G. Tomasso, M. Di Monaco, M. D’Arpino, U. Abronzini, *“Progettazione di un convertitore modulare per infrastrutture di ricarica con accumulo integrato”, Report RdS/PAR2013/099*
65. A. Genovese, B. Di Pietra, D. Sbordone, *“Sperimentazione per la compensazione dell’energia attiva/reattiva con la stazione di ricarica integrata presso i CR Casaccia”, Report RdS/PAR2013/103*

11 Appendice

11.1 Schede tecniche bus

GULLIVER

Tabella 59: Confronto delle caratteristiche tecniche dell'autobus GULLIVER 1994 vs2008

	VERSIONE 1994	VERSIONE 2008	Confronto con la precedente versione
COSTRUTTORE	TECNOBUS	TECNOBUS	
TIPO	GULLIVER U500 ESP	GULLIVER LR [LONG RANGE] U520 ESP	
LUNGHEZZA	5,09 m	5,32 m	+ 23 cm
LARGHEZZA	1,82 m	2,03 m	+ 21 cm
CAPACITA'	28 PASSEGGERI (8 POSTI A SEDERE)	30 PASSEGGERI (10 POSTI A SEDERE - 1 POSTO CARROZZELLA)	+ 2 posti a sedere + 1 posto carrozzella
AUTONOMIA	60 Km	130 Km	+ 70 km
BATTERIE	2 PACK BATTERIE AL Piombo 72 V - 600 A / 585 Ah	2 PACK BATTERIE Ni-NaCl ("ZEBRA") 85V-610 A / 836 Ah	
MOTORIZZAZIONE	MOTORE ELETTRICO CORRENTE CONTINUA CON ECCITAZIONE SERIE REGOLAZIONE a CHOPPER	MOTORE ELETTRICO CORRENTE CONTINUA CON ECCITAZIONE DERIVATA REGOLAZIONE a CHOPPER [MOSFET]	
POTENZA/COPPIA DI SPUNTO	24,8 KW / 235 NM	50KW / 294 NM	POTENZA +100% COPPIA + 25%
CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO ELETTRICO	LOGICA CABLATA (TRADIZIONALE)	LOGICA "CANBUS" (REG. DIGITALE) ILLUMINAZIONE A LED	
DOTAZIONI DI BORDO	VIDIMATRICE BIGLIETTI	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ARIA CONDIZIONATA SEPARATAMENTE PER VANO PASSEGGERI E POSTO GUIDA ➤ RAMPA DI ACCESSO CON PEDANA AUTOMATICA ➤ VIDIMATRICE BIGLIETTI ➤ EMMETTITRICE BIGLIETTI ➤ SISTEMA DI COMUNICAZIONE MULTIMEDIALE "MOBY" ➤ SISTEMA DI LOCALIZZAZIONE (AVM/GPS) 	AGGIUNTA AGGIUNTA AGGIUNTA AGGIUNTO AGGIUNTO

Fonte: ATAC (2010)

IVECO DAILY ELECTRIC

Tabella 60: Caratteristiche tecniche autobus IVECO DAILY elettrico

Passo (mm)	Lunghezza (mm)	Potenza max. (kW)	Modello	MTT (kg)
4100	7120	80	50C H3	5600

CARATTERISTICHE MECCANICHE	
2 Batterie al sodio ad alta densità + supercondensatori	S
3 Batterie al sodio ad alta densità + supercondensatori	O
Tablet da 7" semi-integrato	S
Ricarica veloce	O
Segnale acustico per pedoni	S
ESP9	S
LDWS (Lane Departure Warning System)	S
Sospensioni pneumatiche posteriori (ECAS)	O
CARROZZERIA E ALLESTIMENTO ESTERNO	
DRL (Daytime Running Lights)	S
Fendinebbia	O
Porta Passeggeri elettrica rototraslante	S
Predisposizione cartello di linea frontale	O
Vernice metallizzata	O
Paraurti e fascioni laterali in tinta veicoli	O
VETRI E CLIMATIZZAZIONE	
Aria condizionata vano passeggeri	O
Aspiratore aria a padiglione	S
Riscaldamento cabina	S
Riscaldamento indipendente vano passeggeri	O
Finestrini incollati atermici	S
Finestrini incollati scuri	O
Finestrini con doppi vetri	O

Fonte: IVECO

ALE' elettrico

Tabella 61: Caratteristiche tecniche autobus ALE' elettrico

M.T.T.	11,800 kg
Lunghezza	7,720 mm
Larghezza	2,200 mm
Altezza	3,050 mm
Passo	3,675 mm
Sbalzo	2,345 mm
Velocità massima	> 62 km/h
Posti (seduti, in piedi, disabili, autista)	n. 9 + 33 + 1 + 1 = 44
Autonomia	circa 130/150 km (in ciclo urbano)
Batterie	litio ferrite, ca. 180 kWh
Motore	Siemens, 85/150kW
Inverter	Siemens, DC-DC/IGBT MONO Inverter
Tempo di ricarica	minimo 2 ore

Fonte: Rampini

Tabella 62: Caratteristiche tecniche autobus E60elettrico

DIMENSIONI E PESI	
Lunghezza	6000 mm
Larghezza	2100 mm
Altezza	2980 mm
Sbalzo Anteriore	1180 mm
Sbalzo Posteriore	1120 mm
Passo	3700 mm
Diametro Di Volta	13800 mm
PTT	8200 kg

Motore e inverter : Siemens 50 kW nominali Asincrono trifase
Autonomia: 110 km.
Batterie: Litio ferrite, capacità 100 kWh
Ricarica : minimo 2 ore, possibilità di ricarica con pantografo
Freni : sistema di frenata rigenerativa
Velocità massima: 50 km/h

Fonte: Rampini

ZEUS

Tabella 63: Caratteristiche tecniche autobus ZEUS elettrico

DIMENSIONI PRINCIPALI (mm)	ZEUS
Lunghezza massima	5.890
Larghezza massima	2.070
Altezza massima (con A.C.)	2.810
Altezza minima da terra	200
Passo	3.720
Sbalzo ant. / post.	1.140/ 1.030
Diametro minimo di volta (est. ruota)	12.642
Altezza soglia porta	310
Tara con conducente	4.200 Kg

MOTORE

- Motore elettrico a corrente alternata, posteriore, raffreddato a liquido
- Controllo Trazione inverter tipo IGBT raffreddato a liquido
- Potenza max 30kW nominali, 60kW di picco
- Coppia max 260 Nm a 2.200 giri/min.
- Velocità max ~ 45 km/h

Fonte: BredaMenarinibus , 2013

E-VIVACITY

Tabella 64: Caratteristiche tecniche autobus E-VIVACITY elettrico

E-VIVACITY 2 porte				DIMENSIONI PRINCIPALI (mm)	E-VIVACITY
PASSEGGERI (standard) ^[1]				Lunghezza massima	8.000
Seduti	11	11	11	Larghezza massima	2.350
In piedi	36	40	44	Altezza massima (con A.C.)	2.979
Carrozzella	1	–	–	Larghezza corridoio ant. / post.	765 / 910
Strapuntini	–	2	–	Altezza minima da terra	140
Servizio	1	1	1	Passo	4.080
TOTALI	49	54	56	Sbalzo ant. / post.	2.030 / 1.890
				Diametro minimo di volta (fra muri)	15.073
				Altezza soglia porta	312
				Peso in ordine di marcia ^[2]	9.200

MOTORE	
▶ Motore	elettrico a corrente alternata, posteriore, raffreddato a liquido
▶ Controllo Trazione	inverter tipo IGBT raffreddato a liquido
▶ Potenza max	80kW nominali, 140kW di picco
▶ Coppia max	850 Nm
▶ Velocità max	80 km/h

Fonte: BredaMenarinibus, 2013

Volvo 7900 Hybrid elettrico

Tabella 65: Caratteristiche tecniche autobus VOLVO 7900 Hybrid elettrico

Lunghezza	12 m
Larghezza	2.55 m
Altezza	3,28 m
consentito PTT	19.000 kg
emissioni standard di	Euro 6
Motore diesel	/ 918 Nm Volvo D5K 240, 4 cilindri, motore a 240 CV in linea diesel con iniezione common rail
Motore elettrico	150 kW / 1200 Nm Volvo I-SAM
sistema di accumulo dell'energia	la batteria agli ioni di litio ad alta capacità
Trasmissione	Volvo I-Shift sistema di cambio marcia automatico
Sistema di caricamento	Opportunità di ricarica. sequenza di ricarica rapida completamente automatica. Tempo di ricarica rapida: fino a 6 min.
Sospensione	sospensioni pneumatiche a controllo elettronico con funzione di ginocchio
capacità di trasporto	Fino a 95 persone, 32 + 1 posti (pieghevole)
sistema di porte	Elettrico. 2 + 2 + 0 o 2 + 2 + 2.
sistema di climatizzazione	28 kW AC con zone climatiche separate per guidatore e passeggeri

Volvo 7900 Electric

Tabella 66: Caratteristiche tecniche autobus VOLVO 7900 elettrico

Dimensions and weights

Length [m]	12.0
Width [m]	2.55
Height [m]	3.28
Permitted GVW [kg]	19 000

Powertrain

Electric motor	
Power output, max [kW]	160
Torque, max [Nm]	400
Energy storage system High capacity Lithium-Ion battery	
Capacity [kWh]	4x19
Voltage	600 V
Transmission	Volvo 2-speed automated transmission

Charging system

Opportunity charging.
Fully automatic fast charging sequence.
Rapid charge time: up to 6 min.

Axles, suspension and steering

Front axle	Volvo RFS-Low beam axle
Rear axle	ZF AV 132
Suspension	Electronically controlled air suspension with kneeling function
Power steering	Electrically powered hydraulic steering
Tyres	275/70R 22.5"
Rims	Steel rims, 7.5x22.5"

Brakes

Volvo electronically controlled disc brakes (EBS 5).
Brake Blending function (all). The electric motor functions as a retarder and recovers braking energy.

Driver's environment

Spacious driver's environment with wide range of individual adjustment possibilities.
Volvo dashboard meets ISO16121 and VDV standards.
ISRI driver's seat.

Passenger capacity

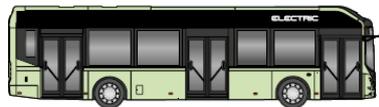
No. of passengers	105
No. of seats, max	34+1
Type of seats	Volvo City bus seats available in several variants, optimised for easy cleaning and maintenance.

Doors and door system

Door system	Electric
Door layout	2+2+2

Climate system

Zones	Separate climate zones for driver and passengers
Ventilation and heating	Powerful ventilation, roof heating units
AC max [kW]	26



Elife E12

Tabella 67: Caratteristiche tecniche autobus Elife E12 elettrico

BASIC SPECIFICATION

Dimensions (L W H)	11.980x2.500x3140
Net-Weight	12.500 Kg (with Batteries)
Total weight / GvW	EU 18.000 Kg
Drivetrain	120/240kW,1100/3600Nm, asynchronous AC-engine, efficiency 93%, water-cooled incl. regeneration (kinetic) of brake-energy
Brakes	WABCO, dual-circuit pneumatic 4-discs-brakes + E-brake, Parking brake: storage spring parking brake.EBS (including ABS, ASR)
Suspension	Pneumatic suspension WABCO/ECAS with kneeling-level-lowering
Tire	Michelin 275/70R22.5, 6+1,Aluminium alloy wheels rim
Air conditioning	Roof-top plant / electric, 20kw heat pump
Heating	Roof-top plant / electric, 25 kW heat pump
Doors	2 double doors, MTS door management (release by driver) - Door-opening buttons on the inside and outside.
Windows	Tinted Windows: sides / rear
Seats	Seating according to customer's request. Design to be agreed
Driver seat	VDV standard driver-seat (Continental)
Other	Halogen headlights. nternal LED lightening. Electronic display board in the front, rear, side and inner of the bus. Reverse monitor. Stop teller.

E-DRIVETRAIN

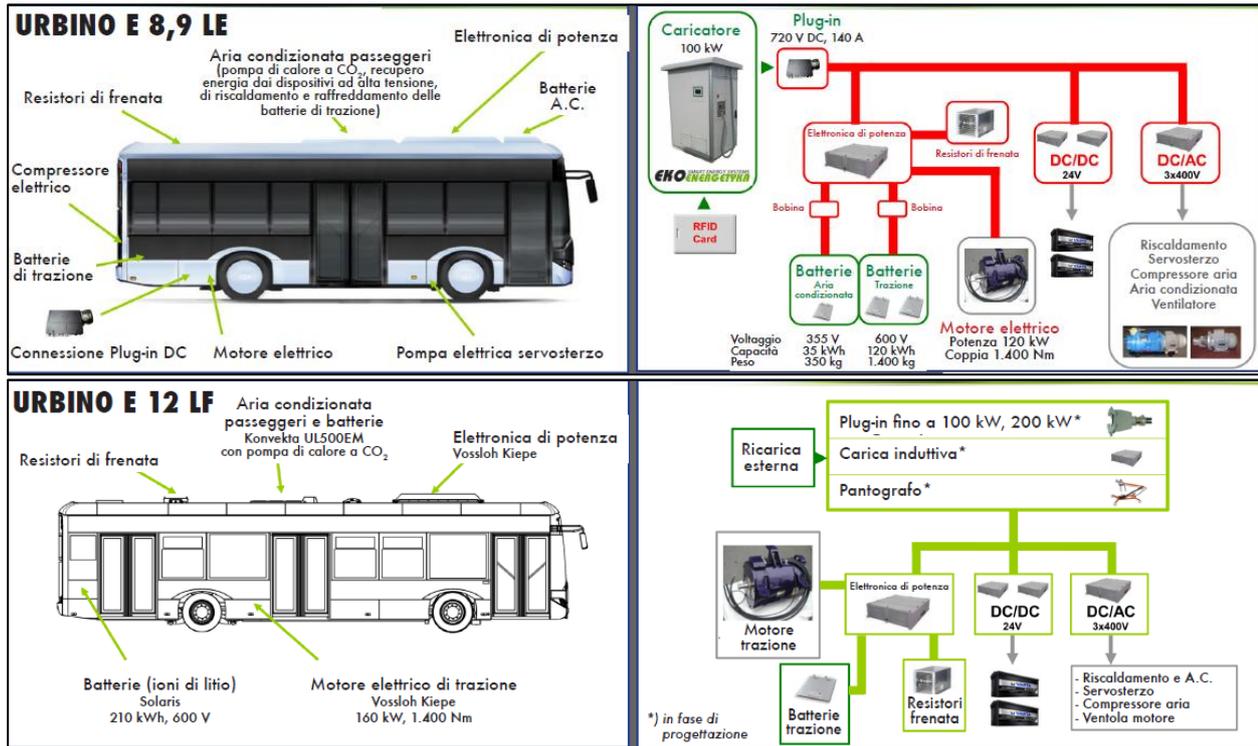
Drive Motor	120/240kW,1100/3600Nm, asynchronous motor with controller, water cooling.
Battery	LiFeSO4 single cell 90Ah/3.2V. Single cell battery management system, thermal containment, intrinsically safe.
Total capacity	up to 314 kWh (242, 270 and 314 kWh package optionally).
Energy Consumption	approx. 1,1 kWh/km.
Electric Air Pump	Screw pump 3KW, max. air pressure 10 bar.
Elec. Steering Pump	15L/min-1000rpm, 2.2/4.5kW.
BMS -Battery	Including battery box & BMS. LiFeSO4 single cell 90Ah/3.2V. Total capacity 314 kWh
Charger	Independent charger, 75~125KW.

Elife E18

Tabella 68: Caratteristiche tecniche autobus Elife E18 elettrico

BASIC SPECIFICATION		E-DRIVETRAIN	
Length * Width * Height	17990 * 2500 * 3180 mm (with a.c.)	Drive Motor	Drive Motor (Water Cooling), 160 / 230kW, 1450/3500N-m; Integrated Motor Controller(Water Cooling).
Front overhang/rear overhang	2730/3260 mm	Battery	LiFeSO4 single cell 90Ah/3.2V. Single cell battery management system, thermal containment, intrinsically safe.
Front wheel base/rear wheel base	5800 / 6200 mm	Total capacity	up to 518 kWh (414/466/518kWh package optionally)
Front/Middle/Rear wheel tread	2096/1860/1860 mm	Energy Consumption	approx. 1,1 kWh/km.
Complete bus mass	18000 kg	High voltage auxiliary control box	400A, Including Vehicle control ECU, Two 110A DC/DC, Network Bridge system and Charging Control system
Max. loading mass	28000 kg	Electric Air Pump	Screw pump 3KW, max. air pressure 10 bar.
Grade ability	≥20%	Elec. Steering Pump	15L/min-1000rpm, 2.2/4.5kW.
Max. speed	80 km/h	Charger	On-Board or Independent charger (included), 600V/66/125A,40/75kW
Min. turning diameter	≤24m		
Approach/departure angle	7°/ 6°		
Min.ground clearance	≥190mm		
Inner height	≥2200mm		
Passenger/seat	135/48 + 1 disable place		
LOW FLOOR CHASSIS		BUS BODY	
Front/middle/rear axle	ZF front / middle / rear axle, max. capacity 7500/11500/13000 Kg, Disc brake	Bus construction	All-bearing body structure, steel / aluminium framework, aluminium alloy covering plate.
Bus hinge plate	Hubner hinged plate with connecting shed	Paint	Imported ICI metallic paint, customized pattern design.
Brake system	Disc service brake, storage spring parking brake. WABCO ABS	External lighting	E-marked, side lights for turning signal is easy to replace.
Suspension	WABCO ECAS, air suspension F.2 / M.4 / R.4	Front	The cover of front headlights and bumper can be opened independently. There are compressed air valve and low-voltage battery charging connector.
Tire	Michelin 275/70R22.5, 10 pcs, Aluminium alloy wheels boss	Rear view mirror	Electric defroster.
Others	Holand Groeneveld Centralized lubrication system, all controls through CAN bus. DWP dashboard	Air conditioner	2 sets of electric A/C, cooling and heating
		Windows	White laminated front windshield, tempered rear glass, light gray side glass, white passenger door glass. Side windows are fully closed except the driver window is sliding.
		Passenger Door	Pneumatic passenger door with anti-pinch system, front in-ward swing door, middle & rear are out-ward sliding doors, and manual ramp for disabled people at middle door place.
		Interior decoration	Independent driving area, Continental DWP dashboard, bus stop brake switched on by hand on drivers cockpit, neutral sunshade. LED interior lighting, stainless steel handrails, aluminium alloy air duct with removable structure access door and square head I
		Seat	Isringhausen driver seat, air suspension, alam function. FAINSA passenger seat, good quality.
		Floor	The Finland wood floor covered with the LG floor leather.
		Audio / Video	No need install, reserves the place and harness.
		Others	Traveling data recorder, reserved GPS contactor, LCD reversing monitor (saiwei 7-inch LCD screen), stop teller, Hella electric horn, electronic clock.

Tabella 69: Caratteristiche tecniche autobus Urbino elettrico



Fonte: Solaris S.p.A

Tabella 70: Caratteristiche tecniche autobus Urbino elettrico -8 metri

Sistema di propulsione		
Motore	Standard	motore asincrono 120 kW
	Opzione	motore asincrono 160 kW
Batterie di trazione	Standard	batterie ioni di litio (la capacità viene determinata in funzione del profil di missione) operativo fino a 24 ore al giorno (a seconda della capacità delle batterie e del sistema di ricarica utilizzato)
Sistema di ricarica		
Sistema di ricarica delle batterie	Standard	plug-in
	Opzione	pantografo (possibile solo in alcune configurazioni)

Tabella 71: Caratteristiche tecniche autobus Urbino elettrico -12 metri

Sistema di propulsione		
Motore	Standard	motore asincrono 160 kW
	Opzione	motori elettrici integrati nell'asse 2x60 kW
Batterie di trazione	Standard	batterie ioni di litio (la capacità viene determinata in funzione del profil di missione) operativo fino a 24 ore al giorno (a seconda della capacità delle batterie e del sistema di ricarica utilizzato)
Sistema di ricarica		
Sistema di ricarica delle batterie	Standard	plug-in
	Opzione	pantografo induzione

Tabella 72: Caratteristiche tecniche autobus Urbino elettrico -18 metri

Sistema di propulsione	
Motore	Standard motore asincrono 240 kW
Batterie di trazione	Standard batterie ioni di litio (la capacità viene determinata in funzione del profilo di missione) operativo fino a 24 ore al giorno (a seconda della capacità delle batterie e del sistema di ricarica utilizzato)
Sistema di ricarica	
Sistema di ricarica delle batterie	Standard plug-in Opzione pantografo induzione

Fonte: Solaris S.p.A

11.2 Sistemi per la carica delle batterie degli autobus

Modalità di carica flessibile (brevetto IVECO) per Daily

	STAZIONE DI RICARICA PUBBLICA (@400V CA/16A 3,5/7/11 kW) 10 ore	STAZIONE DI RICARICA PUBBLICA "VELOCE" (@400V CA/32A 22 kW) 2 ore
	STAZIONE DI RICARICA PRIVATA (@400V CA/16A 3,5/7/11 kW) 10 ore	RICARICA DOMESTICA (@230V CA/16A 3,5 kW) 24 ore

Fonte: Iveco

ABB TOSA (Trolleybus Optimisation System Alimentation)

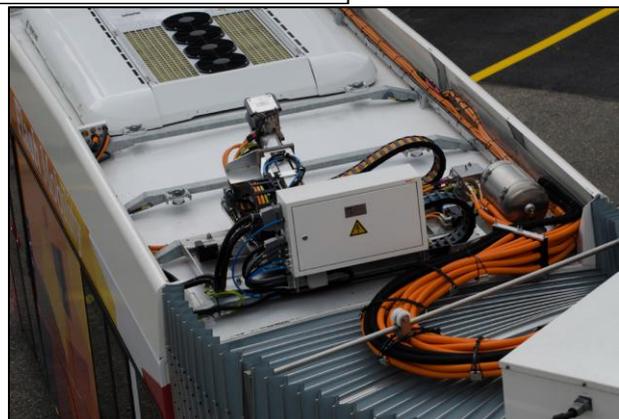
Feeding stations: Flash/Terminus/Depot

There are three types of feeding stations:

- Flash-charging stations at selected bus stops providing a short high-power boost at 600 kilowatt (kW) for 15 seconds (sec).
- Terminal feeding stations delivering more prolonged charges of 4 – 5 minutes (min) at 400 kW.
- Depot stations applying a longer charge to provide the energy required to travel between the line and the depot location. Buses are recharged at 45 kW for about 30 min.

High speed and fully automatic energy transfer system

- Fast connection to high-power charger in less than 1 sec
- Fully automatic so that the driver is not distracted by the connection process and can focus on passengers, pedestrians and traffic.
- Full compensation for distance to sidewalk: 0 to 70 cm
- Receptacle: 3-meter length to optimize approaching speed
- High power: < 600 kW
- Energy efficiency: Less than 1 percent loss
- Health and safety: Compliant with RNI norms and directives (ICNIRP)
- Ambient conditions: Year round operation with snow, rain, hail, fog and ice. Resistant to dust and pollen pollution.



Fonte: ABB "Technology flyer TOSA – Enabling a new generation of electric buses Flash-charging technology for sustainable e-mobility"

VOLVO – ABB “opportunity charging” system for Electric and Electric Hybrid buses

Overall dimensions		Typical value
Total height of charging carrier (m)		5.3
Free height under charging interface in stowed position (m)		4.6
Height of charging interface during charging (m)		3.0-3.2
Height of power charger (m)		2.3
Width of power charger (m)		3.8
Depth of power charger (m)		2.3
Distance between charger and charging pylon (m)		0-30
Specifications		
Input voltage (VAC)		Refer to IEC 60038: IEC standard voltages
Frequency (Hz)		50/60 ±2
Total Harmonic Distortion, THD (%)		<8
Maximum Charging Power Level for Electric Hybrid (kW)		150
Maximum Charging Power Level for Electric (kW)		300
Output DC voltage (VDC)		500-750
Max output current at 750 VDC (A)		200/400
Ambient temperature (°C)		-25 - +55

11.3 Open data in Italia

- SARDEGNA: <http://www.sardegnamobilita.it/opengovernment/opendata/> (I dati sono aggiornati a tutto il 2016 per tutta la regione SARDEGNA)
 - Nuoro, Cagliari, Olbia, Sassari, Linee extraurbane
- PUGLIA
 - Bari: <http://opendata.comune.bari.it/dataset/trasporto-pubblico-locale> (Non usano GTFS, ci sono soltanto dati linee e fermate aggiornate al 2014)
 - Lecce: <http://dati.comune.lecce.it/dataset/trasporto-pubblico-locale> (dati aggiornati al 2016)
- EMILIA ROMAGNA: <https://www.tper.it/tper-open-data>
 - Bologna (I dati sono aggiornati a tutto il 2016)
 - Ferrara (I dati sono aggiornati a tutto il 2016)
- TOSCANA: <http://dati.toscana.it/dataset/rt-oraritb> (I dati sono aggiornati al 2016)
 - Firenze, Empoli, Lucca, Pisa, Pistoia, Prato, Siena
- LOMBARDIA
 - Milano: <http://dati.comune.milano.it/news/35-novita-del-portale/232-da-oggi-tutto-il-tpl-trasporto-pubblico-locale-di-milano-sul-portale-open-data.html> (dati aggiornati al 2016)
- PIEMONTE <http://www.dati.piemonte.it/catalogodati/dato/100939-servizio-programmato-del-trasporto-pubblico-regione-piemonte-autobus.html> (Dati aggiornati al 2016)
- CALABRIA
 - Reggio Calabria: <http://dati.reggiocal.it/?s=atam> (non usa dati GTFS, non ci sono coordinate geografiche, i dati sono aggiornati al 2016)
 - Matera (<http://dati.comune.matera.it/>) (I dati non sono aggiornati, ultimo aggiornamento 2014)
- LAZIO
 - Roma: http://dati.comune.roma.it/cms/it/dettaglio_turismo_e_mob.page;jsessionid=ycdcC5ous6n67YA4q4S+1NI1?contentId=DTS4423 (dati aggiornati)
- TRENTO: (<http://dati.trentino.it/dataset/trasporti-pubblici-del-trentino-formato-gtfs>) (dati aggiornati al 2016) ci sono dati sull'urbano e sull'extraurbano
- VENETO:
 - Venezia: <http://dati.venezia.it/?q=content/actv-general-transit-feed-specification-gtfs> (dati aggiornati 2016)
- SICILIA
 - Palermo: <https://www.comune.palermo.it/opendata.php> (dati aggiornati 2016)
 - Enna e provincia (Dati non aggiornati, ultimo aggiornamento al 2015)
- CAMPANIA
 - Napoli: <http://www.comune.napoli.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/29233> (dati aggiornati al 2016)

1.1 Veicoli

DIESEL									
Categorie	NOME	Tipologia	Lunghezza [m]	Prezzo [€]	Standard emissivo	Potenza cv [kW/giri]	Cilindrata c.c.	Peso lordo [kg]	Tara con conducente [kg]
CLASSE A	VDL Bus&Coach - MID CITY MLF 69-160	minibus	7,7	152.000	Euro 5	163 (120)/3.800	2.143	5.300	
CLASSE A	Iveco Bus - DAILY CITY5 50C	minibus	7,1	78.000	Euro 6	170 (125)/3.500	2.998	5.600	
CLASSE B	Mercedes sprinter kombi CDI k37/32	minibus	5,9	32.860	euro 6	129 (95)/3800	2.143	3.200	2.195
CLASSE B	Iveco Bus Daily Line 40C17 PRA euro VI	minibus	6	50.000	Euro 6	170 (125)/3500	2.998	4.500	
CLASSE B	Mercedes sprinter kombi CDI k43/35	minibus	6,9	36.870	Euro 6	129 (95)/3800	2.143	3.500	2.445
CLASSE B	Mercedes Sprinter Tranfer 34	minibus	7	83.500	erio 6	129 (95)/3800	2.143	3.880	
CLASSE B	Mercedes Sprinter Tranfer 45	minibus	7,4	90.000	euro 6	129 (95)/3800	2.143	5.000	
CLASSE B	Iveco Bus Daily Way 50C17	minibus	7,7	80.500	Euro 5			5.600	4.020
CLASSE I	Mercedes - SPRINTER CITY 35	Urbano	7	135.000	Euro 6	129 (95)/3.800	2.143	5.000	
CLASSE I	Sitcar - CITY TOUR	Urbano	7	108.571	Euro 5	170 (125)/3.000-3.500	2.998	5.600	
CLASSE I	Mercedes - SPRINTER CITY 65	Urbano	7,7	165.000	Euro 6	163 (120)/3.800	2.143	5.650	
CLASSE I	Mercedes Sprinter City 77 Euro VI	Urbano	7,7	129.000	Euro 6			6.800	4.280
CLASSE I	Otokar - NAVIGO City	Urbano	7,7	136.000	Euro 6	182 (134)/2.300	4.462	10.000	6.750
CLASSE I	Rampini - ALÈ	Urbano	7,7	220.000	Eev	180 (132)/2.400	4.580	10.500	6.900
CLASSE I	Bredamenarinibus - VIVACITY+ C	Urbano	7,9	245.000	Euro 5	215 (158)/2.300	4.764	13.000	8.500
CLASSE I	Mercedes - SPRINTER CITY 77	Urbano	8,7	193.000	Euro 6	163 (120)/3.800	2.143	6.800	4.280
CLASSE I	Otokar - VECTIO 250 C	Urbano	9,3	215.000	Euro 6	250 (184)/2.300	6.871	13.500	
CLASSE I	Bredamenarinibus - VIVACITY+ M	Urbano	9,4	268.000	Euro 5	216 (158)/2.300	4.764	15.000	9.700
CLASSE I	Van Hool - A 309	Urbano	9,4	285.000	Eev	250 (184)/2.300	6.871	16.500	10.000
CLASSE I	Man - LION'S CITY M A47/3T	Urbano	10,5	331.000	Eev	260 (191)/2.300	6.871	18.000	10.700
CLASSE I	Mercedes - CITARO K	Urbano	10,5	325.000	Euro 5	286 (210)/2.200	6.370	19.000	10.037
CLASSE I	Bredamenarinibus - AVANCITY+ N	Urbano	10,8	308.000	Euro 5	290 (213)/2.100	7.146	18.000	11.350
CLASSE I	Van Hool - A 330N	Urbano	10,8	291.700	Eev	320 (235)/1.900	10.520	18.000	
CLASSE I	Scania - OMNACITY	Urbano	10,9	334.560	Eev	280 (206)/1.900	9.291	18.000	11.845
CLASSE I	Bredamenarinibus - AVANCITY+ L	Urbano	12	319.000	Euro 5	290 (213)/2.100	7.146	19.000	11.500

ACCORDO DI PROGRAMMA MISE-ENEA

Categorie	NOME	Tipologia	Lunghezza [m]	Prezzo [€]	Standard emissivo	Potenza cv [kW/giri]	Cilindrata c.c.	Peso lordo [kg]	Tara con conducente [kg]
CLASSE I	Man - LION'S CITY A21	Urbano	12	339.000	Eev	280 (206)/1900	10.518	19.000	12.000
CLASSE I	Man - LION'S CITY A37	Urbano	12	339.000	Eev	290 (213)/2.300	6.871	19.000	12.000
CLASSE I	Mercedes - CITARO	Urbano	12	347.000	Euro 5	287 (210)/2.200	6.370	19.000	10.770
CLASSE I	Otokar - KENT C	Urbano	12	270.000	Euro 6	284 (209)/2.100	6.690	18.000	10.960
CLASSE I	Scania - CITYWIDE LF CN 280 UB	Suburbano	12	345.500	Eev	280 (206)/1.900	9.291	19.000	11.845
CLASSE I	Scania - OMNACITY	Urbano	12	341.700	Eev	280 (206)/1.900	9.291	19.000	11.845
CLASSE I	Van Hool - A 330L	Urbano	12	295.500	Eev	320 (235)/1.900	10.520	18.000	
CLASSE I	VDL Bus&Coach - CITEA LLE 120-205/225	Urbano	12	250.000	Euro 5	225 (165)/2.300	6.690	14.440	8.900
CLASSE I	VDL Bus&Coach - CITEA SLF	Urbano	12	262.500	Euro 5 - Eev	249 (183)/2.200	9.200	19.000	10.500
CLASSE I	VDL Bus&Coach - CITEA SLE	Urbano	12,9	267.500	Euro 5 - Eev	249 (183)/2.200	9.200	19.000	11.350
CLASSE I	Scania - CITYWIDE LE CK 360 UB	Suburbano	13,7	354.706	Eev	360 (265)/1.900	9.291	26.000	17.976
CLASSE I	VDL Bus&Coach - CITEA XLE	Urbano	14,5	331.250	Euro 5 - Eev	310 (228)/2.200	9.200	26.000	13.600
CLASSE I	Man - LION'S CITY G A23/4T	Urbano	18	496.000	Eev	320 (235)/1.900	10.518	30.000	
CLASSE I	Mercedes - CITARO G,	Urbano	18	521.000	Euro 5 - Eev	299 (220)/2.000	11.967	29.000	16.400
CLASSE I	Solaris - URBINO	Urbano	18	445.000	Euro 5	310 (228)/2.200	9.186	24.000	
CLASSE I	Van Hool - AG 300	Urbano	18	397.600	Eev	320 (235)/1.900	10.520	24.000	
CLASSE I	Bredamenarinibus - AVANCITY+S	Urbano	18,1	479.000	Eev	320 (2300)/1.900	10.518	28.000	17.000
CLASSE I	Man - LION'S CITY GL A40/4T	Urbano	18,7	512.000	Eev	360 (265)/1.900	10.518	30.000	
CLASSE II	Otokar - NAVIGO U	Linea	7,1	141.000	Euro 6	182 (134)/2.300	4.462	10.000	6.750
CLASSE II	Otokar - NAVIGO U	Linea	7,7	150.000	Euro 6	182 (134)/2.300	4.462	10.000	6.750
CLASSE II	Solaris - URBINO 8,9 LE	Linea	8,9	43.000	Euro 5	250 (184)/2.300	6.690	14.500	
CLASSE II	Otokar - VECTIO 250 UH	Linea	9,3	229.000	Euro 6	250 (184)/2.300	6.871	13.500	
CLASSE II	Temsas - METROPOL IC	Linea	9,7	195.000	Euro 5	250 (183)/2.300	6.871	13.500	8.980
CLASSE II	Irizar - i4 H K280/320	Linea	10,7	286.000	Euro 5	280 (206)/1.900	9.291	18.000	
CLASSE II	Setra - MULTICLASS S 412 UL	Linea	10,8	337.000	Euro 6	299 (220)/2.200	7.694	18.000	
CLASSE II	Volvo - 8900 LOW ENTRY	Linea	10,8	289.000	Euro 6	320 (235)/2.100	7.700	18.000	
CLASSE II	Scania - OMNIEXPRESS 3.20	Linea	11	291.890	Eev	320 (235)/1.900	9.291	18.000	11.500
CLASSE II	Scania - OMNIEXPRESS H,	Linea	11	329.600	Eev	320 (235)/1.900	9.291	18.000	11.890
CLASSE II	Scania - OMNIEXPRESS HD	Linea	11	345.050	Eev	360 (265)/1.900	9.291	18.000	12.800
CLASSE II	Bredamenarinibus - LANDER	Linea	12	290.000	Euro 5	360 (264)/1.900	10.518	18.000	12.600

Categorie	NOME	Tipologia	Lunghezza [m]	Prezzo [€]	Standard emissivo	Potenza cv [kW/giri]	Cilindrata c.c.	Peso lordo [kg]	Tara con conducente [kg]
CLASSE II	Man - LION'S CITY LE A78/2T	Linea	12	304.000	Eev	260 (191)/2.300	6.871	18.000	
CLASSE II	Man - LION'S CITY Ü A20/2T	Linea	12	352.000	Eev	320 (235)/1.900	10.518	18.000	12.200
CLASSE II	Mercedes - CITARO LEÜ	Linea	12	344.500	Euro 5 - eev	299 (220)/2.000	11.967	18.000	11.550
CLASSE II	Solaris - URBINO 12 LE	Linea	12	283.500	Euro 6	310 (228)/2.200	9.186	19.000	
CLASSE II	Mercedes - INTEGRO	Linea	12,1	309.000	Euro 5	299 (220)/2.000	11.967	18.000	
CLASSE II	Otokar - TERRITO U	Linea	12,1	235.000	Euro 6	310 (228)/2.100	6.690	18.000	
CLASSE II	Volvo - 8900	Linea	12,1	299.000	Euro 6	320 (235)/2.100	7.700	18.000	
CLASSE II	Irizar - i4 H K280/320/360	interurbano	12,2	290.000	Euro 5-eev	280 (206)/1.900	9.291	18.000	12.500
CLASSE II	Setra - MULTICLASS S 415 H	interurbano	12,2	365.000	Euro 6	360 (265)/1.800	10.672	18.000	
CLASSE II	Volvo - 8900	Linea	12,2	309.000	Euro 6	320 (235)/2.100	7.700	18.000	
CLASSE II	Man - LION'S REGIO	interurbano	12,3	312.000	Eev	360 (265)/1.900	10.518	18.000	12.440
CLASSE II	Scania - CITYWIDE LE CK 320 UB	Linea	12,7	339.900	Eev	320 (235)/1.900	9.291	18.000	12.384
CLASSE II	Setra - MULTICLASS S 416 UL BUSINESS	Linea	12,7	320.000	Euro 6	299 (220)/2.200	7.694	18.000	
CLASSE II	Scania - OMNIEXPRESS HD	interurbano	12,8	365.650	Euro 5	400(294)/1.900	12.742	18.000	12.800
CLASSE II	Irizar - i4 H K320/360	Linea	12,9	300.000	Euro 5	320 (235)/1.900	9.291	18.000	
CLASSE II	Irizar - i4 H K320/361	Linea	12,9	307.000	Eev filtro	360 (265)/1.900	9.291	18.000	
CLASSE II	Mercedes - INTEGRO M	Linea	13	322.000	Euro 4	299 (220)/2.000	11.967	18.000	,
CLASSE II	Setra - MULTICLASS S 416 H	Linea	13	375.000	Euro 6	360 (265)/1.800	10.672	18.000	
CLASSE II	Volvo - 8900	Linea	13,1	329.000	Euro 6	320 (235)/2.100	7.700	18.000	
CLASSE II	Volvo - 8900 LOW ENTRY	Linea	13,1	319.000					
CLASSE II	Setra - MULTICLASS S 417 UL BUSINESS	Linea	13,4	335.000	Euro 6	299 (220)/2.200	7.694	18.000	
CLASSE II	Irizar - i4 H K360	Linea	13,6	331.000	Eev filtro	360 (265)/1.900	9.291	22.000	
CLASSE II	Scania - OMNIEXPRESS HD		13,7	396.550	Euro 5	440 (324)/1.900	12.742	26.000	14.900
CLASSE II	Man - LION'S REGIO L	Linea	13,9	319.915	Eev	360 (265)/1.900	10.518	24.900	15.000
CLASSE II	Setra - MULTICLASS S 417 UL	Linea	14	390.000	Euro 6	360 (265)/1.800	10.672	24.000	14.550
CLASSE II	Irizar - i4 H/M K360	Linea	14,3	332.000	Eev filtro	360 (265)/1.900	9.291	24.000	
CLASSE II	Scania - OMNIEXPRESS H	Linea	14,7	391.400	Euro 5	440 (324)/1.900	12.742	26.000	15.500
CLASSE II	Scania - OMNIEXPRESS HD	Linea	14,7	402.900	Euro 5	440 (324)/1.900	12.742	26.000	15.500
CLASSE II	Irizar - i4 H K360	Linea	15	335.000	Eev filtro	360 (265)/1.900	9.291	24.000	

ACCORDO DI PROGRAMMA MISE-ENEA

CLASSE II	Mercedes - CITARO LÜ	Linea	15	434.000	Euro 5 - eev	299 (220)/2.000	11.967	25.000	14.500
CLASSE II	Mercedes - INTEGRO L	Linea	15	397.500	Euro 5	354 (260)/2.000	11.967	24.000	
CLASSE II	Solaris - URBINO 15 LE	Linea	15	384.750	Euro 5	310 (228)/2.200	9.186	24.000	
CLASSE II	Mercedes - CITARO GÜ	Linea	18	516.000	Euro 5 - eev	299 (220)/2.000	11.967	29.000	16.550
CLASSE III	Isuzu Turquoise	Minibus	7,7	129.000	Euro 5	190 cv (140kW)/2600 rpm	5.193	10.400	6.130
Scuolabus	Iveco Bus - DAILY POP 40C17 Sbalzo Lungo PRA	Scuolabus	6	58.000	Euro 6	170 (125)/3.500	2.998	4.500	
Scuolabus	Iveco Bus - DAILY POP 50C17 PRA	Scuolabus	7,1	70.000	Euro 6	170 (125)/3.500	2.998	5.600	
Scuolabus	Iveco Bus - DAILY POP 50C17	Scuolabus	7,5	74.500	Euro 6	170 (125)/3.500	2.998	5.600	

Figura 44: Caratteristiche tecniche e di costo per autobus diesel

Fonte: Elaborazione ENEA su dati provenienti da diverse fonti

METANO									
Categorie	Nome	Tipologia	Lunghezza [m]	Prezzo	Standard emissivo	Potenza cv [kW/giri]	Cilindrata c.c.	Peso lordo [Kg]	Tara con conducente [Kg]
CLASSE A	Iveco Bus - DAILY CITYS CNG	minibus	7,1	83.200	Euro 6	136 (100)/2.730-3.500	2.998	5.600	
CLASSE B	Iveco Bus - DAILY LINE CNG 50C	minibus	7,1	73.000	Euro 6	136 (100)/2.730-3.500	2.998	5.600	
CLASSE I	Bredamenarinibus - VIVACITY+ C CNG	Urbano	8	305.000	Eev	231 (170)/2.200	6.880	13.000	9.100
CLASSE I	Bredamenarinibus - AVANCITY+ N CNG	Urbano	10,8	365.000	Eev	279 (205)/2.200	6.880	19.000	11.750
CLASSE I	Bredamenarinibus - AVANCITY+ L CNG	Urbano	12	378.000	Eev	279 (205)/2.200	6.880	19.000	12.065
CLASSE I	Man - LION'S CITY A21/3T CNG	Urbano	12	416.000	Eeev	310 (228)/2.000q	12.816	19.000	
CLASSE I	Mercedes - CITARO CNG	Urbano	12	439.000	Eev	326 (240)/2.000	11.960	19.000	12.300
CLASSE I	Solaris - URBINO 12 CNG	Urbano	12	337.000	Eev	290 (213)/2.000	7.790	19.000	
CLASSE I	Van Hool - A 330L CNG	Urbano	12	350.215	Eev	310 (228)/2,000	12.816	19.000	
CLASSE I	Solaris - URBINO 15 LE CNG	Urbano	15	438.750	Eev	320 (238)/2.000	8.845	24.000	
CLASSE I	Man - LION'S CITY G A23/4T CNG	Urbano	18	552.000	Eev	310 (228)/2.000q	12.816	30.000	
CLASSE I	Bredamenarinibus - AVANCITY+ S CNG	Urbano	18,1	560.000	Eev	310 (228)/2.200	12.800	28.000	17.500
CLASSE I	Man - LION'S CITY GL A40/4T CNG	Urbano	18,7	568.000	Eev	310 (228)/2.000q	12.816	30.000	
Scuolabus	Iveco Bus - DAILY POP CNG 50C PRA	Scuolabus	7,1	75.200	Euro 6	136 (100)/2.730-3.500	2.998	5.600	

Figura 45: Caratteristiche tecniche e di costo per autobus metano

Fonte: Elaborazione ENEA su dati provenienti da diverse fonti

ELETTRICO MINI									
Marca	Modello	Lunghezza [m]	Posti totali	Peso lordo	Potenza di picco [kW]	Batterie	Energia complessiva [kWh]	Autonomia [km]	Tipo di ricarica
Tecnobus GULLIVER	Gulliver U500 ESP	5,32	28		50	zebra		130	n.d
Bredamenarini	ZEUS Classe I	5,9	32	6500	60	78 celle polimeri di litio	69,26	120	22 A 380 V,-10 ore
SKD	Stratos LE 30 E	6,87	30	7200	84			150	3*400 V,-165 min
Iveco Bus	DAILY WAY A50C/E Classe B	6,9	16	5.600	80	3 o 4 moduli Zebra Na/NiCl2			
Iveco Bus	DAILY ELECTRIC 50	7,1	18	5.601	80	3 batterie sodio alta densità + superc.		280	rapida 2 ore

ELETTRICO MIDI									
Marca	Modello	Lunghezza [m]	Posti totali	Peso lordo	Potenza di picco [kW]	Batterie	Energia complessiva [kWh]	Autonomia [km]	Tipo di ricarica
Karsan Europe (Turchia)	JEST ELECTRIC Classe A	5,8		11.800	125	Ioni di li	66	120	20 A 360 V- 1,2 h
Eco Power Technology	ELFO Classe I	7,5	46	11.500	162	ioni litio		100	
Eco Power Technology	CACCIAMALLI ELFO Enova Edem	7,5	34	11.500	120	piombo ioni litio			
Rampini	ALÈ EL Classe I	7,7	44	11..800	150	litio ferrite	180	130/150	rapida 2 ore
Bredamenarini	E-VIVAVCITY Classe I	8	52	13.000	140	648 litio-ferro-fosfati	187	200	rapida 4 ore
Solaris	URBINO ELECTRIC Classe I	8,9	62	14.000		Ioni di litio	120	120	2h per 40*2 kW
BYD	BYD 8 meters	8	57	13.000		Fosfati di ferro	183	298	

ELETTRICO STANDARD									
Marca	Modello	Lunghezza [m]	Posti totali	Peso lordo	Potenza di picco [kW]	Batterie	Energia complessiva [kWh]	Autonomia [km]	Tipo di ricarica
Volvo Buses	ELECTRIC CONCEPT BUS	10,7	85	18.000	155	Ioni di litio	4* 19 kWh		plug in depot o biberonaggio Siemens/Abb
Solaris (Polonia)	URBINO ELECTRIC	12	85	19.000	160	Ioni di litio	210		
VDL Bus&Coach	CITEA SLF 120/Electric	12	100	19.000	160				
Bombardier	Primove	12	100		280	Ioni di litio	60		Charging power: 200 kW, Grid connection: AC 400 V or DC 750 V
Bredamenarini	E-life	12	64	18.000	90	litio-ferro-fosfati		200	
VOLVO	7900 Electric	12	105	19.000	160	Ioni di litio	76		rapida 6 min
AMZ	CitySmile 10E	10	85	15.500	230			170	
BYD	BYD 10,8 meters	10,8	78	18.000	180	Fosfati di ferro	324	288	4h per 40*2 kW
BYD	BYD E-12	12	78	18.000	180	LeFePO4	324	317	4h per 40*2 kW
Škoda	26 BB HE PERUN	12	82	19.000	160	Li-Pol (NMC)	211	150	Plug-in COMBO stand 0,5 C (200A) / 1,6 C ≤ 6 h
Škoda	HE Ultra Fast ChargerPERUN	12	85	19.000	160	Ioni di litio	78	30	COMBO2, plug-in (200 A, 1,2 C)/roof (up to 8,5 C) – Fully automated Škoda 1C (370A) / 6C ≤ 8 minutes
SOR	SOR EBN 10.5	10,37	85	16.500	120	Ioni di litio			400 V -4 ore

ELETTRICO ARTICULATED									
Marca	Modello	Lunghezza [m]	Posti totali	Peso lordo	Potenza di picco [kW]	Batterie	Energia complessiva [kWh]	Autonomia [km]	Tipo di ricarica
BYD	BYD E-18	18	150	29.000	300		270	220	3,5h per 40*2 kW
Solaris- Bombardier	Urbino 18 electric	18	126	27.000	240	PRIMOVE battery 90 Li-ion	90		PRIMOVE chargin 200, 200kW grid connection AC 400V or DC 750V
TOSA	Hess BGT-N2D	18	133	29.000					biberonaggio 15 s a 400kW o 3-4min a 200kW

Figura 46: Caratteristiche tecniche e di costo per autobus elettrici

Fonte: Elaborazione ENEA su dati provenienti da diverse fonti

11.4 Questionario alle aziende TPL

Questionario sull'Elettrificazione del trasporto su gomma rivolto alle Aziende TPL

Nell'ambito dell'Accordo di Programma ENEA – MISE sulla "Ricerca Sistema Elettrico" (RSE) particolare attenzione viene posta sul tema della transizione del trasporto Pubblico Locale verso l'elettrico.

Il processo di elettrificazione delle reti di trasporto pubblico locale può essere sicuramente agevolato dall'utilizzo di procedure, il più possibile standardizzate, di analisi di fattibilità tecnica ed economica degli interventi. Per tale motivo si è deciso di realizzare un sistema software di supporto alla conversione in elettrico del trasporto su gomma che prenda in esame le diverse tipologie di autobus elettrici e di sistemi di ricarica, attualmente disponibili sul mercato, ma anche soluzioni tecnologiche più evolute ancora in fase sperimentale.

In questo quadro si inserisce l'indagine web predisposta da ENEA ed ASSTRA e finalizzata ad effettuare una *user-need analysis* fondamentale per progettare e sviluppare un sistema software in grado di suggerire una risposta maggiormente rispondente alle necessità degli operatori e corredata da valutazioni quantitative.

I risultati dell'indagine saranno conservati e tutelati da ENEA nel rispetto delle norme sulla privacy.

Ci sono 17 domande all'interno di questa indagine.

Dati anagrafici azienda

Azienda: *

Città: *

Responsabile aziendale della compilazione: *

Scrivere le proprie risposte qui:

Servizio:	<input type="text"/>
Nome:	<input type="text"/>
Cognome:	<input type="text"/>
E-Mail:	<input type="text"/>

Dati facoltativi:

Scrivere le proprie risposte qui:

Telefono:	<input type="text"/>
Fax:	<input type="text"/>

Autorizzo il trattamento dei dati ai sensi del D.Lgs.196/2003 *

Scegli solo una delle seguenti

- Sì
 No

¹ Nota: Le domande contrassegnate da (*) richiedono obbligatoriamente una risposta.

Parco veicoli su gomma

Numero veicoli su gomma per alimentazione e dimensione adibiti al SERVIZIO URBANO (anno 2015):

	s8m	8-9,60m	9,61-15m	≥15m	Totale
Elettrici					
Metano					
Diesel					
G.P.L.					
Ibridi plug-in					
Ibridi benzina-elettrico					
Ibridi diesel-elettrico					

Numero veicoli per standard emissivo adibiti al SERVIZIO URBANO (anno 2015):

	Euro0	Euro1	Euro2	Euro3	Euro4	Euro5	EEV	Euro6	Totale
Metano									
Diesel									
G.P.L.									
Ibridi plug-in									
Ibridi benzina-elettrico									
Ibridi diesel-elettrico									

Elettrificazione del trasporto su gomma

La sua azienda è interessata a erogare il servizio di una o più linee con veicoli elettrici?

Scegli solo una delle seguenti:

- Sì
 No

Può indicare i motivi per i quali non è interessato ad un servizio effettuato con autobus elettrici?

E' interessata ad un sistema software di supporto al processo di elettrificazione dei servizi su gomma?

Scegli solo una delle seguenti:

- Sì
 No

Indicare l'importanza dei seguenti aspetti del processo di elettrificazione *

Scegliere la risposta appropriata per ciascun elemento:

	Molto	Abbastanza	Poco/Niente	Non so
L'indicazione delle linee per le quali l'elettrificazione risulta più conveniente?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La soluzione tecnologica (bus, batterie, sistema di ricarica, altro) ottimale per una linea predefinita?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La convenienza economica dell'elettrificazione di una linea predefinita?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La localizzazione ottimale dei punti di ricarica?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Le tecnologie (bus, sistemi ricarica, ecc.) sulle quali allocare in modo ottimale date risorse finanziarie ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La riduzione delle emissioni nocive (PM, NOx, CO2, ecc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Altri aspetti di interesse per l'elettrificazione ?