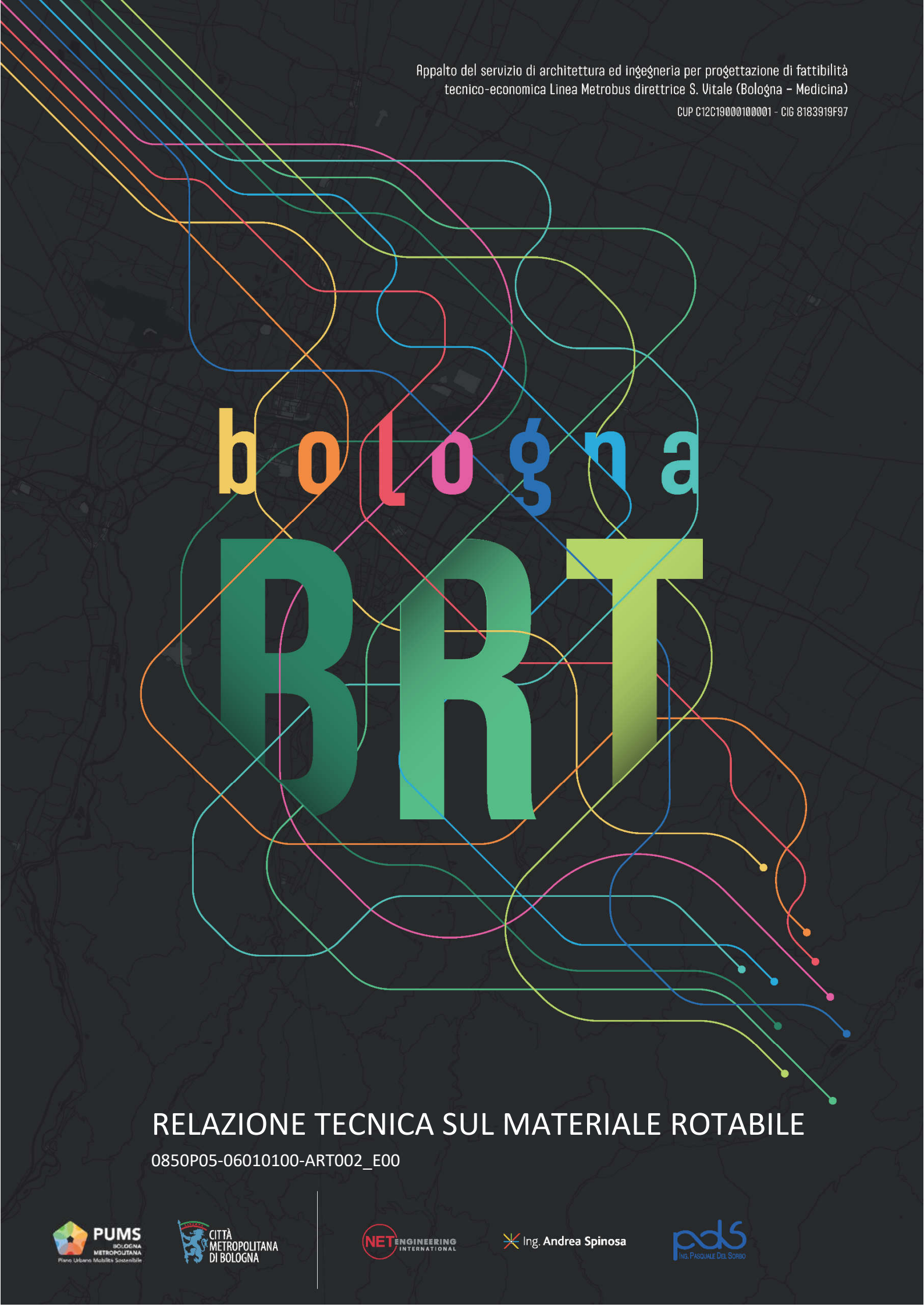




bologna BRT

RELAZIONE TECNICA SUL MATERIALE ROTABILE

0850P05-06010100-ART002_E00

DATA	CODICE RELAZIONE	REV.
12/2020	0850P05-06010100-ART002_E00	0

REV	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	Emissione	12/2020	M. Mancin	R. Timo	M. Lelli

Il Responsabile del progetto e dell'integrazione fra le prestazioni specialistiche Ing. Simone Eandi Ordine degli Ingegneri della Provincia di Cuneo, n. 1418/A (Firmato digitalmente)	Il Progettista Ing. Roberto Timo Ordine degli Ingegneri della Provincia di Padova, n. 4494 (Firmato digitalmente)	Il Direttore tecnico Ing. Giovanni Acciaro Ordine degli ingegneri della Provincia di Roma, n. 21715/A (Firmato digitalmente)
--	---	--

Sommario

Relazione Tecnica sul Materiale Rotabile Illustrativa	1
1 Premessa	1
2 Il quadro di riferimento normativo	1
2.1 Autobus	1
2.2 Fornitura BT	1
2.3 Stazioni di ricarica lenta	2
2.4 Stazioni di ricarica veloce (Opportunity charging)	2
2.5 Compatibilità elettromagnetica	2
3 Le caratteristiche dei mezzi disponibili	2
3.1 La lunghezza dei mezzi	2
3.2 La capacità dei mezzi	3
3.3 Le altre caratteristiche	4
4 Le alternative tecnologiche per l'alimentazione/ricarica dei mezzi	7
4.1 Caratteristiche dei sistemi di accumulo	7
4.2 Le infrastrutture per la ricarica	10
5 La scelta di progetto	14
5.1 Tipologia e parco mezzi	14
5.2 I punti di "opportunity charging"	16
5.3 L'andamento della carica per i servizi AV e AC	19
Appendice 1	22
6 Costo connessioni rete elettrica – ENEL distribuzione	22
6.1 Connessioni permanenti ordinarie	22
6.2 Connessioni temporanee	23
7 Costo punti di ricarica	24
7.1 Dati tecnico/economici stazioni di ricarica lenta	24
7.2 Dati tecnici stazioni di ricarica ad alte prestazioni	24
7.3 Costi allacci MT/BT	24
7.4 Costi cabine MT/BT	24

Indice delle figure

Figura 3-1: possibili configurazioni del mezzo offerte dal mercato per tipologia di lunghezza	2
Figura 3-2: esempi di organizzazione delle sedute per bus da 18 metri	4
Figura 4-1: diagramma Energia specifica - Potenza specifica (Peter Van den Bossche Frédéric Vergels, 2016)	9
Figura 4-2: schema di funzionamento di una cella a combustibile	10
Figura 4-3: schema di funzionamento dell'"opportunity charge" (Fonte: UITP)	11
Figura 4-4: schema per la ricarica lenta (Fonte Cenelec)	12
Figura 4-5: schema per la ricarica veloce (Fonte Cenelec): Medium Power e in High Power AC charge	12
Figura 4-6: schema per la ricarica veloce (Fonte Cenelec): High Power DC charge	12
Figura 4-7: schema stazione di "opportunity charging" a pantografo rovesciato (Fonte: Volvo – ABB)	13
Figura 4-8: schema per la ricarica induttiva – modello "Primove" (Fonte Bombardier)	14
Figura 5-1: rappresentazione mediante orario grafico del modello d'esercizio previsto per la linea Metrobus AV	15
Figura 5-2: rappresentazione mediante orario grafico del modello d'esercizio previsto per la linea Metrobus AC	15
Figura 5-3: ipotesi di turnazione dei mezzi - linea Metrobus AV	15
Figura 5-4: ipotesi di turnazione dei mezzi - linea Metrobus AC	16
Figura 5-5: allacciamenti elettrici degli impianti di ricarica (lenta e veloce) del Centro di Mobilità e deposito di Medicina	18
Figura 5-6: allacciamenti elettrici degli impianti di ricarica (veloce) del capolinea di Castenaso Mazzini	18

Figura 5-7: allacciamenti elettrici degli impianti di ricarica (lenta e veloce) del deposito e centro di manutenzione di Due Madonne 19

Figura 5-8: allacciamenti elettrici degli impianti di ricarica (veloce) del capolinea di Bologna Autostazione 19

Figura 5-9: linea Metrobus AC – Profilo di missione critico 20

Figura 5-10: linea Metrobus AC - andamento della capacità residua e del SOC delle batterie 20

Figura 5-11: linea Metrobus AV – Profilo di missione critico 21

Figura 5-12: linea Metrobus AV - andamento della capacità residua e del SOC delle batterie 21

Indice delle tabelle

Tabella 3.1: capacità bus elettrici 18 m 3

Tabella 3.2: scheda tecnica mezzi 18 m - Filobus IMC 5

Tabella 3.3: scheda tecnica mezzi 18 m - Elettrici con Batterie 6

Tabella 4.1: confronto tra diverse tipologie di batteria 8

Tabella 5.1: stazioni di ricarica servizio Metrobus AV 16

Tabella 5.2: stazioni di ricarica servizio Metrobus AC 17

Tabella 5.3: fabbisogno cabine MT/BT 17

Relazione Tecnica sul Materiale Rotabile Illustrativa

1 Premessa

Il sistema del Bus Rapid Transit (BRT), a cui le linee Metrobus previste dal PUMS Metropolitano di Bologna si richiamano, costituisce una applicazione del sistema dei trasporti con una lunga tradizione per lo più geograficamente correlata alle grandi aree metropolitane dei Paesi emergenti, testimoni di evoluzioni urbane tanto massive quanto rapide nel tempo e caratterizzate da vincoli economici e finanziari rilevanti.

In questo senso il BRT ha spesso costituito una soluzione per soddisfare i fabbisogni di mobilità con prestazioni elevate, sia in termini di capacità sia di velocità, mantenendo un basso livello di infrastrutturazione. Conseguentemente, il BRT ha garantito costi di realizzazione e manutenzione contenuti, e rapidità di implementazione.

L'esperienza di questi Paesi è spesso caratterizzata da una via di marcia completamente segregata rispetto alla viabilità ordinaria, un servizio ad elevatissima frequenza esercito con materiale autosnodato a 2 e 3 casse, **per lo più alimentato a combustibile fossile**.

D'altro lato, ciò ha comportato un utilizzo del sistema "su gomma" spesso all'estremo delle sue capacità prestazionali, di fatto funzionando **al di fuori del cosiddetto "intervallo di convenienza" economico del sistema**, sostanzialmente non considerando le inefficienze intrinseche del sistema a soddisfare determinati livelli di domanda.

Solo recentemente il sistema BRT è stato introdotto per le aree urbane in Europa, costituendo un'evoluzione della classica busvia in sede riservata, con l'obiettivo di **soddisfare i fabbisogni di mobilità intermedi tra il sistema bus su gomma classico e i sistemi a guida vincolata** (tramvie in particolare) in un contesto di media densità. Il BRT costituisce quindi un sistema con prestazioni elevate in termini di velocità, accessibilità, comfort, impatti sull'ambiente che abbia costi di realizzazione contenuti e tempi di realizzazione brevi. Tali prestazioni sono garantite da un'opportuna segregazione dal traffico veicolare, spesso considerando soluzioni puntuali – e non segregando l'intero tracciato –, da un sistema tecnologico di monitoraggio del bus e preferenziamento – anche selettivo – alle intersezioni semaforizzate, da una infrastruttura che garantisce comfort al passeggero in attesa e facilità di imbarco nelle fasi di salita e discesa, **da un mezzo a bassa emissione**.

Il Metrobus prefigurato dal PUMS della Città metropolitana di Bologna e oggetto delle analisi si colloca in questo contesto e **costituisce probabilmente la prima esperienza in Italia di utilizzo in un contesto non solo urbano, ma finalizzato a soddisfare i fabbisogni di mobilità pendolare e di adduzione all'area urbana**, integrandosi chiaramente nella rete dei servizi metropolitani e regionali garantiti dalla ferrovia e dalle linee su gomma extraurbane grazie alla realizzazione dei cosiddetti "Centri di Mobilità" e di altri opportuni punti di interscambio.

In tal senso, il presente documento si pone l'obiettivo di individuare gli aspetti tecnologici del parco rotabile e delle infrastrutture per l'approvvigionamento energetico, considerando:

- quanto stabilito nell'addendum all'avviso di istanza di finanziamento del MIT in tema di BUSVIE ELETTRICHE, ovvero sistemi di trasporto caratterizzati da una via attrezzata con postazioni di ricarica ai terminali e/o lungo linea per il transito di autobus elettrici;
- le soluzioni in termini di lunghezza e capacità del mezzo, tipologia di alimentazione e relativi costi offerti al momento dal mercato;

stante il contesto di riferimento periurbano ed extraurbano che caratterizza il progetto di busvia ad elevate prestazioni lungo la linea Bologna - Medicina.

2 Il quadro di riferimento normativo

Per quanto riguarda il quadro di riferimento normativo, si tiene conto dei punti di seguito per il sistema "autobus" e per le infrastrutture di ricarica.

Si premette che relativamente al sistema "autobus", con riferimento particolare al tema della conformazione del mezzo – lunghezza, articolazione, capacità –, è in discussione in Parlamento la modifica dell'art. 61 del Codice della Strada con un emendamento, che permetterà la circolazione anche in Italia di veicoli lunghi fino a 24 metri, come già accade negli altri Paesi Europei. Al momento la norma prevede una lunghezza massima del veicolo di 18,75 metri che ha costituito riferimento per le successive analisi.

2.1 Autobus

Conformi alla Direttiva 2007/46/CE e al Regolamento UNECE R100 / 107 e s.m.i.

2.2 Fornitura BT

Norme CEI 0-16 e CEI 0-21

2.3 Stazioni di ricarica lenta

Connettore di ricarica: conforme allo standard IEC 62196 + CEI 69-6

Sistemi di ricarica: ISO 15118 / DIN 70121 / IEC 61851-23 & -24

EMC Direttiva 2004/108/CE

2.4 Stazioni di ricarica veloce (Opportunity charging)

Connettore di ricarica: conforme allo standard IEC 62196 + CEI 69-6

Sistemi di ricarica: ISO 15118 / DIN 70121 / IEC 61851-23 & -24

EMC Direttiva 2004/108/CE

2.5 Compatibilità elettromagnetica

Progettazione e realizzazione della stazione di ricarica (convertitore AC/DC, cavo e stazione di ricarica): obiettivo di qualità di $3 \mu\text{T}$ per il valore dell'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio, come stabilito dal D.P.C.M. 08/07/2013. Le stazioni di ricarica ubicate all'interno del deposito/officina dovranno rispettare le disposizioni in materia di protezione dei lavoratori dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici contenute nel Capo IV del Titolo VIII del D.Lgs. 81/2008 e nell'Allegato XXXVI come modificato dal D.Lgs. 01/08/2016 n. 159 in attuazione della direttiva 2013/35/UE.

3 Le caratteristiche dei mezzi disponibili

3.1 La lunghezza dei mezzi

Come predetto, la dimensione dei veicoli su gomma per il servizio pubblico è normata dal Codice della Strada che attualmente non consente – a differenza di altri Paesi europei – la circolazione stradale di mezzi con lunghezza superiori ai 18.750 mm.

La questione della possibilità di concedere l'omologazione anche a mezzi stradali bi- o tri-articolati (a Curitiba, in Brasile, esistono bus da 28 metri mentre sono stati sperimentati veicoli da 32 metri) è comunque al vaglio del Ministero dei Trasporti.

La Figura 3-1 mostra le possibili configurazioni dei mezzi offerte dal mercato, inclusa la versione da 24 metri (24.785 mm) la cui circolazione è oggi inibita in Italia a meno che questi non presentino un meccanismo di vincolo tale da permettere l'omologazione come tram (come è successo per il Translohr di Padova).

L'ASSTRA, Associazione delle società ed enti del trasporto pubblico locale ha recentemente tenuto un convegno a Roma, in cui è emersa la volontà di seguire anche in Italia un percorso simile a quello percorso in Francia, Germania e Olanda, ovvero consentire la circolazione stradale di biarticolati e bisnodati (se filobus) di 24 m su percorsi riservati con guida promiscua per attraversamenti o spostamenti di servizio a velocità limitata. A Genova, nel 2019, è stata organizzata una prova su strada dei filobus da 24 correntemente in uso nella città austriaca di Linz per dimostrarne la possibilità di impiego anche nel contesto italiano.

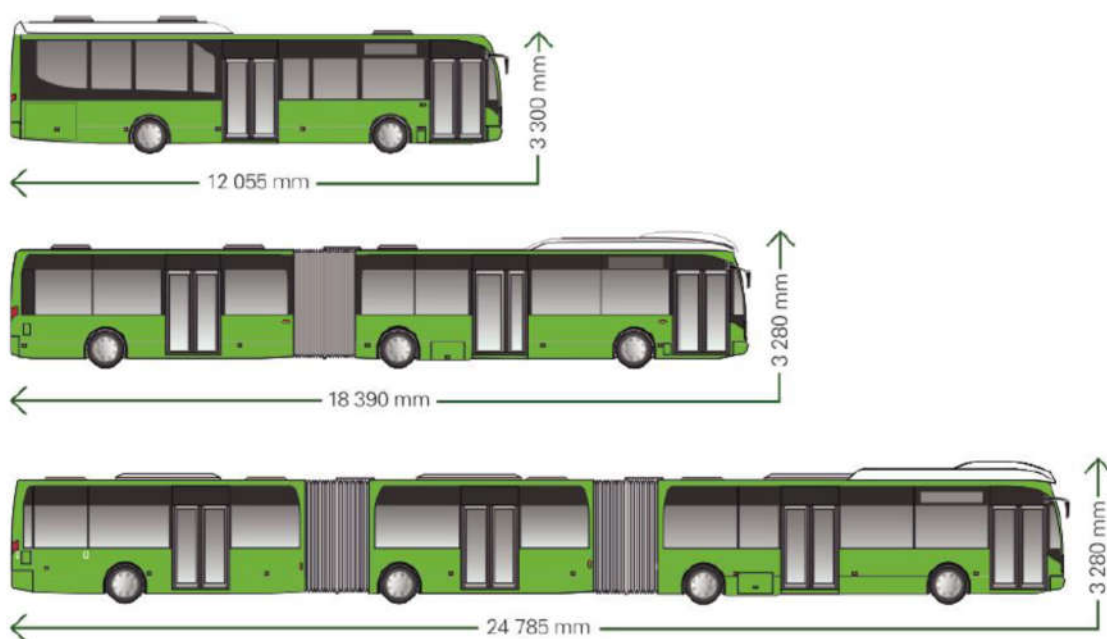


Figura 3-1: possibili configurazioni del mezzo offerte dal mercato per tipologia di lunghezza

3.2 La capacità dei mezzi

La Tabella 3.1 riporta i valori di riferimento per le capacità dei mezzi elettrici con lunghezza di 18 metri disponibili sul mercato, con riferimento a due tipologie di allestimento, urbano e suburbano, in relazione ai diversi allestimenti del mezzo.

E' necessario preliminarmente considerare che tali valori sono relativi a bus di Classe I¹, ovvero riconducibili alla tipologia di "veicoli costruiti con zone destinate ai passeggeri in piedi, per consentire loro frequenti spostamenti", poiché ad oggi non sono presenti in commercio bus elettrici da 18 m in classe II² (ovvero "Veicoli destinati principalmente al trasporto di passeggeri seduti, progettati in modo da poter trasportare passeggeri in piedi nella corsia e/o in una zona di superficie non superiore allo spazio occupato da due sedili doppi").

A questo è necessario aggiungere che la tabella evidenzia come la capacità dei bus elettrici attualmente sul mercato (espressa in termini di numero massimo di passeggeri trasportabili), sia circa il 20% inferiore a quella di un modello equivalente a gasolio, a causa del peso e dell'ingombro delle batterie.

Autobus urbano

Posti a sedere	Posti in piedi	Posti PRM	Posti totali
25 - 38	95 - 82	1	120

Autobus suburbano

Posti a sedere	Posti in piedi	Posti PRM	Posti totali
48	71	1	120
44	65	1	110
58	41	1	100

Tabella 3.1: capacità bus elettrici 18 m

La figura successiva illustra due esempi di organizzazione delle sedute ponendo in evidenza come l'architettura della trazione elettrica consenta di gestire gli spazi in maniera meno rigida rispetto alla trazione termica.

¹ Secondo le direttive 2001/86/CE e 97/27/CE si distinguono le seguenti classi:

- Veicoli di capienza minore o uguale a 22 posti:
 - Classe A: con sedili e predisposto per passeggeri in piedi
 - Classe B: solo posti seduti
- Veicoli di capienza maggiore di 22 posti:
 - Classe I: predisposto anche per passeggeri in piedi
 - Classe II: con sedili e predisposto per passeggeri in piedi nel corridoio centrale
 - Classe III: solo posti seduti

² Principalmente per l'impossibilità di inserire nel tetto le previste botole per la fuga in caso di ribaltamento del mezzo a causa della presenza delle batterie.

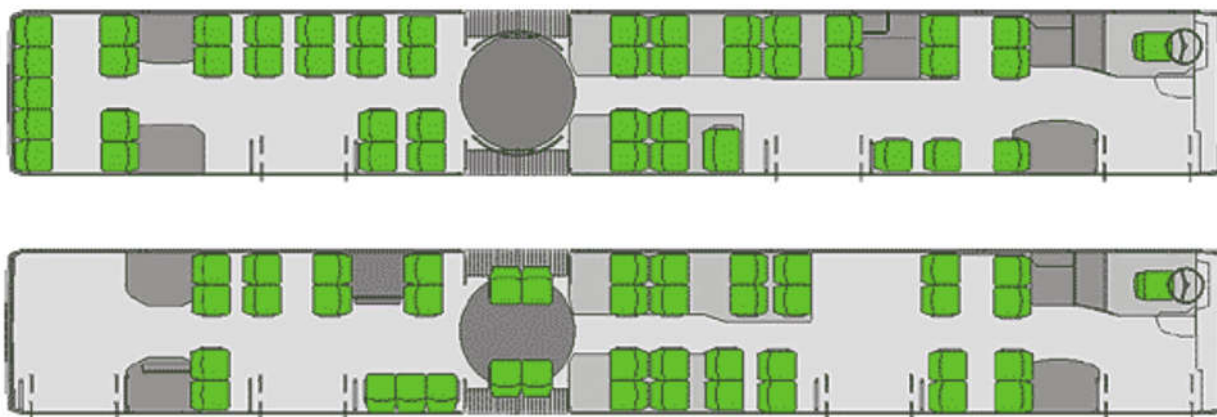


Figura 3-2: esempi di organizzazione delle sedute per bus da 18 metri

3.3 Le altre caratteristiche

Come evidenziato nel documento di fattibilità delle alternative progettuali, è necessario premettere i criteri esplicitati dall'addendum all'Avviso di presentazione istanze per accesso alle risorse per il trasporto rapido di massa che aprono al finanziamento di "sistemi filoviari (e assimilabili)" ovvero a tutti i sistemi eserciti con veicoli su gomma a trazione elettrica che si alimentano/ricaricano lungo la via di corsa con sistemi di alimentazione continui (es.: linea aerea tradizionale) o discreti (es.: postazioni di ricarica).

In tal senso le alternative tecnologiche del parco rotabile prese in considerazione per il progetto sono riconducibili a:

- 1) **filobus**, che prevede la presenza della catenaria per l'intero tracciato o per parti di esso, utile a:
 - a) garantire l'alimentazione continua del mezzo;
 - b) fornire soluzioni con accumulo di energia durante il passaggio sotto la linea di contatto tradizionale per poi affrontare tratti di percorso *catenary free* (soluzione In Motion Charge - IMC);
- 2) **ebus** con alimentazione a batterie, in grado di transitare su tratte interamente *catenary free*, unitamente a infrastrutture di ricarica puntuale (Flash charging e Opportunity charging). In particolare, è ulteriormente utile articolare le possibili alternative in relazione alla posizione e numerosità dei punti di ricarica, che costituiscono elementi di progetto correlati al modello di esercizio e con un impatto diretto sulla potenzialità, capacità e dimensione del sistema di batterie:
 - a) Tipo A: solo eBus con massima capacità delle batterie, nessuna stazione di ricarica veloce in linea ma solo in deposito;
 - b) Tipo B: eBus con massima capacità delle batterie e stazioni ricarica in corrispondenza di uno o entrambi i capolinea;
 - c) Tipo C: eBus con minima capacità della batteria e stazioni di ricarica flash lungo percorso.

In tal senso, si anticipa una review delle caratteristiche tecniche e tecnologiche offerte dal mercato, in relazione al primo *step* di valutazione che considera appunto le due macro-classi di soluzione alternative relative a filobus, con tecnologia In Motion Charging, e bus elettrico (ebus).

In particolare, la Tabella 3.2 riporta le grandezze di riferimento messe a disposizione da alcuni produttori di riferimento per filobus con tecnologia In Motion Charging ad oggi omologati in classe I, con tipologia di ricarica con stanghe su trolley, dotate di movimento automatico dell'organo di presa (ovvero anche manuale), relative a:

- dettaglio di lunghezza;
- % ricarica / tempo;
- potenza motore/i;
- capacità batt./capac;
- numero di posti;
- numero di porte;
- velocità massima;
- autonomia senza ricarica.

MARCA	SOLARIS	IVECO	VAN HOOL
MODELLO	Trollino	Crealis	Exqui.city
LUNGHEZZA (mm)	18.000	18.395	18.610
% RICARICA / TEMPO (% / min)	1,33 kWh/ 1'	-	1,33 kWh/ 1'
POTENZA MOTORE/I (kW)	2 x 160	1 x 250	2 x 160
CAPACITA' BATT./CAPAC. (kWh)	45	-	45
POSTI TOTALI/A SEDERE	125/52	125/29-49	117- 115- 112/ 29 – 35 - 44
NUMERO PORTE	3/4	3/4	3/4
VELOCITA' MASSIMA (km/h)	-	70	-
AUTONOMIA senza ricarica / fuori filo (km)	12 – 14 km	-	12 – 14 km

Tabella 3.2: scheda tecnica mezzi 18 m - Filobus IMC

La successiva Tabella 3.3riporta parallelamente le grandezze di riferimento fornite da alcuni dei principali fornitori presenti sul mercato per gli ebus ad oggi omologati in classe I, relative a:

- dettaglio di lunghezza;
- tipologia di ricarica;
- tempo di ricarica;
- presenza del movimento automatico dell'organo di presa;
- potenza motore/i;
- capacità batt./capac;
- numero di posti;
- numero di porte;
- velocità massima;
- autonomia senza ricarica.

Nei paragrafi che seguono saranno descritte brevemente tali caratteristiche per giungere ad una rappresentazione sintetica ma esaustiva utile alla definizione delle scelte di progetto.

MARCA	MERCEDES	SOLARIS	IVECO	MAN	IRIZAR	VAN HOOL	VOLVO	VDL	BYD
MODELLO	eCITARO	Urbino	E-way 18	Lion’sCitu 18 E	iebus - ietram	Exqui.city	7900 Electric Art.	CiteaSifaElec.	eBus
LUNGHEZZA (mm)	18.000	18.000	17.970 / 18.185 Linium (BRT)	18.100	18.730	18.610	17.848 / 18.557	18.000 / 18.750	18.250
TIPOLOGIA RICARICA	Presa e Pantografo	Presa e Pantografo	Presa e Pantografo	Presa	Presa e Pantografo	Presa e Pantografo	Presa e Pantografo	Presa e Pantografo	Presa e Pantografo
TEMPO DI RICARICA (ore)	100%: 3-8 ore dep. (20/80 kW) -LENTA	-	-	-	-	-	-	-	-
MOVIMENTO AUTOMAT. ORGANO DI PRESA	SI Pantografo	SI Pantografo	SI Pantografo	NO Solo presa	SI Pantografo	SI Pantografo	SI Pantografo	SI Pantografo	SI Pantografo
POTENZA MOTORE/I (kW)	2 x 125 (picco)	2 x 125 (picco) 2 x 60 (continua)	1 x190 (picco)	2 x 240 (picco) 2 x 160 (continua)	1 x 235 (picco)	2 x 160 (picco)	2 x 200 (picco)	1 x 240 (picco) 1 x 210 (continua)	2 x 150 (picco)
CAP.BATT./CAPAC. (kWh)	395	350 - 553	117 (rapida) 250 (lenta)	640	350 iebus - 525 ietram	-	250 – 300 - 396	216 – 288 420 (2021)	-
POSTI TOTALI	136	120	125	120	140	-	150	125 - 130	-
POSTI A SEDERE		37/47	42	43	-	-	-	-	51
NUMERO PORTE	3/4	3/4	3/4	3/4	3/5	3/4	3/4	3/4	3/4
VELOCITA’ MAX (km/h)	80 (CLI)	80 (CLI)	80 (CLI)	80 (CLI)	80 (CLI)	80 (CLI)	80 (CLI)	80 (CLI)	80 (CLI)
AUTON. senza ricarica (km)	200	200	-	200/270	-	-	-	-	-

Tabella 3.3: scheda tecnica mezzi 18 m - Elettrici con Batterie

4 Le alternative tecnologiche per l'alimentazione/ricarica dei mezzi

Nei mezzi stradalia trazione elettrica di concezione tradizionale, l'alimentazione è continua, realizzata mediante linea di contatto aerea con conduttore in rame a cui il mezzo deve essere collegato mediante un apposito organo di presa di corrente (pantografo o trolley).

In tempi recenti, tuttavia, sono state sviluppate diverse tecnologie innovative con le quali è possibile realizzare sistemi bus di nuova generazione, i quali sono **privi di linea aerea di contatto e di pantografo**, ovvero i cosiddetti sistemi *catenary-free*.

Tali tecnologie presentano peraltro una serie **vantaggi**, oltre che chiaramente in termini ambientali, anche in relazione ai vincoli estetici e urbanistici tipici dei centri storici:

- riduzione dell'impatto estetico, ambientale e urbanistico;
- riduzione della zona di rispetto, con maggiore possibilità di superamento ostacoli;
- possibilità di marcia autonoma dei veicoli in caso di guasto per veicoli dotati di accumulo di energia a bordo;
- riduzione degli impatti sulla circolazione in caso di condizioni meteo avverse (neve, ghiaccio).

Per **contro** tali sistemi hanno i seguenti punti di debolezza:

- non esiste uno standard tecnico universalmente affermato e condiviso, ossia una soluzione ottimale per costi e prestazioni, adatta a tutti gli scopi di intervento. Inoltre, la mancanza di standardizzazione nelle interfacce tra mezzi e infrastrutture potrebbe determinare un'obsolescenza precoce dei mezzi attualmente sul mercato;
- i vincoli e le opportunità di esercizio e le caratteristiche della linea su cui si deve intervenire impongono al progettista scelte che sono, in genere, di volta in volta diverse (un conto è operare ampliamenti su una linea esistente, un conto è realizzarne una nuova);
- per poter essere applicati a sistemi già esistenti, richiedono sempre modifiche ai veicoli, oltre che modifiche all'infrastruttura;
- i costi di implementazione dell'infrastruttura, di acquisto dei veicoli e della manutenzione sono più alti rispetto a sistemi bus di tipo tradizionale.

Stante un mercato in forte espansione, il panorama delle soluzioni di alimentazione *catenary-free* è piuttosto articolato. In tal senso, una prima distinzione può essere effettuata in base alle **modalità di ricarica dei sistemi di accumulo**, ove presenti:

- **Soluzioni con ricarica durante il passaggio sotto la linea di contatto** tradizionale (laddove esiste la catenaria sui restanti tratti di linea);
- **Soluzioni con ricarica veloce/lenta** presso le fermate o ai capolinea, durante la sosta negli stessi (*Flash charging* e *Opportunity charging*).

Una seconda classificazione può essere fatta in base alle **modalità di prelievo** e trasferimento dell'energia:

- Prelievo dalla **linea di contatto** dall'alto attraverso pantografo tradizionale;
- Prelievo **wireless** mediante induzione elettromagnetica, durante la marcia o solo mentre il bus è fermo alle fermate e ai capolinea.

Le principali tecnologie su cui si basa la realizzazione dei diversi sistemi sono:

- Supercapacitori a bordo;
- Batterie a bordo;
- *Fuel cell* (idrogeno).

Nei paragrafi che seguono vengono brevemente descritte le diverse tecnologie, per orientare il lettore e illustrare poi una valutazione di costi/opportunità rispetto al progetto della linea Metrobus Medicina – Bologna.

4.1 Caratteristiche dei sistemi di accumulo

4.1.1 Batterie

Le batterie impiegate nei mezzi di trasporto sono le cosiddette **batterie di trazione**, progettate con lo scopo di fornire potenza per un periodo di tempo sostenuto. Le caratteristiche ideali per batterie di trazione sono:

- elevate energia specifica [Wh/kg] e densità di energia [Wh/m³];

- buona potenza specifica [W/kg], densità di potenza [W/m³], C-rate;
- buona robustezza alle sollecitazioni meccaniche;
- elevato numero di cicli di carica/scarica, grado di aut scarica e vita utile.

Le tecnologie generalmente utilizzate per la trazione elettrica possono essere sinteticamente elencate:

- NiMH (Nichel-idruro di metallo): sono le batterie impiegate nelle prime applicazioni di trazione, ormai in disuso in tale ambito ma ancora largamente utilizzate nella stragrande maggioranza dei dispositivi elettronici, ad esempio nei formati stilo (AA) e ministilo (AAA). Non presentano prestazioni particolarmente adatte alla trazione, in quanto non sono dotate di notevole energia specifica o di potenza specifica. Inoltre, sono affette da notevole effetto memoria, fenomeno che le rende inadatte ai cicli di carica e scarica incompleti tipici dei veicoli elettrici.
- NMC (Nichel-Manganese-Cobalto) - Produttori: Siemens, Saft - sono le comuni batterie agli ioni di litio che forniscono energia alla maggior parte dei dispositivi di uso comune, dagli apparecchi elettronici ai veicoli elettrici. Presentano elevate densità di energia ed energia specifica (raggiungono infatti, attualmente, i 150 - 220 Wh/kg) ma sono affette da un importante degrado progressivo durante la loro vita. La ricerca nel settore delle batterie di trazione è mirata alla loro sostituzione, a causa del costo e della difficoltà di approvvigionamento del cobalto. Presentano un ragionevole compromesso tra energia specifica e numero di cicli di vita. Essendo una tecnologia consolidata, sono piuttosto economiche: il prezzo si aggira attorno ai 420 €/kWh
- LFP (Litio-Ferro-Fosfato) - Produttori: BYD, Saft - Sono batterie agli ioni di litio di nuova concezione. Presentano una buona densità di energia (220 kWh/m³) ma una modesta energia specifica a causa del loro peso (90 - 120 Wh/kg). Sono affette da bassa aut scarica e da un invecchiamento modesto ma non sono adatte alla carica rapida. Tra le batterie usate per la trazione sono quelle che presentano le migliori caratteristiche di resistenza agli urti e ai danneggiamenti. Il loro prezzo si aggira attorno ai 580 €/kWh.
- LTO (Litio-Titanato)- Produttore: Toshiba - Anch'esse agli ioni di litio di nuova concezione, hanno caratteristiche opposte alle LFP. Si prestano bene alle cariche e scariche rapide, offrendo una potenza specifica fino a 500 - 800 W/kg e presentano anche un numero di cicli più elevato degli altri tipi di batterie al litio, che può superare i 6000 cicli. Tuttavia, a causa della loro ridotta tensione di cella, hanno una bassa energia specifica, di circa 75 - 80 Wh/kg. Quindi sono batterie votate all'utilizzo con cariche e scariche rapide e frequenti. Inoltre, sopportano bene le basse temperature. Sono piuttosto costose in quanto il prezzo si aggira attorno ai 1000 €/kWh.
- Sodio-Nichel - Produttori: General Electric, NGK, FZSonick (FIAMM) - Sono batterie non basate sugli ioni di litio ma sul cloruro di sodio, caratteristica che consente un minore inquinamento ambientale. Tali batterie permettono un discreto risparmio di spazio grazie a una buona densità di energia, intorno agli 80 - 100 kWh/m³. Operano ad alte temperature (circa 260°C), quindi consumano una parte dell'energia per scaldarsi con conseguenze sull'efficienza energetica. In compenso le loro prestazioni non risentono delle temperature esterne. Sono piuttosto costose in quanto il prezzo si aggira attorno ai 1000 - 1200 €/kWh.

Nella tabella di seguito si illustra uno schema sintetico delle diverse caratteristiche di batterie.

BATTERIE	Produttori	Energia Specifica [Wh/kg]	Densità di Energia [kWh/m ³]	Potenza specifica [W/kg]	C-rate	Temperatura di esercizio	Numero di cicli
Litio NMC	Siemens, Saft	150 - 220	165 - 200	150 - 220	1C	Temperatura ambiente	1000 - 2000
Litio LFP	BYD, Saft	90 - 120	220	90 - 120	1C	Temperatura ambiente	2000
Litio LTO	Toshiba	75 - 80	130	750 - 800	10C	Temperatura ambiente	3000 - 7000
Sodio Nichel	General Electric, NGK, FZSonick (FIAMM)	65 - 80	80 - 100	260 - 320	4C	260°C	4500

Tabella 4.1: confronto tra diverse tipologie di batteria

Il grafico di Figura 4-1 (grafico di Ragone) invece mostra un utile confronto tecnico che mette in relazione, per le diverse tipologie di batteria, l'energia specifica (Wh/kg) e la potenza specifica (W/kg). In particolare, l'espressione della **potenza specifica** su scala logaritmica permette di fare un confronto anche tra accumulatori che hanno potenze molto differenti. Ogni colore rappresenta nel grafico indica una diversa tecnologia. Le curve che partono da sinistra sono curve a rapporto potenza (P)/energia (E) costante. Di fatto la tecnologia Li-Ion è quella che presenta le migliori prestazioni, tendenzialmente la scelta più adatta per i veicoli elettrici.

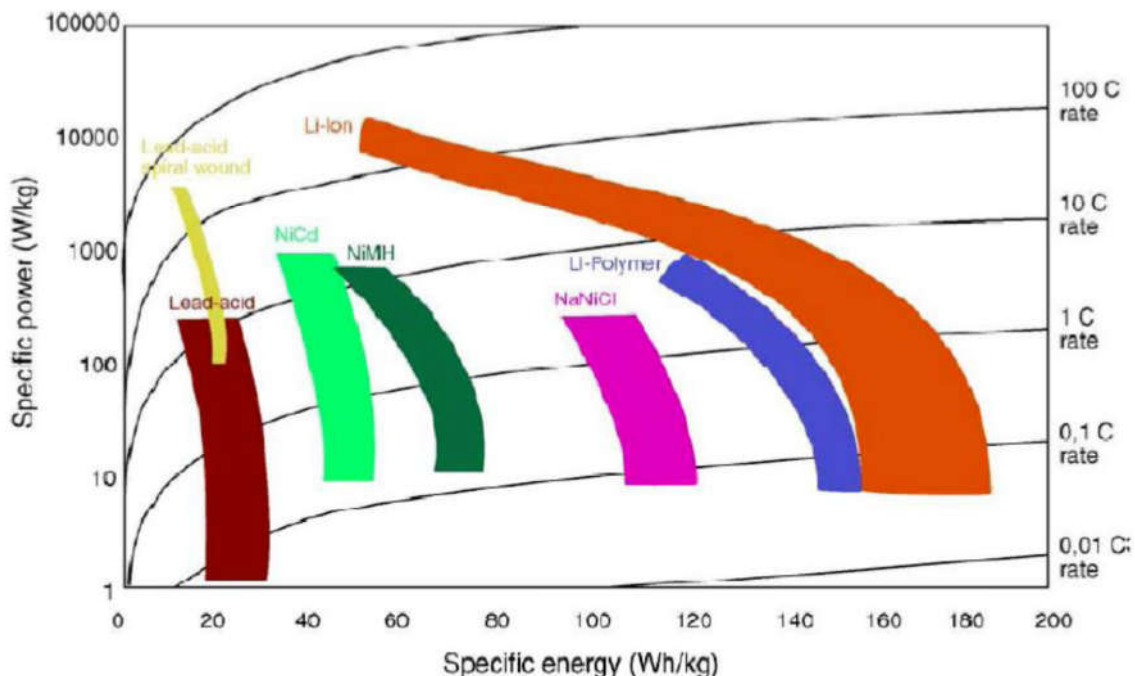


Figura 4-1: diagramma Energia specifica - Potenza specifica (Peter Van den Bossche Frédéric Vergels, 2016)

4.1.2 I supercapacitori

I supercapacitori, o supercondensatori, sono di fatto particolari condensatori elettrochimici dotati di eccezionale capacità di accumulo di energia, se rapportati ai condensatori tradizionali. Rispetto alle batterie presentano un numero di cicli estremamente più elevato (fino a un milione, contro i 1000-10000 cicli di una batteria) e consentono cariche e scariche molto più rapide (20 secondi), il che si traduce in un'elevata densità di potenza.

I supercapacitori 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 potenze specifiche molto più elevate, in quanto:

- assorbono e rilasciano energia con grande rapidità;
- 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.

4.1.3 Sistemi con "fuelcell"

Una fuelcell (cella a combustibile) è un dispositivo che consente di ottenere energia elettrica dalla reazione chimica di due reagenti, di cui in genere uno è l'idrogeno, immagazzinato a bordo del veicolo, e l'altro è l'ossigeno, presente nell'aria.

Tale tecnologia viene applicata a veicoli elettrici su gomma, quali ad esempio automobili, autobus, treni (Alstom iLint) e, ad oggi, si trova un solo esempio di tram a idrogeno che viaggia su rotaia: si tratta del tram inaugurato nel 2015 in Cina, nella città di Qingdao (Tsingtao).

La questione cruciale derivante dall'impiego dell'idrogeno nel campo della trazione è la sua elevata esplosività a contatto con l'aria, che impone di adottare particolari accorgimenti per lo stoccaggio a bordo di un veicolo. Lo stoccaggio può avvenire come:

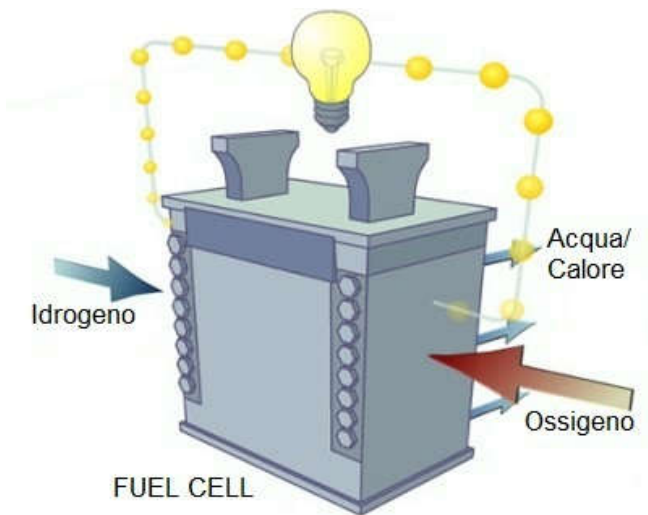


Figura 4-2: schema di funzionamento di una cella a combustibile

- Idrogeno compresso in bombole, fino a 70 MPa, usato per lo più nei mezzi di piccole dimensioni, tipicamente nelle automobili;
- Idrogeno liquido in contenitori raffreddati a temperature molto basse (circa -250°C), le quali eludono la necessità di avere un contenitore in pressione. In genere si usano per mezzi di uso regolare e di grandi dimensioni, come camion o autobus perché è di vitale importanza che il sistema di raffreddamento sia efficiente e in genere si preferisce non lasciare ad un comune utente tale gravosa responsabilità;
- Serbatoi di nanotubi di carbonio, sono ancora in fase di ricerca, ma ci sono ragionevoli evidenze sulla straordinaria capacità di immagazzinare idrogeno che i nanotubi presentano.

4.2 Le infrastrutture per la ricarica.

4.2.1 Soluzioni con ricarica durante il passaggio sotto la linea di contatto tradizionale

Acronimo di In Motion Charging, "IMC" è un marchio registrato da Kiepe Electric GmbH. Si tratta di una tecnologia che **permette la ricarica delle batterie di trazione durante il normale esercizio filoviario.**

Il veicolo filoviario è equipaggiato con moduli di batterie con un valore di capacità attualmente pari a circa 45 kWh per un bus da 18 metri che permette di percorrere 12-14 km³ senza presa di corrente collegata al bifilare e con una carica residua sulle batterie (SOC) di circa il 30%.

La percorrenza predetta è generalmente coerente con la dimensione dei centri urbani italiani, dove quindi non è necessario prevedere punti di ricarica in linea né ricariche notturne in deposito, particolarmente impegnative in caso di flotte numerose.

La tecnologia chiaramente permette il passaggio dei mezzi nei punti più sensibili delle città (centri storici, rotonde, sottopassi, ecc.) senza necessità di particolari infrastrutture.

Il sistema prevede che le aste di presa di corrente (trolley) si alzino e si abbassino in maniera completamente automatica, senza che l'autista debba lasciare il posto guida, ma il veicolo deve necessariamente essere fermo durante l'operazione. L'abbassamento può avvenire in qualsiasi punto della linea, ad es. fermata per la salita/discesa dei passeggeri, mentre l'innalzamento deve essere eseguito in punti specifici della linea attrezzati con un "tegolo", ovvero di una sorta di guida a forma di V rovesciata che viene montata sui fili di contatto e che serve da "invito" per le aste, assicurandone il corretto posizionamento. In linea generale il tempo massimo totale delle fasi di alzamento ed abbassamento è di circa 30/45 secondi totali, comprendente oltre alle fasi meccaniche di movimentazione degli organi di contatto (di circa 7/10 secondi) anche i tempi software di check inizio e fine carica.

La percentuale di ricarica batterie nel tempo è un fattore legato alla potenza del caricabatterie e costituisce una "leva" che ha impatti diretti sulla durata della batteria stessa: di fatto, una carica delle batterie troppo rapida riduce la vita utile delle batterie stesse⁴.

³ Con un'autonomia di 12-14 km, è possibile esercire una linea standard con una percentuale 30/70 fra tratte con linea aerea (30%) e tratte senza bifilare (70%). La soluzione IMC riduce sensibilmente i costi infrastrutturali, sia per la realizzazione che per la manutenzione nel tempo e garantisce una flessibilità della linea con possibilità di modifiche per eventi temporanei (fiere, manifestazioni, cantieri stradali, ecc.) o permanenti (cambiate esigenze di trasporto).

⁴ Esempio: con una potenza di 80 kW (pari ad una corrente di circa 100 A) si riesce a caricare 1,33 kWh al minuto cioè 13,3 kWh in 10 minuti. Con una velocità commerciale di 20 km/h, in 10 minuti si percorrono 3,3 km. Se si suppone di scaricare le batterie (45 kWh) fino al 40% di SOC, sarà necessario ricaricare 27 kWh (il 60% di 45 kWh). Coerentemente bisognerà percorrere 6,6 km sotto bifilare per la ricarica completa. Se il bifilare, come spesso succede, è collocato nella parte terminale della linea, dobbiamo considerare 3,3 km in andata + sosta al capolinea + 3,3 km in ritorno. In pratica,

4.2.2 Soluzioni con ricarica veloce/lenta presso le fermate o ai capolinea, durante la sosta negli stessi

Le batterie degli autobus elettrici 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 (Figura 4-3).

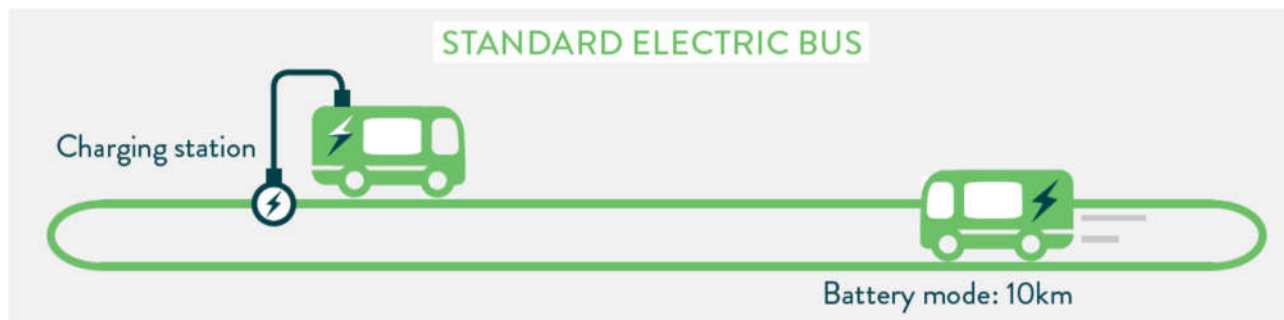


Figura 4-3: schema di funzionamento dell'“opportunity charge” (Fonte: UITP)

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 lato 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 mezzi aggiuntivi per compensarne l'insufficiente autonomia pur con ricariche parziali durante il servizio.

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)”, le stazioni di ricarica vengono classificate in base alla potenza erogata, in: *Normal Power, Medium Power, High Power (AC o DC)*.

4.2.2.1 Stazione di ricarica Normal Power

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 dei marciapiedi o nei parcheggi. La Figura 4-4 mostra la principale componentistica necessaria per la ricarica e la marcia.

dopo 3,3 km dal capolinea, il filobus si ripresenta al tratto privo di bifilare con le batterie cariche al 100%, pronto per un altro giro.

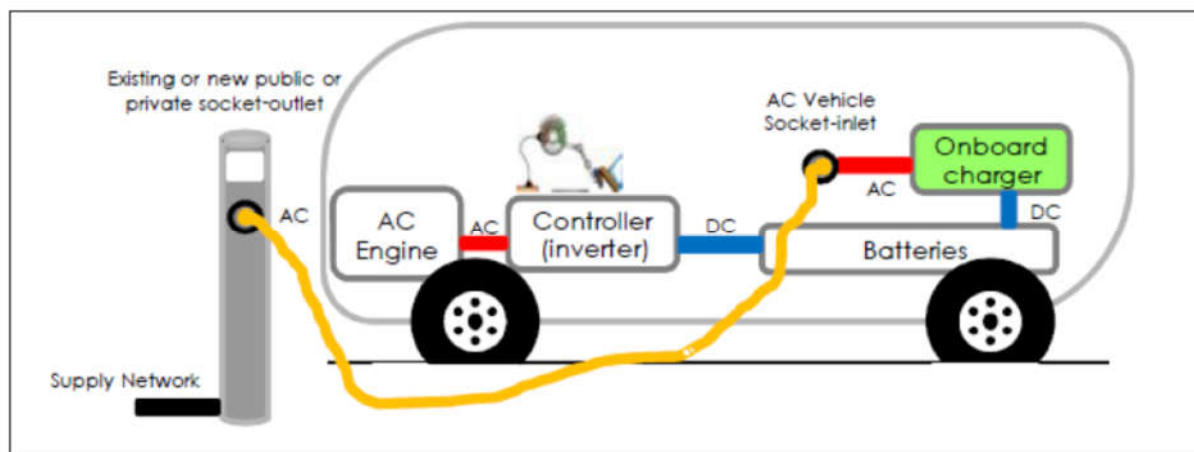


Figura 4-4: schema per la ricarica lenta (Fonte Cenelec)

4.2.2.2 Stazione di ricarica Medium Power e High Power

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. 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*. Il funzionamento per la ricarica e la marcia in *Medium Power* e in *High Power AC charge* è simile e viene riportato in Figura 4-5, mentre quello in *High Power DC charge* è illustrato in Figura 4-6.

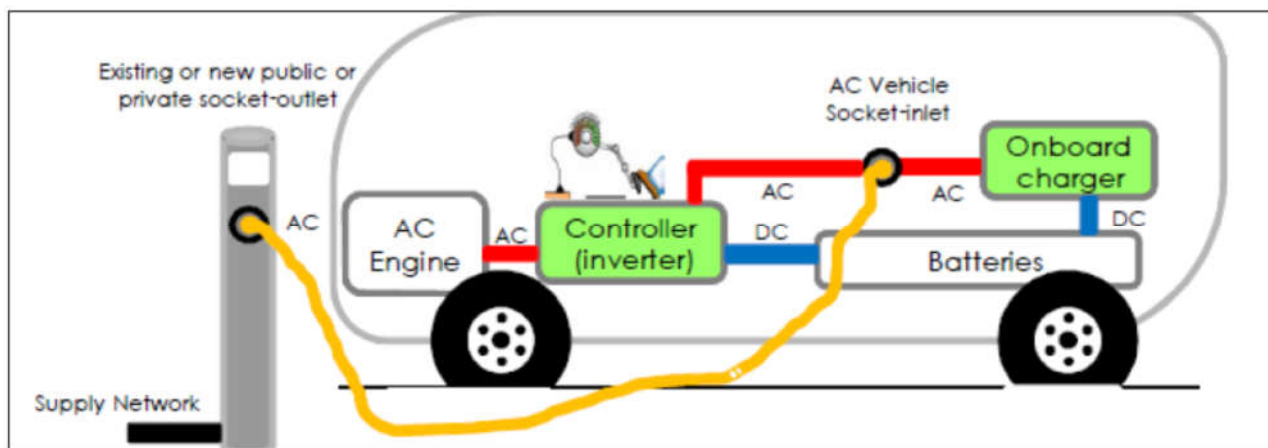


Figura 4-5: schema per la ricarica veloce (Fonte Cenelec): Medium Power e in High Power AC charge

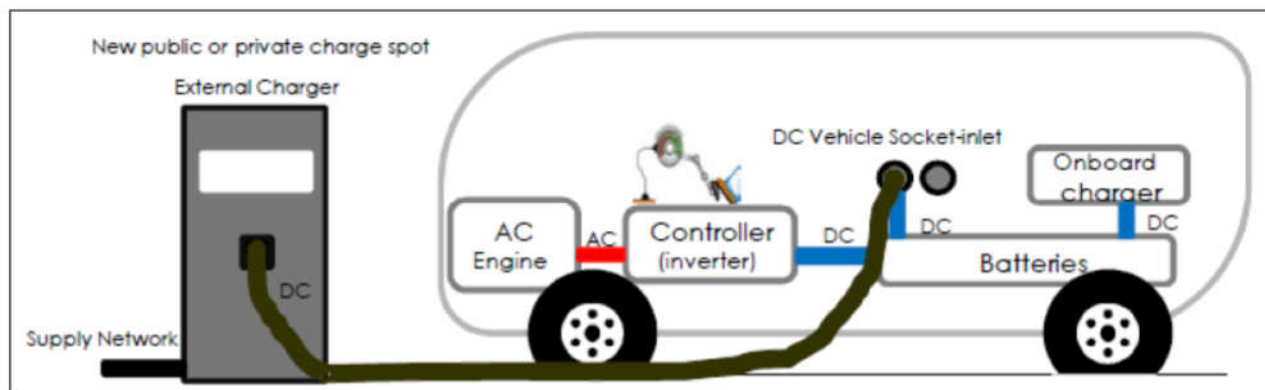


Figura 4-6: schema per la ricarica veloce (Fonte Cenelec): High Power DC charge

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.

Altra soluzione tecnologica è quella che invece prevede un 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 un tragitto urbano di lunghezza media.

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 4-7) 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 4-7).



Figura 4-7: schema stazione di “opportunity charging” a pantografo rovesciato (Fonte: Volvo – ABB)

4.2.3 Ricarica wireless

La ricarica di tipo induttivo “senza contatto” (contactless o wireless o plugless) si effettua grazie all’accoppiamento magnetico di due bobine “trasmettente” 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, però presenta, 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 4-8) sempre della Bombardier, che consente la ricarica rapida delle batterie durante le soste ai capolinea o alle fermate intermedie dei bus.

La Bombardier offre con il sistema “Primove” un pacchetto flessibile di soluzioni tecnologiche innovative 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 secondopiastra 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.

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.

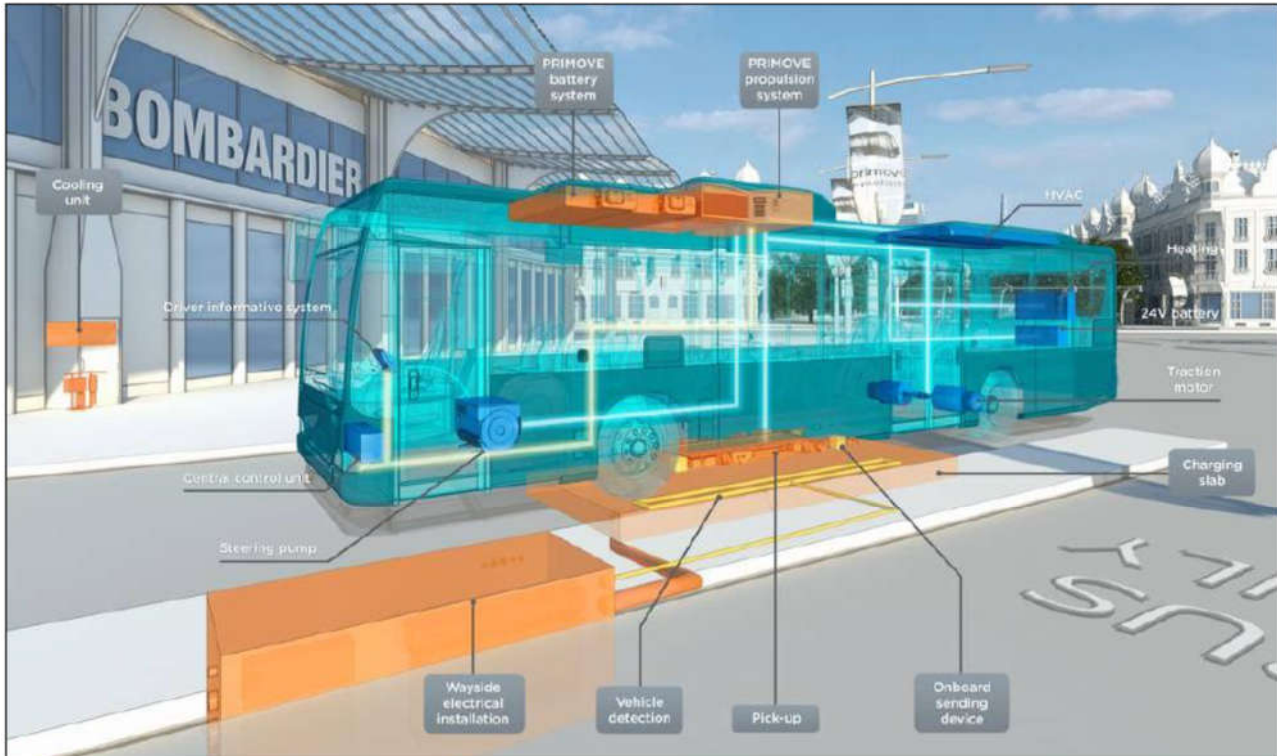


Figura 4-8: schema per la ricarica induttiva – modello “Primove” (Fonte Bombardier)

5 La scelta di progetto

Premesso che si rimanda al documento relativo allo studio delle alternative progettuali per uno specifico approfondimento sul processo di scelta di progetto e le relative motivazioni, si riportano qui di seguito i dettagli tecnici di tale scelta rispetto ai quali sono stati determinati i costi di costruzione e manutenzione.

5.1 Tipologia e parco mezzi

Di fatto la scelta di progetto è orientata al mezzo cosiddetto ebus di Tipo B, ovvero caratterizzato da massima capacità delle batterie e stazioni ricarica in corrispondenza di uno o entrambi i capolinea.

I mezzi individuati come meglio rispondenti alle esigenze e ai requisiti progettuali sono bus elettrici snodati da 18 m, alimentati da batterie ricaricabili.

Gli allestimenti interni saranno diversificati in funzione della tipologia del servizio svolto:

- con prevalenza di posti a sedere per i mezzi impiegati sulla linea **Metrobus AV**, per un totale di 100 posti offerti (58 a sedere, 41 in piedi e 1 posto PRM)
- con prevalenza di posti in piedi per i mezzi impiegati sulla linea **Metrobus AC**, per un totale di 120 posti offerti (48 a sedere, 71 in piedi e 1 posto PRM)

Il modello d'esercizio di progetto prevede:

- 43 corse/giorno/direzione sulla linea Metrobus AV (Figura 5-1), così ripartite:
 - fascia di punta della mattina (2h): 6 corse/h/direzione
 - fascia di punta della sera (2h): 4 corse/h/direzione
 - fasce di morbida (11,5 h): 2 corse/h/direzione
- 34 corse/giorno/direzione sulla linea Metrobus AC (Figura 5-2), così ripartite:
 - fascia di punta della mattina (2h): 4 corse/h/direzione
 - fascia di punta della sera (2h): 2 corse/h/direzione

- o fasce di morbida (11 h): 2 corse/h/direzione

BOLOGNA AUTOSTAZIONE - MEDICINA CM

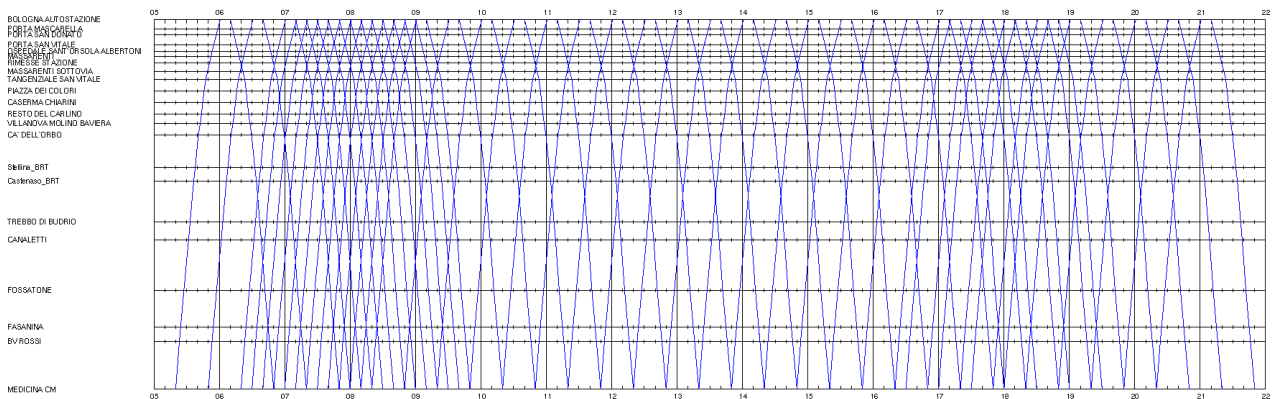


Figura 5-1: rappresentazione mediante orario grafico del modello d'esercizio previsto per la linea Metrobus AV

BOLOGNA AUTOSTAZIONE - CASTENASO MAZZINI

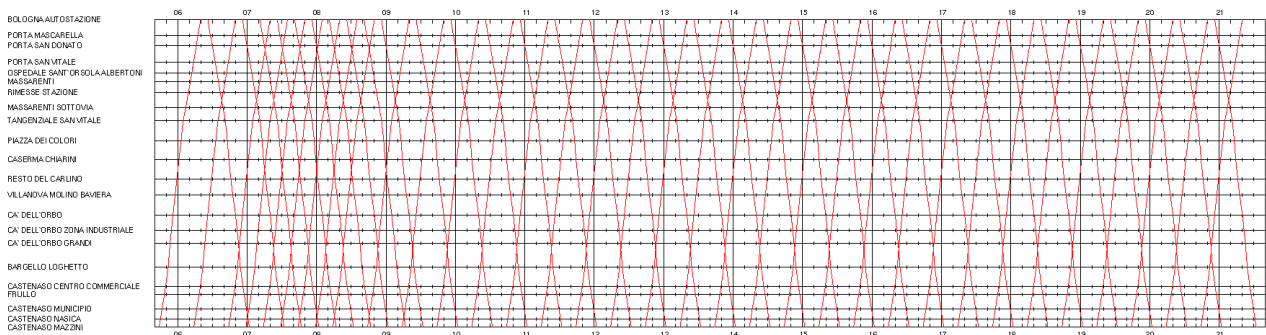


Figura 5-2: rappresentazione mediante orario grafico del modello d'esercizio previsto per la linea Metrobus AC

Il fabbisogno di materiale rotabile è stato stimato in base alle ipotesi di turnazione dei mezzi, riportate con colori diversi per le corse effettuate da ciascun mezzo, in Figura 5-3 e Figura 5-4.

BOLOGNA AUTOSTAZIONE - MEDICINA CM

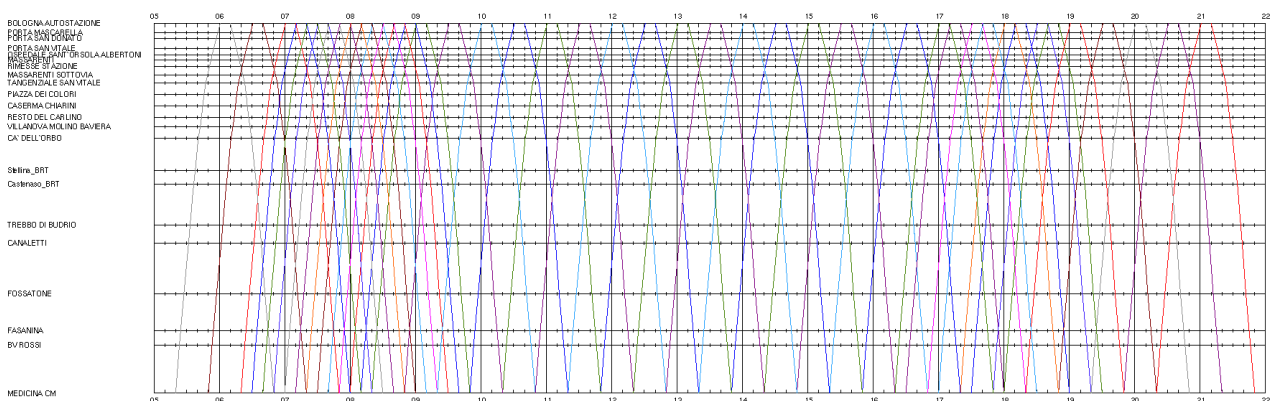


Figura 5-3: ipotesi di turnazione dei mezzi - linea Metrobus AV⁵

⁵ L'ipotesi di turnazione dei mezzi tiene conto anche delle esigenze di soste per ricarica dei mezzi

BOLOGNA AUTOSTAZIONE - CASTENASO MAZZINI

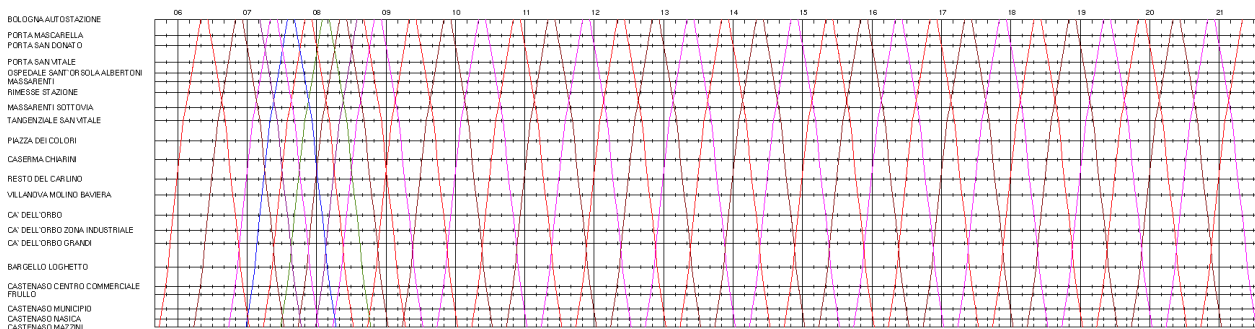


Figura 5-4: ipotesi di turnazione dei mezzi - linea Metrobus AC⁶

Tenuto conto delle scorte necessarie per poter far fronte ai fermo-macchina per esigenze manutentive (10%), il fabbisogno di mezzi risulta complessivamente pari a:

- 10 mezzi in servizio + 1 mezzo di scorta, per la linea Metrobus AV
- 6 mezzi in servizio + 1 mezzo di scorta, per la linea Metrobus AC

per un totale di 18 mezzi.

5.2 I punti di “opportunity charging”

Di fatto la scelta di progetto è orientata al mezzo cosiddetto ebus di Tipo B, ovvero caratterizzato da massima capacità delle batterie e stazioni ricarica in corrispondenza di uno o entrambi i capolinea.

La soluzione prevede la realizzazione dei punti di ricarica così articolati:

- per il servizio AV (cfr. Tabella 5.1):
 - capolinea di Medicina CM e deposito;
 - capolinea di Bologna Autostazione;
- per il servizio AC (cfr. Tabella 5.2):
 - capolinea di Castenaso;
 - capolinea di Bologna Autostazione;
 - deposito di Due Madonne.

In particolare, il sistema si basa su un modello di esercizio che permette:

- una ricarica lenta notturna in corrispondenza rispettivamente dei depositi di sosta notturna di Medicina e di Due Madonne per il servizio AV e AC;
- una ricarica veloce in corrispondenza dei capolinea di Medicina e di Castenaso rispettivamente per il servizio AV e AC e una in corrispondenza del capolinea di Bologna Autostazione per ciascuna delle linee.

Le tabelle seguenti riportano altresì i dati di kW necessari ai diversi punti di ricarica e della tipologia di cabina di trasformazione.

Punto di ricarica	Luogo di ricarica	Tempo di ricarica	Tipo stazione di ricarica
Luogo di inizio/fine turno:	Medicina	9 ore	10 x 50 kW (Lenta)
Capolinea 1:	Medicina	10'/30'	1 x 300 kW (Veloce)
Capolinea 2:	Bologna Autostazione	< 10'	1 x 300 kW (Veloce)(*)
Officina Manutentiva:	Bologna Due Madonne	-	1 x 300 kW (Veloce)(**)

Tabella 5.1: stazioni di ricarica servizio Metrobus AV

⁶ L'ipotesi di turnazione dei mezzi tiene conto anche delle esigenze di soste per ricarica dei mezzi

Punto di ricarica	Luogo di ricarica	Tempo di ricarica	Tipo stazione di ricarica
Luogo di inizio/fine turno:	Bologna Due Madonne	9 ore	10 x 50 kW (Lenta)
Capolinea 1:	Castenaso	15'	1 x 300 kW (Veloce)
Capolinea 2:	Bologna Autostazione	< 10'	1 x 300 kW (Veloce)(*)
Officina Manutentiva:	Bologna Due Madonne	-	1 x 300 kW (Veloce)(**)

Tabella 5.2: stazioni di ricarica servizio Metrobus AC

(*) c/o Bologna Autostazione sono in prima istanza previste due Stazioni di ricarica veloce nel caso di due ricariche contemporanee sulla direttrice S. Vitale

(**) Stazioni di ricarica VELOCE c/o Officina Bologna Due Madonne: 1 = da 300 kW condivisa per entrambe le linee(necessaria per le attività manutentive: prove e/o verifiche sistema ricarica veloce bus)

Medicina	1 x 1000 kVA(serve le 10 lente + 1 veloce)
Castenaso	1 x 350 kVA
Bologna Autostazione	1 x 700 kVA (*)
Bologna Due Madonne	1 x 700 kVA (**: serve le 6 lente + 1 veloce)

Tabella 5.3: fabbisogno cabine MT/BT⁷

L'alimentazione degli impianti di ricarica sarà garantita attraverso l'allacciamento alla rete di distribuzione elettrica a Media Tensione. L'allacciamento sarà realizzato mediante un nuovo collegamento con inserimento in antenna dastazione AT/MT o da cabina secondaria MT/BT⁸. Una cabina elettrica dedicata ospiterà oltre agli apparati di trasformazione il gruppo si misura. Dalla cabina elettrica la rete di distribuzione interna, in cavidotti interrati, garantirà l'alimentazione dei diversi punti di ricarica, lenta e/o veloce.

Le seguenti Figura 5-5, Figura 5-6, Figura 5-7 e Figura 5-8 riportano le planimetrie degli allacciamenti elettrici per l'alimentazione dei punti di ricarica previsti.

⁷ nel calcolo delle potenze delle cabine non sono stati applicati coefficienti di contemporaneità per le ricariche lente.

⁸ nelle successive fasi di approfondimento progettuale andrà verificata la possibilità di allacciamento in entra-esce tra due cabine secondarie distinte o da cabina primaria per la maggior affidabilità e continuità di servizio che questo tipo di collegamenti offrono.

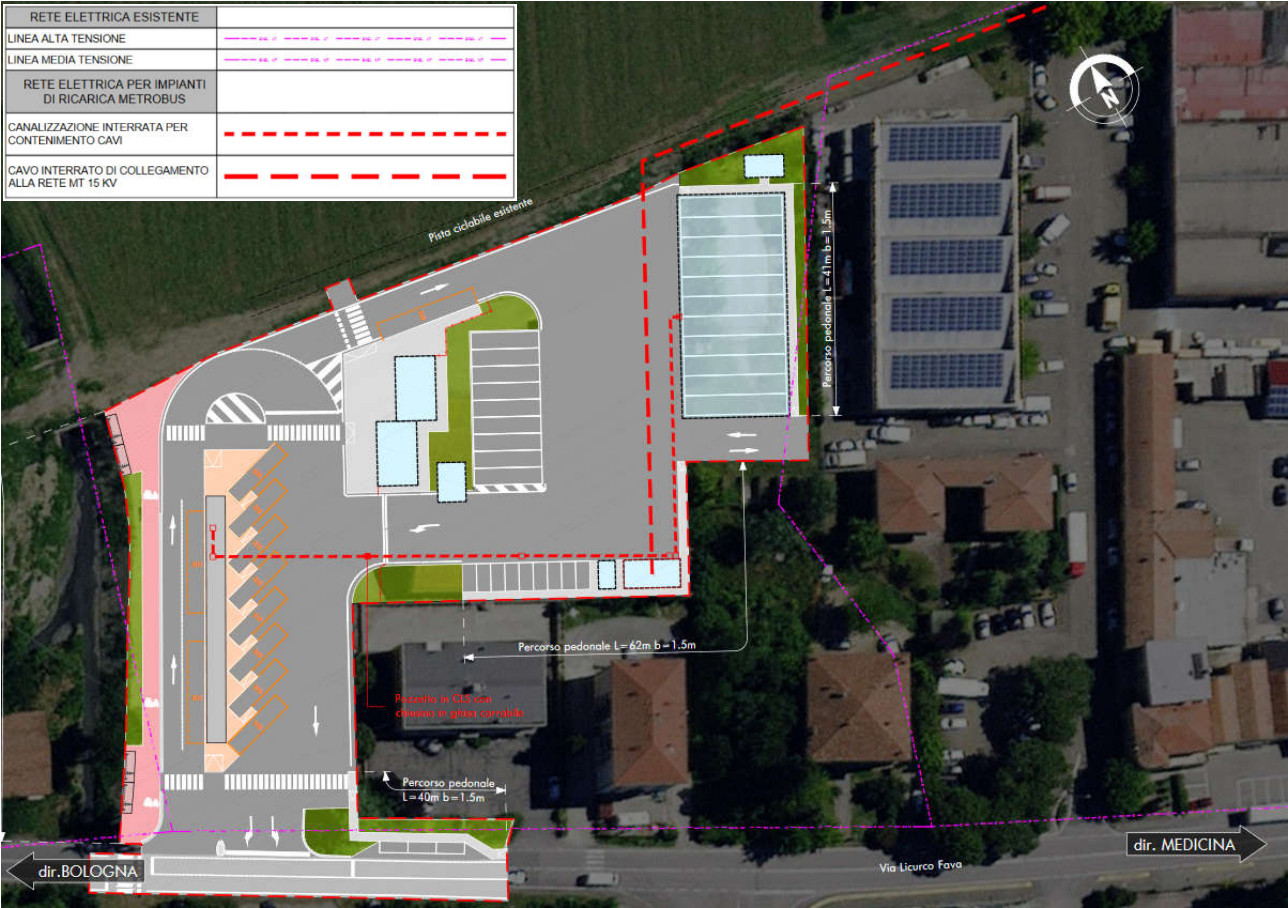


Figura 5-5:allacciamenti elettrici degli impianti di ricarica (lenta e veloce) del Centro di Mobilità e deposito di Medicina

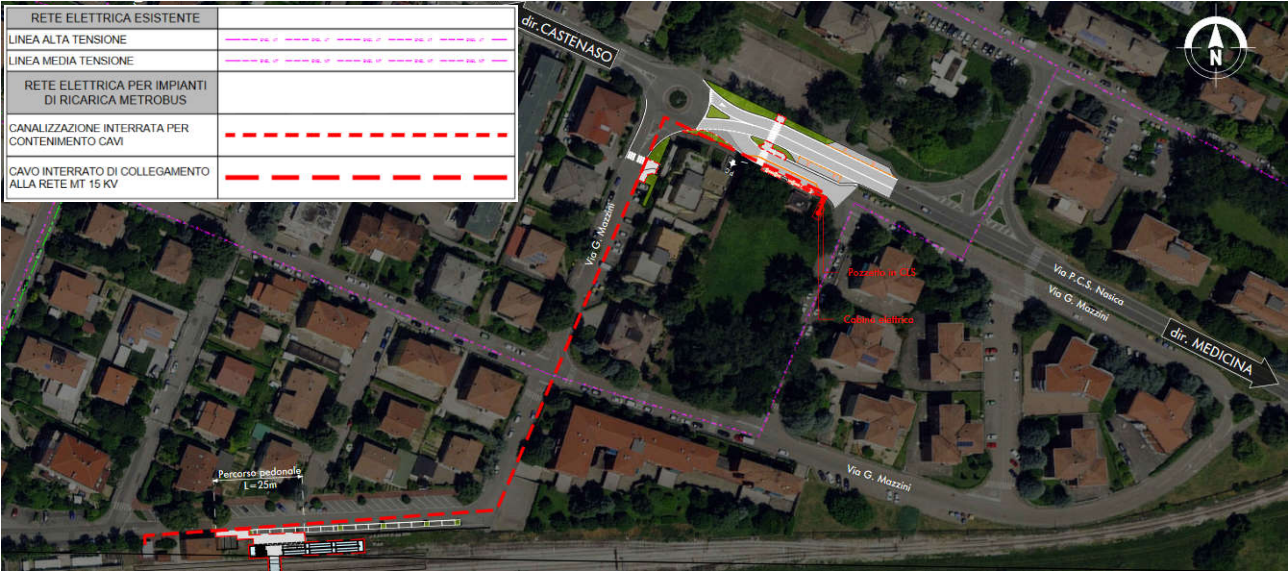


Figura 5-6: allacciamenti elettrici degli impianti di ricarica (veloce) del capolinea di Castenaso Mazzini

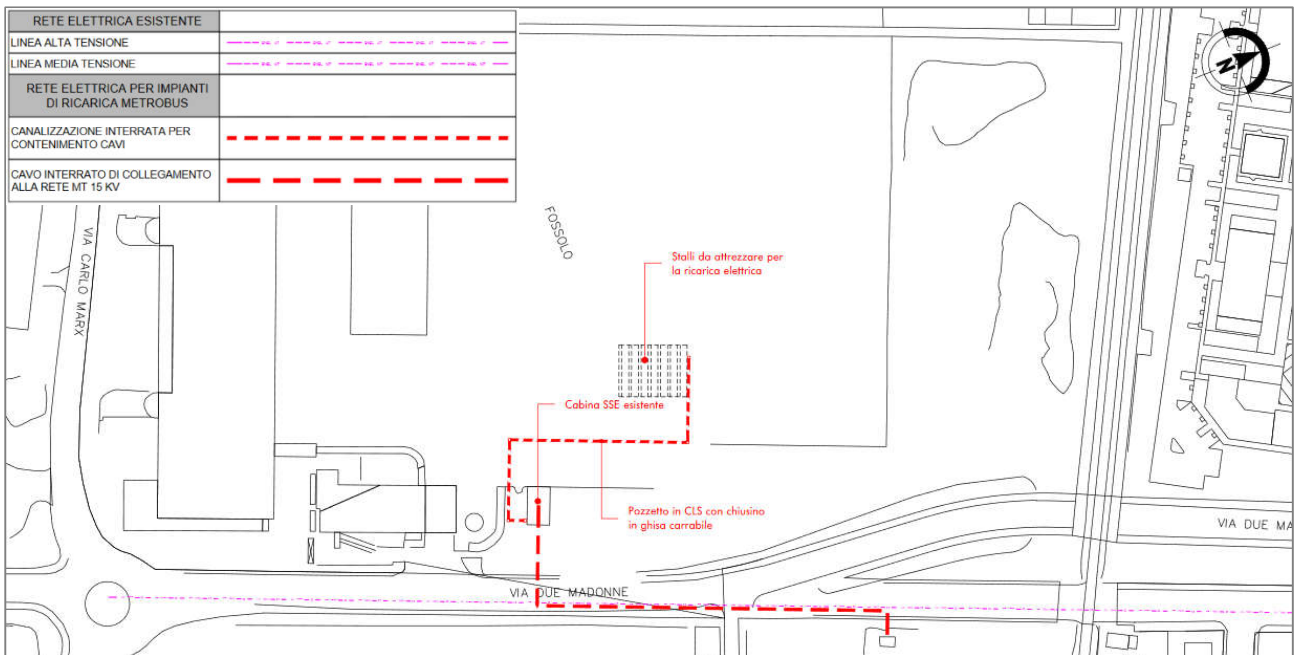


Figura 5-7: allacciamenti elettrici degli impianti di ricarica (lenta e veloce) del deposito e centro di manutenzione di Due Madonne

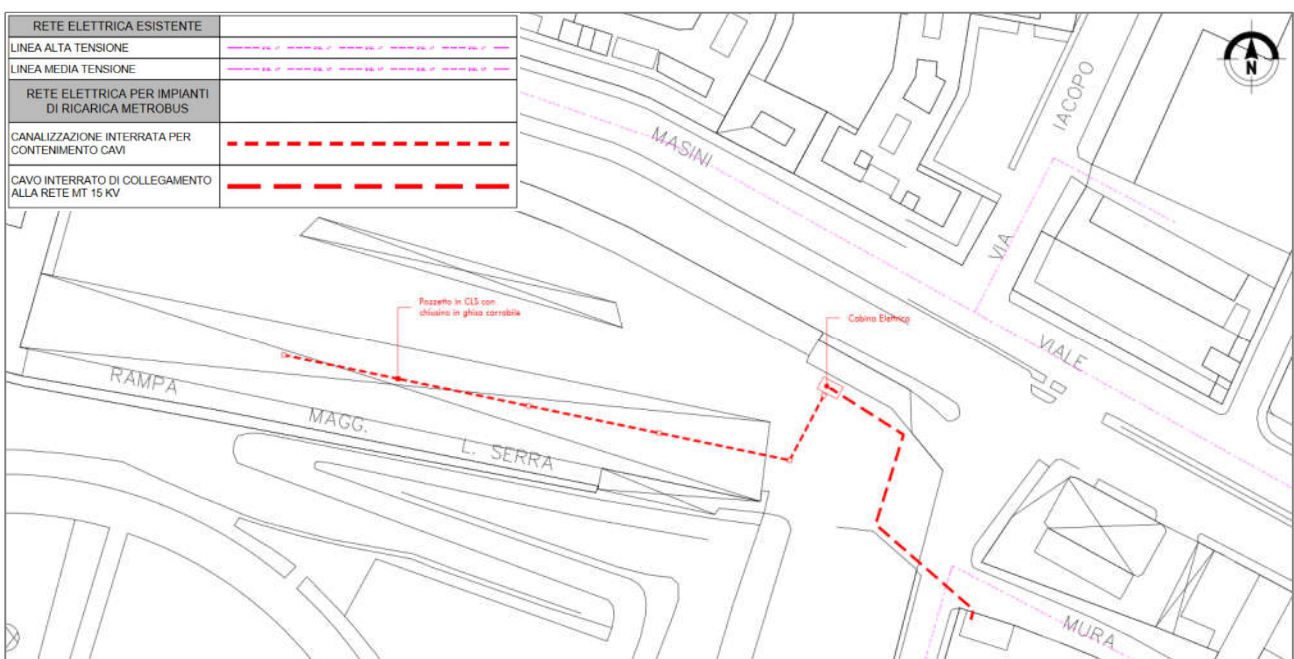


Figura 5-8: allacciamenti elettrici degli impianti di ricarica (veloce) del capolinea di Bologna Autostazione

5.3 L'andamento della carica per i servizi AV e AC

Il dimensionamento degli impianti di ricarica (in termini di tipologia, consistenza e distribuzione delle stazioni) ha tenuto conto di:

- caratteristiche del tracciato;
- tipologia di servizio prevista (frequenza delle fermate);
- caratteristiche dei mezzi (dimensioni e capacità prevista);
- modello d'esercizio e conseguente turnazione dei mezzi.

Obiettivo del dimensionamento degli impianti di ricarica è garantire una autonomia dei singoli mezzi in linea con il proprio profilo di missione giornaliera.

Per ciascun mezzo è stata verificata la possibilità di garantire, mediante la ricarica completa notturna e ricariche parziali diurne, una autonomia sufficiente al completamento del proprio profilo di missione, derivante dal modello d'esercizio di progetto. A tale scopo sono state fatte, sulla base dei dati disponibili, le seguenti assunzioni:

- capacità installata sui mezzi: 450 kWh
- consumo medio dei mezzi:
 - per i mezzi del servizio Metrobus AV: 2,6 kWh/km
 - per i mezzi del servizio Metrobus AC: 2,8 kWh/km
- ricarica veloce: 5 kWh/minuto
- aleatorietà del tempo di arrivo al capolinea per eventuali ritardi:
 - per i mezzi del servizio Metrobus AV: 5 minuti
 - per i mezzi del servizio Metrobus AC: 3 minuti
- stato di carica delle batterie (o SOC - *State Of Charge*) in condizioni di esercizio: $\geq 35\%$

In Figura 5-9 e Figura 5-10, e in Figura 5-11 e Figura 5-12, rispettivamente per la linea Metrobus AC e Metrobus AV, sono riportati il profilo di missione critico (ovvero quello del mezzo che presenta il turno giornaliero più gravoso) e gli andamenti, durante il turno di servizio, della capacità residua delle batterie e del SOC. L'andamento del SOC dimostra la disponibilità di una quantità di carica delle batterie sempre sufficiente all'effettuazione del servizio previsto (SOC $\geq 35\%$ a fine corsa).

BOLOGNA AUTOSTAZIONE - CASTENASO MAZZINI

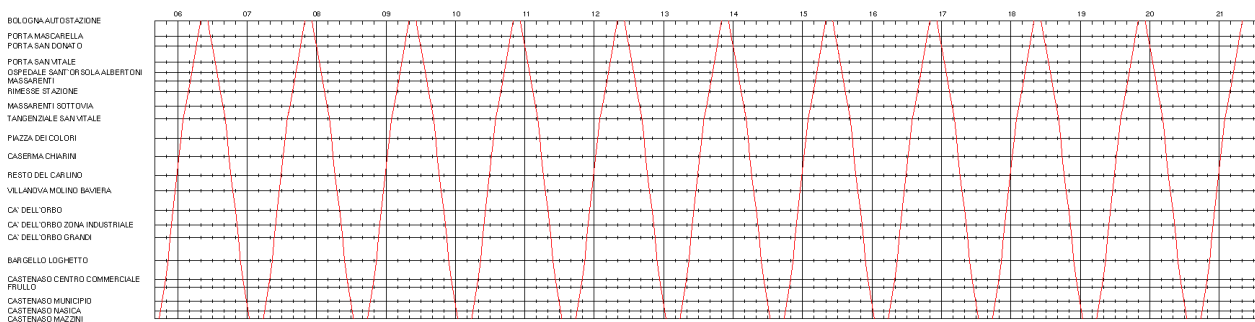


Figura 5-9: linea Metrobus AC – Profilo di missione critico

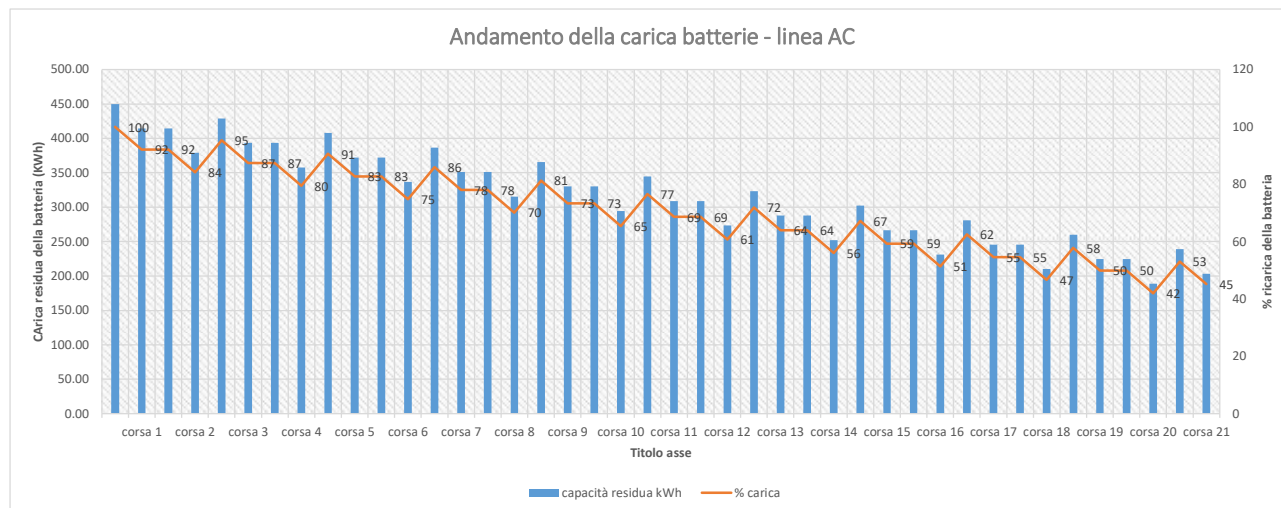
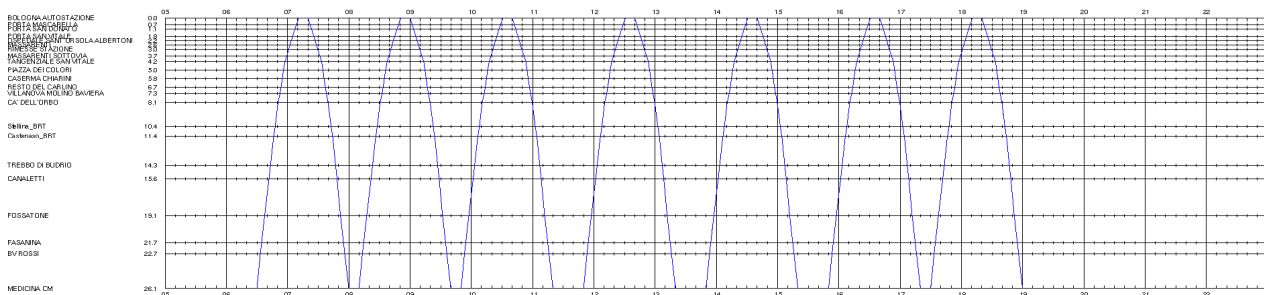


Figura 5-10: linea Metrobus AC - andamento della capacità residua e del SOC delle batterie



Andamento della carica batterie - linea AV

Corsa	capacità residua kWh	% carica
1	450	100.00
2	380	85
3	340	91
4	300	77
5	320	82
6	260	68
7	240	73
8	290	59
9	220	64
10	240	50
11	170	55
12	290	41
13	240	69
14	200	54
15	270	60
16	190	45
17	330	73
18	260	58
19	290	64
20	220	49
21	340	77
22	280	63
23	300	68
24	240	54
25	270	59
26	190	45
27	230	50
28	150	36

ente
Città metropolitana di Bologna

ATI
Consorzio Stabile NET Engineering | Ing. Andrea Spinosa | Ing. Pasquale del Sorbo

Appendice 1

6 Costo connessioni rete elettrica – ENEL distribuzione

6.1 Connessioni permanenti ordinarie

Il costo a carico del cliente per la realizzazione di una nuova connessione è stabilito dalla delibera AEEGSI (ora ARERA) 568/2019/R/eel e si compone di 3 parti:

- A: Quota potenza
- B: Quota distanza
- C: Quota per oneri amministrativi

definite come segue:

A: Quota potenza, determinata in base alla potenza disponibile richiesta dal cliente, varia a seconda della Tensione di alimentazione:

Connessioni in Bassa Tensione

70,41 €/kW

Connessioni in Media Tensione

56,04 €/kW

B: Quota distanza - determinata in base alla distanza convenzionale del punto di prelievo rispetto alla:

- cabina di trasformazione MT/BT di riferimento per le connessioni in Bassa Tensione
- cabina di trasformazione AT/MT di riferimento per le connessioni in Media Tensione

Di seguito i valori per le connessioni in Bassa Tensione indicati nella tabella 1 dalla suddetta Delibera (<https://www.arera.it/allegati/docs/19/568-19allc.pdf>):

Quota fissa per distanza entro i 200 metri dalla cabina di riferimento: € 187,26

Quota aggiuntiva da applicare per ogni 100 metri o frazione superiore a 50 metri per distanza oltre i 200 e fino a 700 metri dalla cabina di riferimento: € 93,87

Quota aggiuntiva da applicare per ogni 100 metri o frazione superiore a 50 metri per distanza oltre i 700 e fino a 1.200 metri dalla cabina di riferimento: € 187,26

Quota aggiuntiva da applicare per ogni 100 metri o frazione superiore a 50 metri per distanza oltre i 1200 metri dalla cabina di riferimento: € 374,52

Per i clienti che richiedono una connessione per abitazioni di residenza anagrafica con potenza disponibile fino a 3,3 kW è applicata la quota distanza fino a 200 metri.

Di seguito i valori per le connessioni in Media Tensione indicati nella tabella 3 dalla suddetta Delibera (<https://www.arera.it/allegati/docs/19/568-19allc.pdf>):

Quota fissa per distanza entro i 1000 metri dalla cabina di riferimento: € 469,32

Quota aggiuntiva da applicare per ogni 100 metri o frazione superiore a 50 metri per distanza oltre i 1000 metri dalla cabina di riferimento: € 46,94

C: Quota per gli oneri amministrativi: importo fisso pari a 25,81 €

L'importo totale del costo della connessione si ottiene sommando i valori "A+B+C"

6.1.1 Connessioni permanenti particolari in bassa tensione

Sono considerate tipologie permanenti particolari le connessioni relative a:

- Installazioni non presidiate in permanenza, situate fuori dagli abitati;
- Insegne luminose e pubblicitarie;
- Impianti di illuminazione di monumenti e simili;
- Impianti di risalita e simili;
- Installazioni mobili e precarie (roulottes e simili);
- Singole costruzioni non abitate in permanenza o comunque non di residenza anagrafica del proprietario (ville, case di caccia, rifugi di montagna e simili) situate oltre 2.000 metri dalla cabina media/bassa tensione di riferimento;

- Costruzioni che non siano raggiungibili con strada percorribile da automezzi o che siano separate dagli impianti di distribuzione esistenti da tratti di mare, di lago o laguna.

Per queste tipologie di connessioni il contributo per la connessione è calcolato sulla base della “spesa relativa”.

6.1.2 Spostamento di un gruppo di misura:

- di Bassa Tensione entro 10 metri dalla precedente ubicazione: € 202,21
- di Bassa Tensione oltre 10 metri o di Media Tensione: a spesa relativa

6.1.3 Aumento della potenza disponibile per forniture permanenti

Il costo a carico del Cliente per un aumento di potenza è stabilito dalla delibera AEEGSI (ora ARERA) 568/2019/R/eel e si compone di 2 parti:

- A: Quota potenza = differenza di potenza disponibile espressa in kW moltiplicato per 70,41 € (per connessioni in Bassa Tensione) o per 56,04 € (per connessioni in Media Tensione)
- B: Quota per oneri amministrativi = importo fisso di 25,81 €

Il costo totale per aumenti di potenza si ottiene sommando i valori “A+B”

Contributi in quota fissa per il passaggio dalla bassa alla media tensione

Quota fissa pari a 442,05 €

6.2 Connessioni temporanee

Le connessioni temporanee sono di durata limitata nel tempo; la durata massima è di un anno, prorogabile per un altro anno.

Fanno eccezione i cantieri, la cui durata massima è di 3 anni, prorogabili al massimo per altri 3 anni.

L'importo per la connessione di queste forniture è determinato sulla base di parametri fissi (c.d. a forfait) alle seguenti condizioni:

- Potenza richiesta fino a 40 kW in Bassa Tensione
- Distanza entro 20 metri dagli impianti di rete permanenti già esistenti
- Nessuna necessità di realizzazione di una cabina di trasformazione

Nei suddetti casi gli importi al netto di IVA sono:

- Se necessaria la realizzazione di un attraversamento stradale: € 250,14
- Se non necessaria la realizzazione di un attraversamento stradale: € 150,09

A tale importo va sommato un ulteriore contributo fisso, a copertura degli oneri amministrativi, pari a € 25,81.

Per eventuali connessioni e/o distacchi da eseguire a richiesta fuori del normale orario di lavoro si applica il corrispettivo di € 18,68 ad operazione.

Il costo totale delle connessioni temporanee si ottiene sommando l'importo a forfait suindicato + l'importo a copertura degli oneri amministrativi + l'eventuale importo per connessione e/o distacco fuori il normale orario di lavoro

Il costo per la connessione temporanea si determina, invece, sulla base della spesa relativa nei seguenti casi:

- Connessione richiesta in Media Tensione
- Potenza richiesta superiore a 40 kW in Bassa Tensione
- Potenza richiesta fino a 40 kW in Bassa Tensione che necessita la realizzazione di una cabina provvisoria di trasformazione
- Potenza richiesta fino a 40 kW in Bassa Tensione che distano oltre 20 m dagli impianti di rete permanenti già esistenti

6.2.1 Contributi per alimentazioni a mezzo impianto di generazione locale:

Corrispettivo per ogni kW di potenza messa a disposizione: 69,93 €/kW

Quota fissa: 482,30 €

6.2.2 Contributi per altre prestazioni specifiche:

Per disattivazioni e attivazioni a seguito di morosità, riallacciamento e distacco di utenze stagionali a carattere ricorrente: 25,10 €

Per richieste di verifica del corretto funzionamento del gruppo di misura: 46,49 €

Per richieste di verifica della tensione di alimentazione: 139,47 €

6.2.3 Anticipo sui contributi per connessioni valutate a preventivo

Importo fisso pari a 100 €

7 Costo punti di ricarica

7.1 Dati tecnico/economici stazioni di ricarica lenta

Stazione fissa con connettore CSS:

a) Potenza 150 kW – Costo indicativo 75.000 Euro

Ricarica di 2,5 kW/1' – Esempio: batteria da 450 kWh ricaricata in 3 h

b) Potenza 50 kW – Costo indicativo 41.000 Euro

Ricarica di 0,83 kW/1' – Esempio: batteria da 450 kWh ricaricata in 9 h

Stazione mobile con connettore CEE 63 A:

c) Potenza 40 kW – Costo indicativo 38.000 Euro

Stazione fissa con pantografo:

d) Potenza 150 kW – Costo indicativo 80.000 Euro

7.2 Dati tecnici stazioni di ricarica ad alte prestazioni

Taglie di Potenza: 150-300-450-600 kW (Fonte ABB)

Costo: 150.000 Euro Potenza di carica 300 kW

Fonte: <https://www.sasabz.it/index.php/2020/01/07/bus-elettrici-nuova-stazione-di-ricarica-a-bolzano/>

7.3 Costi allacci MT/BT

<https://www.e-distribuzione.it/connezzione-alla-rete/importi-per-le-connezzioni.html>

NOTA BENE: il limite della potenza nelle installazioni BT per ENEL e CEI è di 120 KVA che corrispondono (con rendimento $\eta=0,85$) a 100 kW resi in cc lato stazione di ricarica.

(Norme CEI 0-16 e CEI 0-21)

7.4 CosticabineMT/BT

<http://www.retapiu.it/site/upload/ent3/1/Soluzioni%20tecniche%20convenzionali%20e%20costi%20medi.pdf>