



Ricerca di Sistema elettrico

# Dimensionamento del sistema di accumulo Second Life

L. Bartolucci, S. Cordiner, V. Mulone, M. Santarelli

## DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI ACCUMULO SECOND LIFE

L. Bartolucci, S. Cordiner, V. Mulone, M. Santarelli  
Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Roma "Tor Vergata".

Dicembre 2020

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: *Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti*

Work package: *WP1 – Accumulo Elettrochimico*

Linea di attività: *LA66 - Dimensionamento del sistema di accumulo Second Life per applicazioni di ricarica veicolare*

Responsabile del Progetto: Ing. Giulia Monteleone ENEA

Responsabile del Work package: Dr. Pier Paolo Proisini ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione ENEA- Università di Roma "Tor Vergata" per una attività di ricerca dal titolo: *"Dimensionamento ed ottimizzazione della strategia di controllo del sistema di accumulo Second Life"*

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Manlio Pasquali

Responsabile scientifico Università di Roma "Tor Vergata": *Prof. Vincenzo Mulone*

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E DEI RISULTATI .....	5
2.1 CASO STUDIO: STAZIONE DI RICARICA PER VEICOLI ELETTRICI PRESSO LA SEDE CASACCIA DELL'ENEA .....	5
2.2 DEFINIZIONE DEL PROFILO GIORNALIERO MEDIO DI ENERGIA FORNITA DALLA STAZIONE DI RICARICA.....	6
2.2.1 <i>Metodo per la ricostruzione di un ciclo guida di riferimento</i> .....	6
2.2.2 <i>Metodo per la stima della domanda energetica di un veicolo elettrico in condizioni di guida reali</i> .....	8
2.2.3 <i>Definizione del profilo di energia giornaliero richiesto</i> .....	10
3 DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI ACCUMULO STAZIONARIO CON BATTERIE SECOND LIFE PER L'OFFERTA DI SERVIZI ANCILLARI ALLA RETE ELETTRICA .....	11
3.1 DESIGN E STRATEGIA DI CONTROLLO DELLA STAZIONE DI RICARICA .....	12
3.2 DESIGN E STRATEGIA DI CONTROLLO PER IL SISTEMA DI ACCUMULO STAZIONARIO .....	13
4 CONCLUSIONI.....	19
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	20
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI .....	21

## Sommario

Il presente Rapporto Tecnico descrive le attività del primo anno del progetto “Dimensionamento ed Ottimizzazione della strategia di controllo del sistema di accumulo Second Life” condotto nel Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’Università di Roma Tor Vergata. Le attività del primo anno hanno riguardato il dimensionamento di un sistema di accumulo stazionario realizzato con batterie Second Life accoppiato ad una stazione di ricarica per veicoli elettrici. L’obiettivo del dimensionamento è consistito nel garantire flessibilità al sistema di ricarica in modo da poter offrire servizi ancillari alla rete quali “peak shaving” e “load shifting”. In particolare, si è affrontato il caso studio di una stazione di ricarica ubicata presso la sede Casaccia dell’ENEA.

Le attività di progettazione del sistema di accumulo stazionario sono state condotte sulla base di due elementi fondamentali: da un lato la modellazione della domanda energetica dei veicoli elettrici, e dall’altro la definizione di una logica di controllo per eseguire i processi di ricarica. A partire dalla disponibilità di dati riguardanti la permanenza nel parcheggio di veicoli per trasporto privato, e misurazioni effettuate su un veicolo elettrico -Nissan LEAF- è stato implementato un modello multi lineare per il calcolo della domanda energetica dei veicoli elettrici. Si è proceduto quindi alla caratterizzazione del carico elettrico giornaliero della stazione di ricarica in funzione del numero e tipologia di colonnine installate, e della logica di controllo.

Infine, è stato effettuato un primo dimensionamento del sistema di accumulo considerando le specifiche di batterie second life e le caratteristiche della stazione in termini di potenza di input/output ed energia scambiata.

## 1 Introduzione

Gli ambiziosi obiettivi posti dall’Unione Europea nel “Paris Agreement”, in termini di decarbonizzazione del sistema energetico e diminuzione delle emissioni di gas inquinanti, hanno comportato lo sviluppo di politiche energetiche nazionali basate sull’aumento dell’uso di fonti energetiche rinnovabili, insieme all’elettrificazione del sistema dei trasporti [1]. Per quanto riguarda l’Italia, la stima del Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima (PNIEC) al 2030 prevede un parco di veicoli elettrici circolanti pari a 6 milioni, di cui 4 milioni BEV (Battery Electric Vehicle) e i rimanenti 2 milioni PHEV (Plugin Hybrid Electric Vehicle), insieme al raggiungimento di una quota del 30% dei consumi finali da fonti rinnovabili [2]. Si prevede al contempo che la concomitanza di una significativa evoluzione del parco elettrico nazionale e di un inevitabile incremento della domanda nel settore dei trasporti possa rendere il sistema elettrico nazionale più vulnerabile e inefficiente. Congestioni di rete, variabilità di frequenza e deficit di tensione rappresentano i principali elementi di vulnerabilità che il gestore della rete elettrica dovrà risolvere, a fronte di un progressivo aumento del fabbisogno di riserva, della riduzione dell’inerzia del sistema e del margine di adeguatezza derivanti dal processo di *decommissioning* delle centrali termoelettriche [3].

Alla luce del contesto energetico illustrato, e all’aumentare della frazione di energia convertita da fonti rinnovabili, la possibilità di gestire i carichi sarà fondamentale, assicurando riserve di flessibilità al gestore della rete. I veicoli elettrici, nel caso in cui i processi di ricarica siano gestiti opportunamente, potranno contribuire al bilanciamento della rete di distribuzione locale [4]. Sono state proposte a tale scopo, di recente, alcune strategie di controllo dei flussi energetici riconducibili alla mobilità elettrica secondo gli schemi “grid-to-vehicle” (G2V) e “vehicle-to-grid” (V2G), consentendo l’utilizzo della batteria del veicolo quando connesso alla rete attraverso la colonnina di ricarica con flussi bidirezionali [5]. Particolarmente importante risulta l’accuratezza dei modelli di stima e controllo dei flussi energetici, dato che si deve tenere conto delle incertezze di alcuni parametri fondamentali quali lo stato di carica della batteria dei veicoli, gli orari di arrivo e partenza, lo stato della stazione di ricarica in termini di numero di veicoli parcheggiati al variare del tempo, e le condizioni di traffico. A tale proposito, questo Rapporto Tecnico (RT) intende descrivere un metodo per definire con opportuna accuratezza la domanda energetica di una stazione di ricarica per veicoli elettrici. Il caso studio preso in esame è quello del parcheggio della sede Casaccia dell’ENEA.

Poiché il sistema in analisi considera veicoli in grado di gestire scambi di corrente unidirezionali (rete-batteria), la flessibilità del carico risulta limitata dalle contingenti esigenze dei proprietari degli stessi veicoli. Nell’ottica di garantire un servizio ancillare alla rete, è stato dunque introdotto, come sorgente di flessibilità,

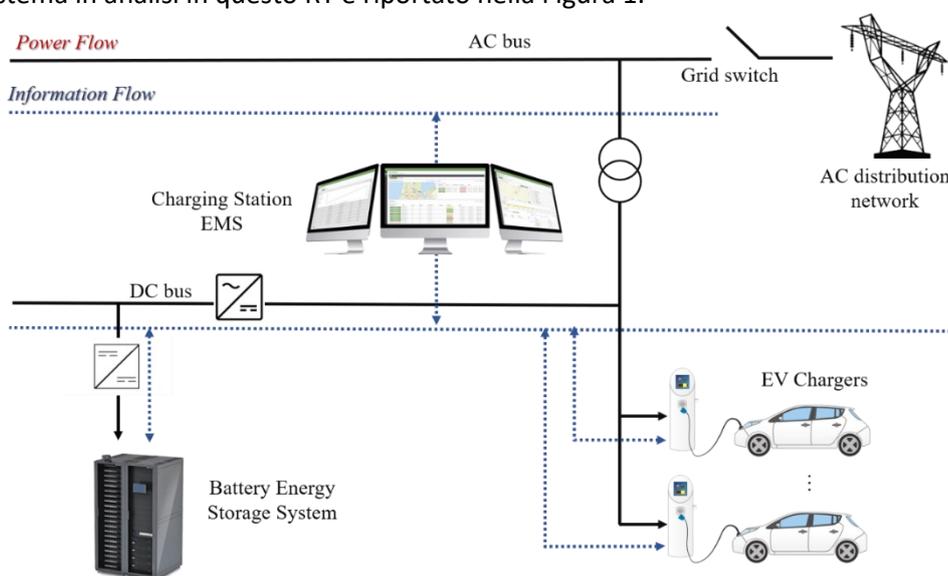
un sistema di accumulo stazionario costituito da batterie second-life. Il sistema di accumulo, infatti, si comporta da buffer tra rete e veicoli, ricaricandosi a ridotto assorbimento e disaccoppiando le richieste dei veicoli – in particolare riducendo l'entità dei picchi - dalla gestione degli scambi con la rete.

Nel contesto disegnato l'obiettivo di questo RT, a conclusione delle attività del primo anno condotte nel Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Roma Tor Vergata, consiste nel dimensionamento del sistema di accumulo stazionario second life per offrire servizi ancillari alla rete in ottica G2V. A tale riferimento sono considerate strategie di controllo semplificate basate su regole, al solo scopo del dimensionamento, in modo da condurre le attività di progettazione della stazione di ricarica. Saranno inoltre illustrati i principali parametri di prestazione del sistema considerando l'effetto del dimensionamento delle colonnine di ricarica.

## 2 Descrizione delle attività svolte e dei risultati

### 2.1 Caso studio: stazione di ricarica per veicoli elettrici presso la sede Casaccia dell'ENEA

Il layout del sistema in analisi in questo RT è riportato nella Figura 1.



**Figura 1. Schema di una stazione di ricarica per veicoli elettrici alimentata dalla rete elettrica con sistema di accumulo stazionario**

Il sistema è caratterizzato dai seguenti sottosistemi:

- Sistema di connessione alla rete elettrica
- Colonnine di ricarica per veicoli elettrici (EV Charger)
- Sistema di accumulo elettrochimico (BESS - Battery Energy Storage System)
- Sistema di controllo dei flussi energetici (Charging Station EMS)

Il pacco batterie è collegato mediante un DC/DC converter a un bus in corrente continua operante a 48V DC, mentre le colonnine di ricarica sono connesse al bus in corrente alternata; la tensione operativa è variabile in funzione della taglia. In particolare, prendendo come riferimento due dei modelli attualmente disponibili in commercio, la colonnina può operare a bassa o media tensione con corrente rispettivamente monofase o trifase. Le principali caratteristiche tecniche delle colonnine, alle quali ci si riferisce, sono riportate in Tabella 1.

**Tabella 1. Caratteristiche tecniche delle stazioni di ricarica standard AC a colonna [6]**

<b>Applicazione</b>	<b>Pubblico/ Privato</b>	<b>Pubblico/ Privato</b>	<b>Pubblico/ Privato</b>	<b>Pubblico/ Privato</b>
<b>Modalità di carica</b>	Modo 3	Modo 3	Modo 3	Modo 3
<b>Numero prese</b>	1	2	1	2
<b>Potenza di output</b>	7,4kW	2x7,4kW	22kW	2x22kW
<b>Setpoint potenza inferiore</b>	3,7kW	2x3,7kW	11kW	2x11kW
<b>Corrente/Tensione nominali</b>	32A/230V	2x32A/230V	32A/400V	2x32A/400V
<b>Tipologia utenza</b>	Monofase	Monofase	Trifase	Trifase

Le diverse tipologie di colonnine considerate prevedono la possibilità di operare in modalità manuale ad un set-point di potenza inferiore a quella nominale. Tuttavia, tale possibilità non è stata considerata nel presente studio.

Per quanto riguarda il sistema di accumulo stazionario, si prevede sia costituito da celle di batterie utilizzate precedentemente in veicoli BEV e PHEV. Sebbene queste batterie non riescano più a erogare correnti elevate come tipicamente richiesto in applicazioni veicolari, la capacità residua risulta ancora molto elevata (circa pari all’80% di quella nominale) e quindi adatta per uso stazionario second life [7]. In Tabella 2 sono riportate le principali specifiche delle batterie in questione.

**Tabella 2. Specifiche tecniche delle celle delle batterie second-life**

<b>Capacità</b>	Nominale	20Ah
	Residua	18Ah
<b>Corrente</b>	Max	10A
<b>Tensione</b>	Max	4.15
	Nominale	3.6V
<b>Numero di celle per modulo</b>		12
<b>Potenza</b>	Max	432W

## 2.2 Definizione del profilo giornaliero medio di energia fornita dalla stazione di ricarica

Il dimensionamento su base energetica della stazione di ricarica è funzione delle seguenti fondamentali informazioni:

- Numero medio di veicoli in ricarica presso la stazione di ricarica
- Orario di arrivo e di permanenza dei veicoli presso la stazione di ricarica
- Ciclo di guida dei veicoli in modo da poter valutare i consumi energetici prima che i veicoli giungano alla stazione di ricarica.
- Stime, tramite modelli, di consumo energetico dei veicoli elettrici

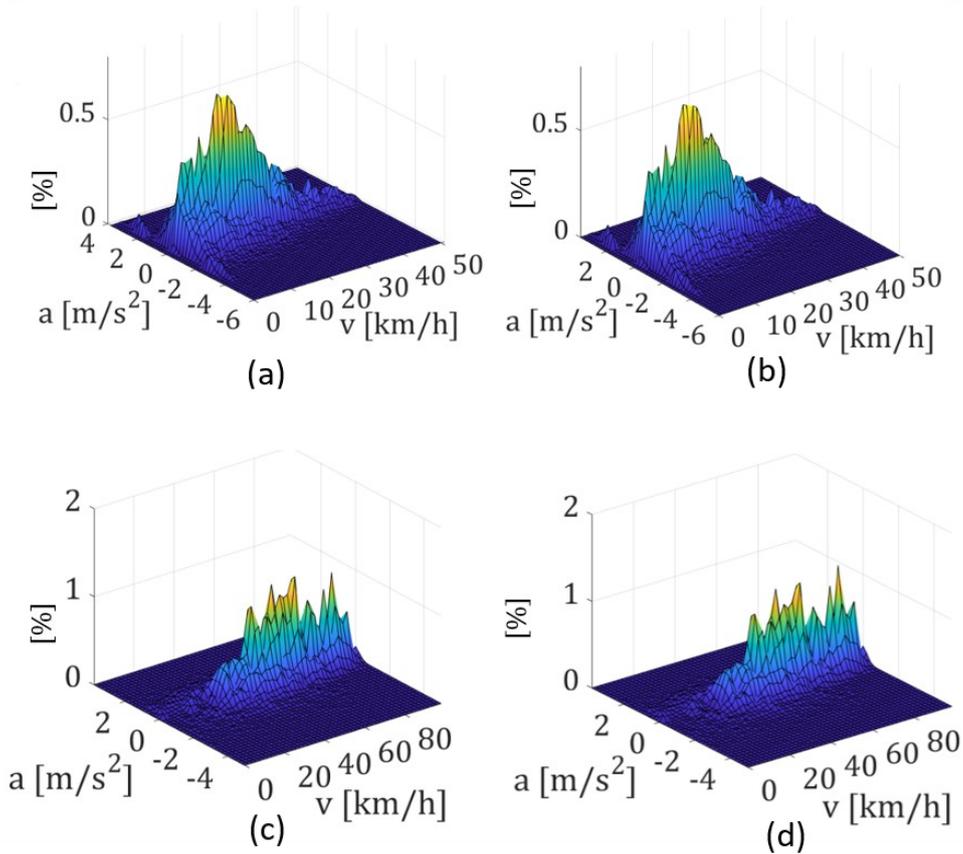
I primi due set di dati sono stati reperiti tramite questionario, registrando per un intero anno l’orario di arrivo e di partenza dal parcheggio della sede Casaccia dell’ENEA. Nel medesimo questionario sono inoltre state registrate le distanze percorse in strade urbana o extra-urbane. A partire da tali dati si è proceduto all’implementazione di una procedura per la ricostruzione di cicli guida da poter usare in un opportuno modello di consumo. Si è inoltre considerato un modello di consumo ad hoc per un veicolo elettrico di riferimento, adattando i dati già menzionati corrispondenti a veicoli alimentati con motore termico: la descrizione dettagliata è riportata nel sottoparagrafo 2.2.2.

### 2.2.1 Metodo per la ricostruzione di un ciclo guida di riferimento

Il valore dell'energia consumata da un veicolo per compiere un determinato tragitto dipende da numerosi fattori, ma, in prima approssimazione, si possono considerare due aspetti essenziali: il profilo di velocità nel tempo e le caratteristiche del veicolo. Questi due elementi sono inoltre legati l'un l'altro in quanto lo stile di guida viene in parte influenzato dalle prestazioni stesse del veicolo. Pertanto, è stata verificata, attraverso un questionario interno, la consistenza tra un modello di veicolo elettrico di cui si avevano a disposizione dati sperimentali acquisiti durante il normale uso (Nissan Leaf prima serie [8]) e la tipologia di veicoli elettrici potenzialmente acquistabile da parte di privati). Si è poi proceduto all'implementazione di un modello di ricostruzione di cicli guida sulla base di dati GPS sperimentali corrispondenti a prove effettuate su cicli guida misti (condizioni urbane/extra-urbane) con tale veicolo.

Gli approcci generalmente adottati in letteratura per la definizione di cicli guida sono due: il primo basato sulla combinazione di modalità di guida standard (in accelerazione, in decelerazione, a velocità costante, a velocità nulla), e il secondo sulla base di dati reali. È stato scelto il secondo approccio poiché, tenendo in considerazione condizioni operative reali -in termini di traffico, stile di guida e tipologia di strada-, consente una rappresentazione più realistica ed affidabile del comportamento dei veicoli. In particolare, il metodo implementato è basato sulle catene di Markov la cui efficacia è stata ampiamente provata in molti studi in letteratura [9-12]. Tale metodo si compone di tre principali passaggi: codificazione dei dati reali, definizione della matrice di transizione e costruzione del ciclo. In un primo momento i dati GPS a disposizione sono codificati in termini di sequenza di "stati dinamici", secondo cui ogni stato è definito da una coppia di valori velocità-accelerazione. Il numero di stati possibili è quindi definito discretizzando i range di velocità e accelerazione corrispondente ai dati GPS con una risoluzione di 1 km/h e  $0.2\text{m/s}^2$  o 2 km/h e  $0.2\text{m/s}^2$ , a seconda della tipologia di percorso considerato (rispettivamente urbano o extraurbano). I dati reali così codificati sono usati per costruire le matrici di transizione per ciclo guida urbano ed extraurbano, ossia le matrici che esprimono per ogni stato la probabilità di transizione verso lo stato seguente. La costruzione di nuovi cicli è effettuata quindi secondo la proprietà di Markov, secondo cui la transizione a uno stato seguente è dipendente esclusivamente da quello corrente, e non da quelli precedenti. Inizializzato quindi il ciclo guida allo stato di velocità e accelerazione nulla, si può procedere alla definizione randomica degli stati successivi utilizzando l'algoritmo di "Roulette-Wheel", che consente di tenere in considerazione le probabilità di transizione espresse nelle matrici. Tale procedura è eseguita per definire cicli guida sia in condizioni urbane e extraurbane, utilizzando le due differenti matrici di transizione sopra descritte. La costruzione di ciascun ciclo si conclude non appena le corrispondenti distanze percorse per le due tipologie di percorso risultino uguali ai valori registrati dall'utente nel questionario.

La congruenza tra i cicli guida così costruiti e quelli originali è verificata valutando le distribuzioni di probabilità dei set di velocità e accelerazione e calcolandone lo scarto quadratico medio. Le distribuzioni sono rappresentate in figura 2.



**Figura 2. Distribuzioni di probabilità di velocità e accelerazione per cicli guida originali (a) e generati (b) in strada urbana e cicli guida originali (c) e generati (d) in strada extraurbana.**

Dalla figura emerge immediatamente la somiglianza tra le distribuzioni dei cicli originali e quelle generate per le due tipologie di percorso. Lo scarto quadratico medio inferiore all'1% rappresenta inoltre una conferma dal punto di vista quantitativo.

### 2.2.2 Metodo per la stima della domanda energetica di un veicolo elettrico in condizioni di guida reali

In letteratura sono disponibili numerosi studi focalizzati sulla modellazione del consumo dei veicoli elettrici sulla base delle condizioni operative, e, secondo lo studio riportato in [13], tre sono gli approcci principalmente adottati: modellazione tramite espressioni analitiche, tecniche di regressione statistica o reti neurali. Il primo metodo è stato escluso in quanto, nonostante fornisca una stima accurata dei consumi, pecca in applicabilità qualora non siano note le specifiche dei componenti (ad esempio i valori delle resistenze interne delle batterie, curva dello stato di carica della batteria in funzione della tensione a circuito aperto, mappe di efficienza del motore, etc). Le reti neurali, al contrario dei modelli analitici, presentano elevata accuratezza con un numero relativamente ridotto di parametri di input. Di contro, l'accuratezza dei risultati dipende strettamente dall'architettura della rete. Sulla base delle considerazioni tratte, si è optato per un modello di regressione statistica che, oltre a rappresentare un buon compromesso tra complessità computazionale e rispondenza al comportamento fisico, permette di prendere in considerazione anche l'influenza di fattori esterni altrimenti non facilmente modellabili. Infatti, ogni modello di regressione statistica viene calibrato utilizzando dati reali, in cui le variabilità sono implicitamente presenti.

Per il presente RT si è adottato un modello di Multi Regressione Lineare (MLR) basato sullo studio proposto in [14], in cui le variabili che principalmente determinano il consumo energetico di un veicolo sono legate da funzioni lineari tramite coefficienti. Per definire le variabili più significative, si è partiti dall'espressione dell'energia meccanica richiesta da parte del veicolo per coprire una determinata distanza:

$$dE = \frac{1}{3600} \left[ mg(f \cos\vartheta + \sin\vartheta) + \frac{1}{2} \left( \rho C_x A \frac{(v_{EV} + v_w)^2}{3.6} \right) + (m + m_f) \frac{dv_{EV}}{dt} \right] ds \quad (1)$$

dove:

- $dE$  = energia meccanica [kWh]
- $m$  = massa del veicolo [kg]
- $g$  = accelerazione gravitazionale [ $m/s^2$ ]
- $f$  = coefficiente di attrito volvente [-]
- $\vartheta$  = angolo di inclinazione della strada [ $^\circ$ ]
- $\rho$  = densità dell'aria [ $kg/m^3$ ]
- $C_x$  = coefficiente di attrito aerodinamico [-]
- $A$  = sezione equivalente del veicolo [ $m^2$ ]
- $v_{EV}$  = velocità del veicolo [ $m/s$ ]
- $v_w$  = velocità del vento [ $m/s$ ]
- $m_f$  = massa d'inerzia del veicolo [kg]
- $ds$  = distanza [m]

Se si assume in prima approssimazione che i coefficienti di attrito volvente e di attrito dinamico, la densità dell'aria e il veicolo della massa siano costanti, e si trascura il contributo della velocità del vento, la richiesta energetica risulta linearmente legata ai parametri cinematici  $ds$ ,  $v^2 ds$ ,  $\frac{dv}{dt} ds$ , e  $ds \cdot \sin\vartheta$  dove  $\vartheta$  rappresenta la pendenza della strada. L'influenza della variazione di energia potenziale è stata trascurata in questo contesto dato il contributo minimo nella zona considerata.

L'assorbimento dell'impianto di condizionamento è stato considerato con un termine linearmente dipendente dalla durata del tragitto, aggiunto all'espressione dell'energia meccanica. Pertanto, l'equivalente espressione lineare dell'equazione 1 risulta la seguente:

$$dE_{EV} = B_1 s + B_2 v_{EV}^2 s + B_3 a s + B_4 h + B_5 A u x_t t \quad (2)$$

dove i valori dei coefficienti  $B_1, B_2, B_3, B_4$  e  $B_5$  sono valutati attraverso un calcolo di regressione utilizzando i dati raccolti nella campagna sperimentale. Tuttavia, affinché il modello risulti sufficientemente accurato, l'analisi di MLR non deve essere condotta su cicli di guida interi, ma suddividendo i cicli reali in sotto-segmenti al fine di considerare adeguatamente la variabilità statistica dei dati. Ogni segmento è stato pertanto definito come la sequenza di dati tra due fermate consecutive. L'energia richiesta per un intero tragitto è stata poi valutata come somma delle energie dei singoli segmenti che lo compongono, calcolate secondo l'equazione (3):

$$E_k = B_1 \Delta s_k + B_2 (\sum_i^n v_{EV,i}^2) \Delta s_k + B_3 (CMF_k^p) \Delta s_k + B_4 (CMF_k^n) \Delta s_k + B_5 \Delta t_k + \varepsilon \quad (3)$$

$$CMF_k = \frac{\sum_{i=2}^n |v_{EV,i}^2 - v_{EV,i-1}^2|}{\Delta s_k} \quad (4)$$

dove:

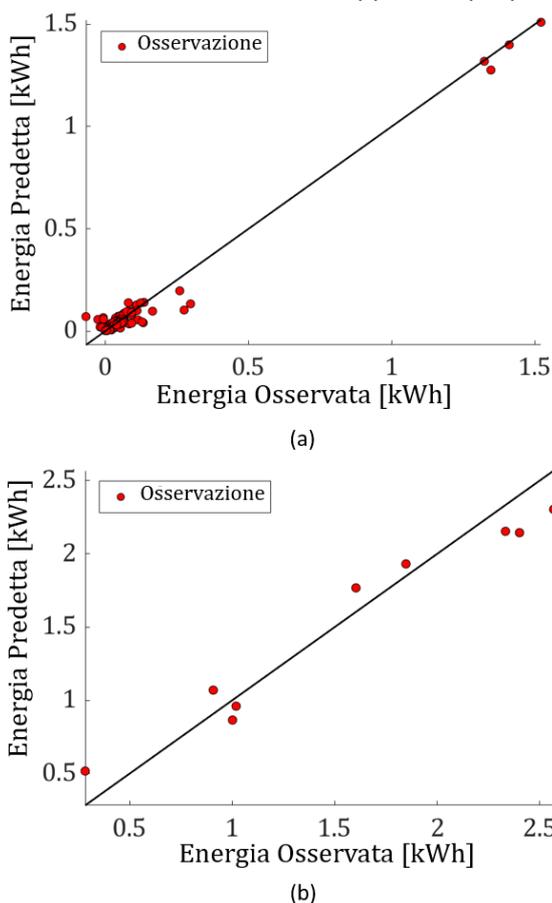
- $k$  = numero del segmento
- $\Delta s_k$  = distanza del segmento di strada [m]
- $CMF_k^p$  = somma positiva delle variazioni di energie cinetiche per unità di distanza
- $CMF_k^n$  = somma negativa delle variazioni di energie cinetiche per unità di distanza
- $\Delta t_k$  = durata della percorrenza del segmento [s]
- $\varepsilon$  = errore

I valori dei coefficienti  $B_1, B_2, B_3, B_4$  e  $B_5$  (riportati in tabella 3) sono stati ottenuti con la funzione fitlm in Matlab, utilizzando le misure acquisite tramite CAN bus a bordo della Nissan LEAF [15].

**Tabella 3. Coefficienti del modello di Multi Regressione Lineare**

	Intercetta	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>
<b>Coefficiente</b>	0.00332516	0.169241356	-6.37E-06	0.029709581	0.000242606	-0.0001648
<b>p-value</b>	<0.2	< 0.0001	< 0.05	< 0.0001	< 0.0002	< 0.2

La figura 3 mostra i grafici di regressione per la previsione dell’energia consumata in un singolo segmento (in alto) e in un intero tragitto (in basso). I punti corrispondenti alle valutazioni effettuate per i singoli segmenti principalmente giacciono lungo la bisettrice che indica il target di previsione perfetta. Meno accurate risultano le osservazioni dell’energia prevista per gli interi tragitti poiché gli errori nei valori dei segmenti che lo compongono non si sono simmetricamente distribuiti rispetto alla bisettrice. La validità di questo metodo è stata inoltre valutata attraverso indici di performance riportati in tabella 4. Il valore di correlazione ed R<sup>2</sup> superiori al 98% confermano l’affidabilità e l’accuratezza dell’approccio proposto.



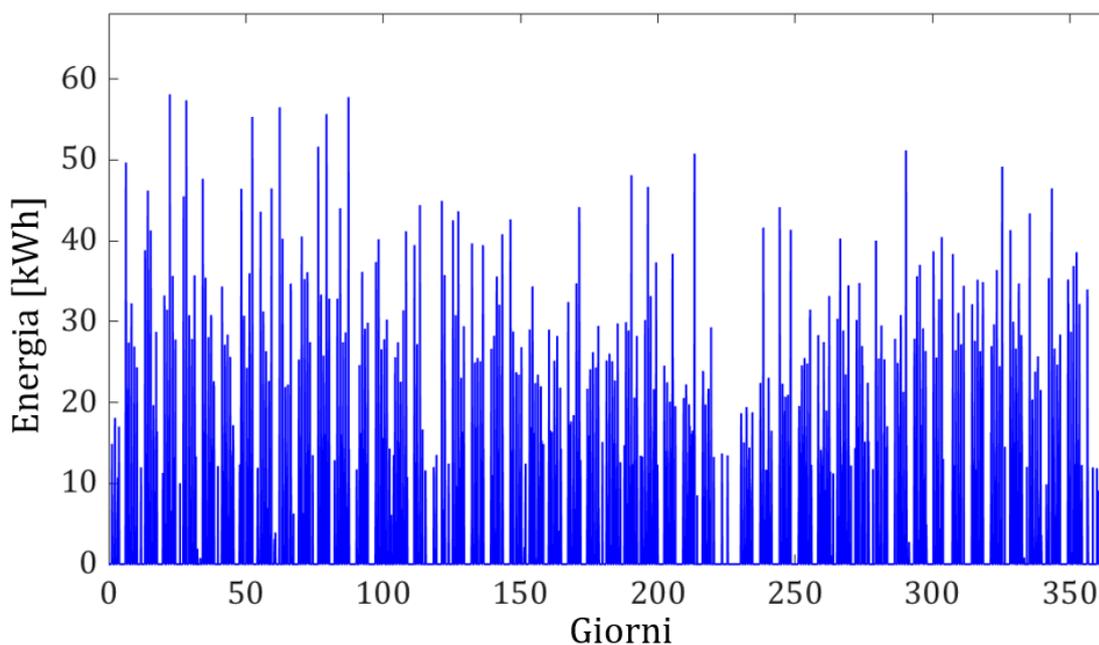
**Figura 3. Grafico di regressione per la previsione dell’energia di un segmento (a) e per l’intero tragitto (b)**

**Tabella 4. Indici di performance per il modello di Multi Regressione Lineare**

	Correlazione	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
<b>Segmento</b>	0.9917	0.0252	0.0108	0.9846
<b>Tragitto</b>	0.9800	0.1841	0.1711	0.9886

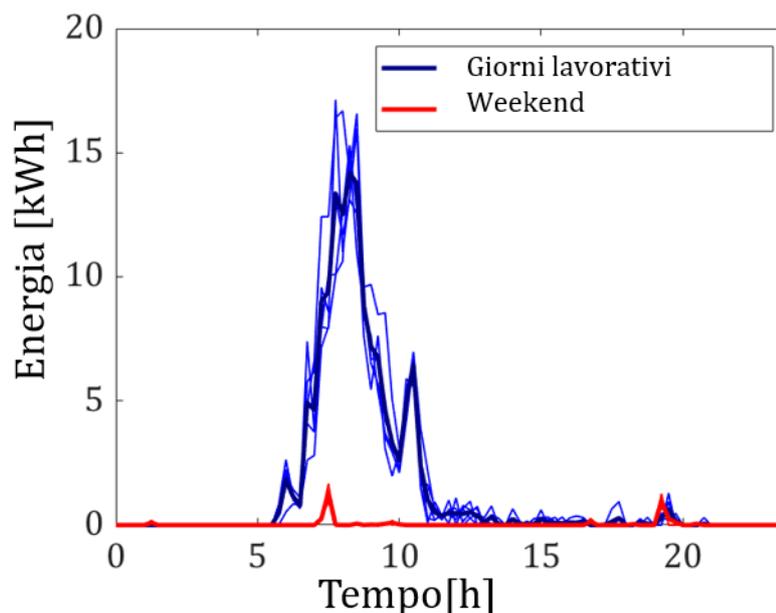
**2.2.3 Definizione del profilo di energia giornaliero richiesto**

Una volta definita la richiesta energetica giornaliera per ciascun utente, si è calcolato il profilo annuale per l’intera stagione di ricarica secondo l’orario di arrivo dichiarato dagli utenti nel questionario. Il profilo annuale di energia, così ricavato, è mostrato in figura 4.



**Figura 4. Profilo annuale di energia di ricarica richiesta alla stazione**

In particolare, tra i profili giornalieri di energia erogata, sono stati individuati principalmente due pattern: uno per i giorni lavorativi (dal lunedì al venerdì) e un altro per il fine settimana (sabato e domenica). I due andamenti giornalieri di riferimento sono mostrati in figura 5.



**Figura 5. Profilo medio di energia richiesta per i giorni lavorativi (in blu) e fine settimana (in rosso)**

La richiesta energetica non nulla nelle ore notturne e nei week-end è dovuta alla presenza dei custodi presso il centro di ricerca.

### 3 Dimensionamento del sistema di accumulo stazionario con batterie second life per l'offerta di servizi ancillari alla rete elettrica

Il corretto dimensionamento di un sistema di accumulo richiede la conoscenza sia dell'energia che della potenza. Tali grandezze risultano note solamente dopo aver definito una strategia di controllo per la ricarica dei veicoli in quanto intrinsecamente influenzate da questa. Pertanto, in primo luogo, si è definito il layout della stazione di ricarica ed una strategia di controllo per la gestione della stessa.

### 3.1 Design e strategia di controllo della stazione di ricarica

Al fine di determinare il design ottimale della stazione di ricarica, sono state prese in considerazione tre possibili configurazioni:

- 1) tutte le colonnine operanti con sola ricarica lenta a 7.4kW
- 2) tutte le colonnine operanti con sola ricarica rapida a 22kW
- 3) colonnini operanti sia a ricarica lenta a 7.4kW che rapida a 22kW

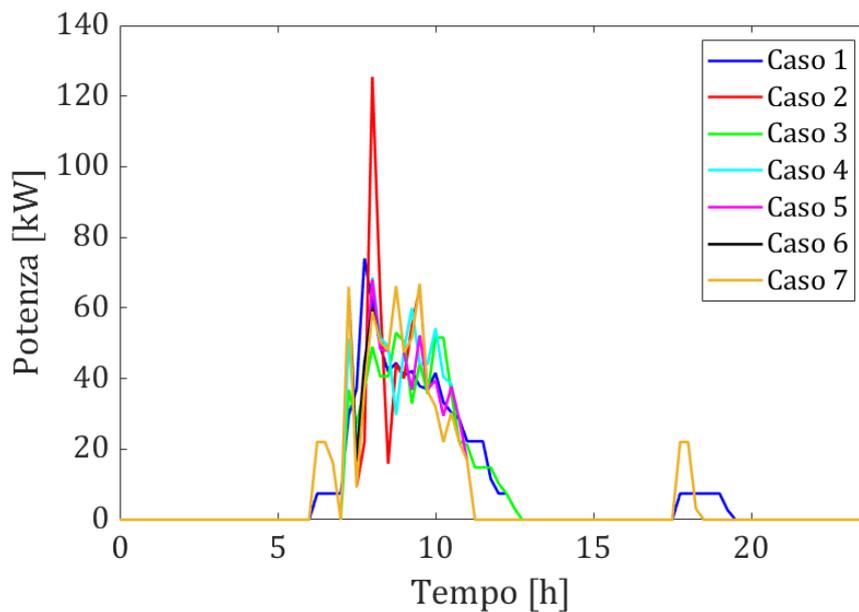
La strategia di ricarica è stata scelta, invece, con lo scopo di rappresentare una situazione realistica: ogni veicolo in arrivo alla stazione si mette in carica qualora siano disponibili colonnine, altrimenti si mette in coda secondo il suo orario di arrivo. Per poter definire il numero di colonnine necessario da installare in ciascuna delle tre configurazioni è stato effettuato un processo iterativo in cui, ad ogni iterazione, è stato aumentato il numero di colonnine installato fino al raggiungimento della saturazione delle performance ottenute in termini di numero minimo di veicoli, in un anno, costretti a lasciare la stazione senza aver completato la carica. La tabella 5 mostra i risultati del processo iterativo, riportando il numero di plug-in necessari per ogni configurazione e due indici di performance: il numero di veicoli con carica incompleta in un anno e il valore medio dell'energia richiesta non soddisfatta.

**Tabella 5. Numero di plug-in necessari e indici di performance per ciascuna configurazione e**

Caso	Numero di plug-in (7.4kW)	Numero di plug-in (22kW)	Numero di veicoli con carica incompleta	Energia non caricata [kWh]
1	14	-	33	5.05
2	-	6	11	4.56
3	6	1	21	4.90
4	6	2	18	4.22
5	6	3	14	4.25
6	6	4	13	4.41
7	6	5	12	4.35

Risulta evidente dai valori riportati in tabella come la migliore configurazione dal punto di vista dell'utente sia quella che garantisce il minor numero di veicoli con carica incompleta, ossia quella con sole colonnine con ricarica rapida a 22kW, mentre risulta da evitare quella con sole colonnine da 7.4kW. Ottimi risultati sono stati ottenuti anche con una configurazione mista per cui si può osservare una tendenza di saturazione degli indici di performance. Il motivo per cui i processi di carica risultano incompleti è da ricondurre anche al tempo di permanenza esiguo di alcuni veicoli parcheggiati presso la stazione. Sarà pertanto, nelle attività future, possibile ottimizzare le strategie di controllo tenendo conto di questi aspetti.

Dal punto di vista del distributore di energia elettrica, invece, i criteri selezionati per la valutazione dei benefici sono i seguenti: regolarità del profilo di potenza, numero di oscillazioni della potenza richiesta ed entità del picco di domanda. Come è possibile osservare dalla figura 6, in cui sono riportati per ogni caso sopra descritto i profili di potenza per un giorno lavorativo, all'aumentare del numero di colonnine in condizioni di ricarica veloce la qualità del profilo di potenza peggiora.

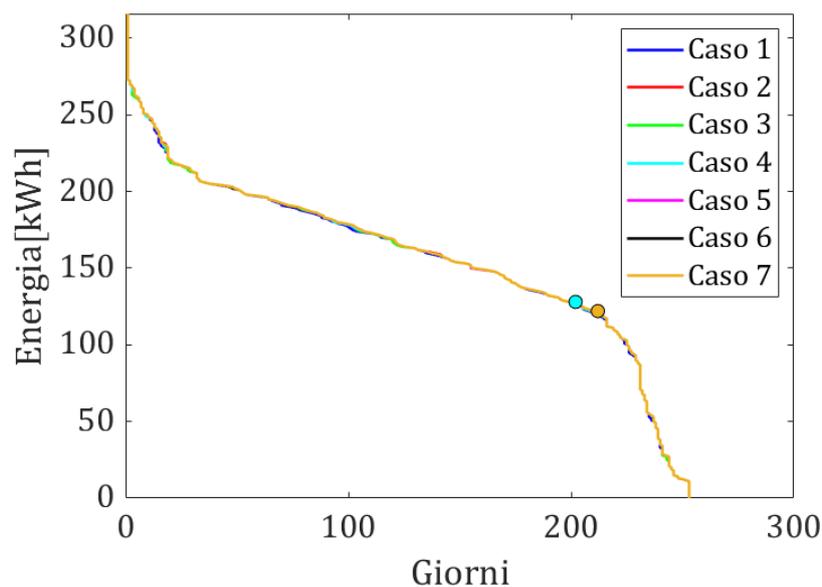


**Figura 6. Profilo giornaliero di potenza richiesto alla stazione di ricarica**

Alla luce delle considerazioni riportate, non è stato possibile determinare a priori quale configurazione fosse la migliore tra quelle analizzate. Pertanto, è stata dimensionata una batteria per ciascuna di queste secondo quanto descritto nel successivo sottoparagrafo.

### 3.2 Design e strategia di controllo per il sistema di accumulo stazionario

Per ogni configurazione della stazione di ricarica è stata definita la capacità del sistema di accumulo come il valore di energia tale da massimizzare l'area sottesa dalla curva di durata dell'energia giornaliera richiesta (Figura 7). Il numero di moduli corrispondente è stato poi ricavato arrotondando per eccesso il rapporto tra il valore di energia trovato e la capacità del singolo modulo di batteria (897 Wh). In tabella 6 sono riportate le specifiche tecniche in termini di numero di moduli, capacità complessiva e potenza massima di scarica del sistema di accumulo per ogni caso analizzato.



**Figura 7. Curva di durata dell'energia giornalmente fornita dalla stazione di ricarica**

**Tabella 6. Specifiche tecniche del pacco batterie per ciascun caso**

Caso	Numero di moduli	Capacità pacco batterie [kWh]	Potenza di scarica massima [kW]
1	225	201.7	97.2
2	237	212.4	102.4
3	225	201.7	97.2
4	225	201.7	97.2
5	237	212.4	102.4
6	237	212.4	102.4
7	237	212.4	102.4

Come evidenziato in Figura 7, la scelta di questo criterio di dimensionamento comporta una sovrapposizione tra i punti che massimizzano le aree sottese alle curve di durata. Le differenze tra i casi 1,3,4 e 2,5,6,7 sono dovute all’effettivo aumento dell’energia annua di carica erogata a causa dell’aumento del numero di colonnine che consentono la ricarica rapida. Si può inoltre sottolineare come il valore di potenza massimo vari per le configurazioni con valore di picco di potenza più elevato, per le quali il sistema di accumulo sarà sottoposto a cicli di scarica più profondi e impattanti sul degrado.

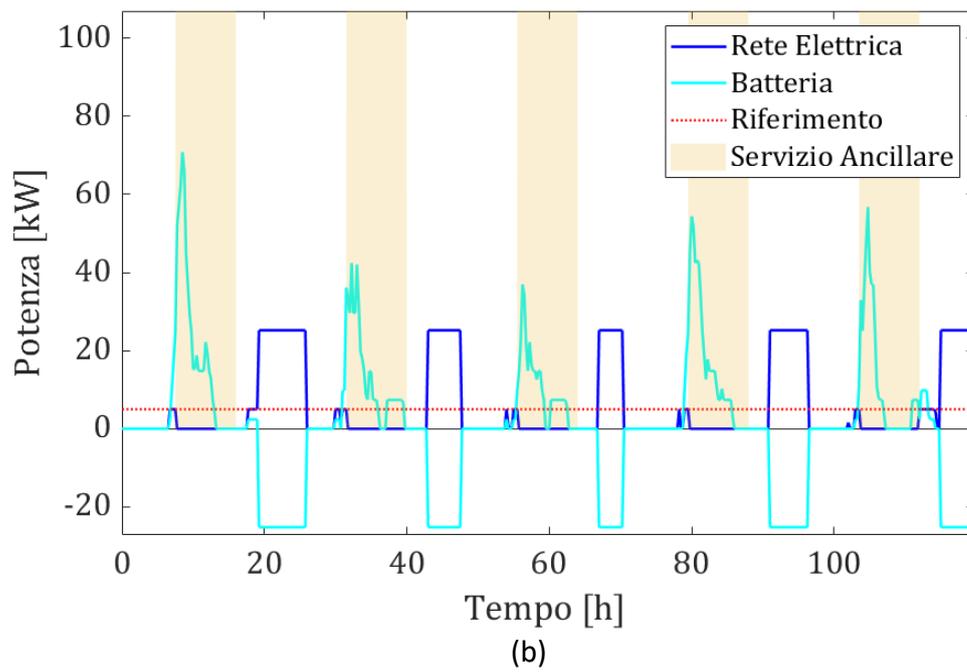
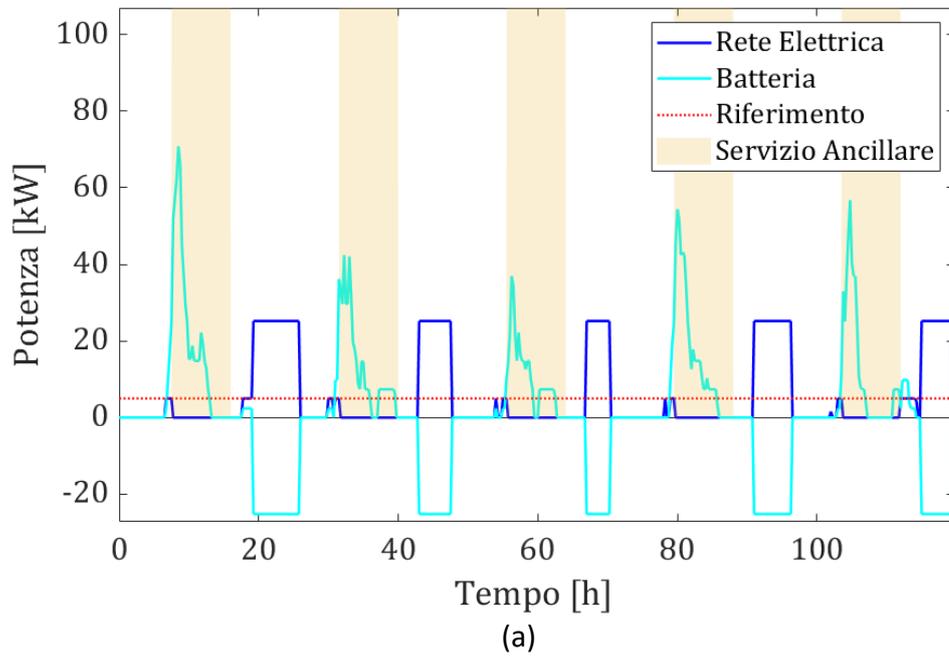
Come precedentemente riportato, il sistema di accumulo stazionario in esame è stato accoppiato alla stazione di ricarica con l’obiettivo di offrire un servizio ancillare alla rete. In particolare, la batteria è stata gestita in modo da coprire l’intero carico nelle ore centrali della giornata (dalle 8 alle 16), nei limiti della massima potenza di scarica e capacità disponibile, e, nelle restanti ore nella fascia di consumo più elevato (dalle 7 alle 8 e dalle 16 alle 19), così da mantenere la potenza di assorbimento dalla rete elettrica al di sotto di un valore di riferimento pari a:

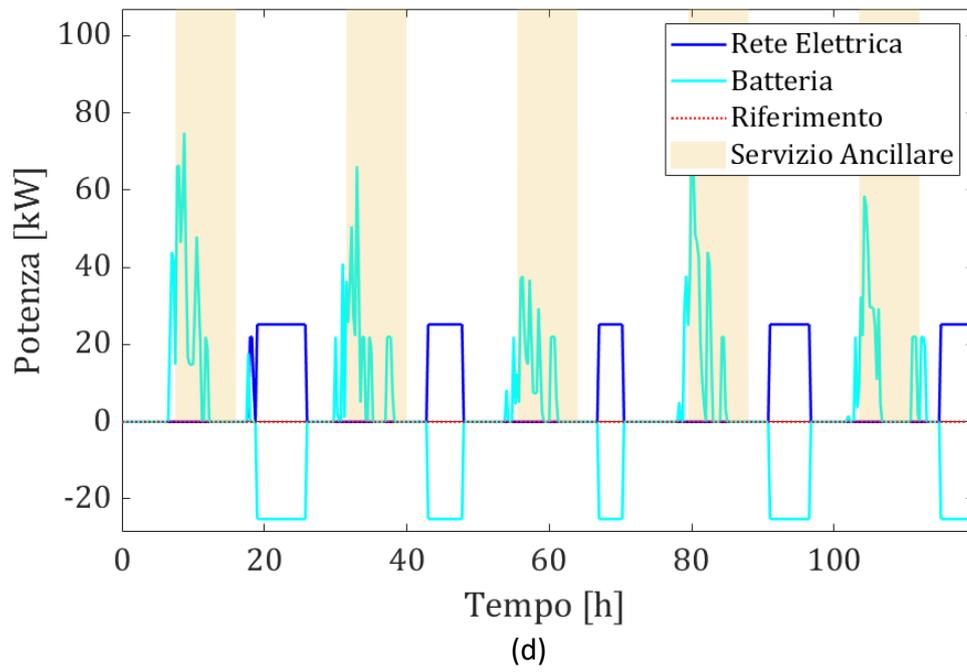
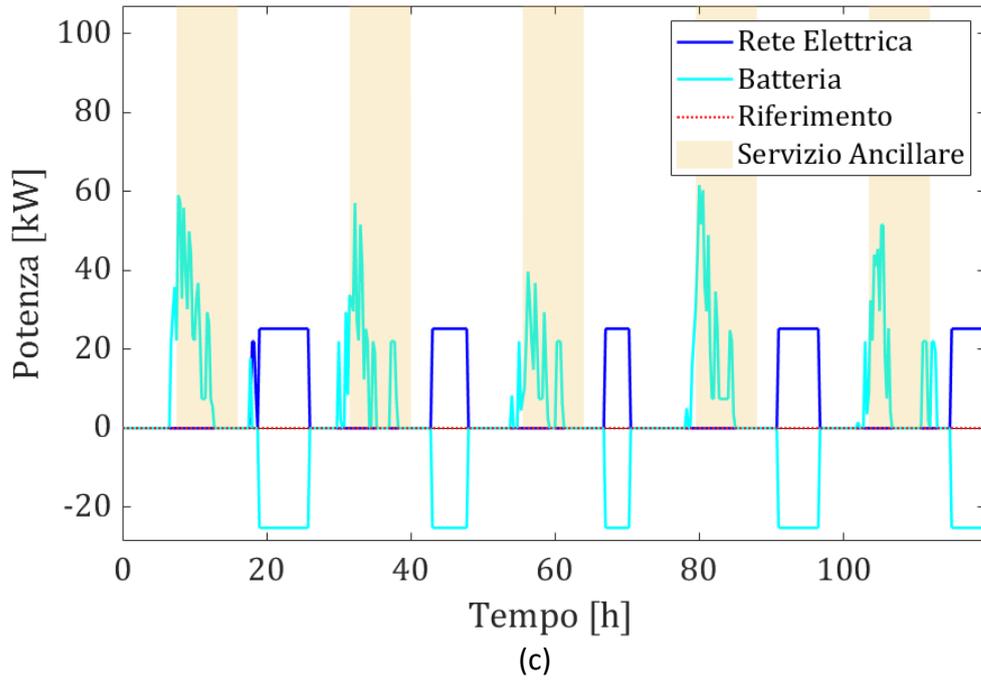
$$P_{rif} = P_{max}^{rete} - P_{max}^{batteria} \tag{5}$$

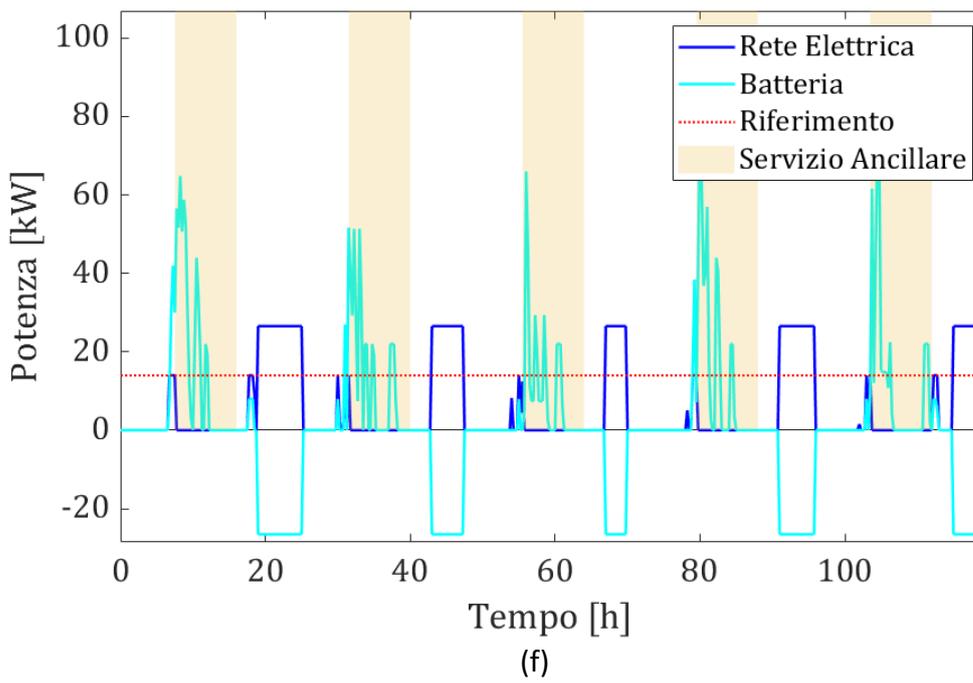
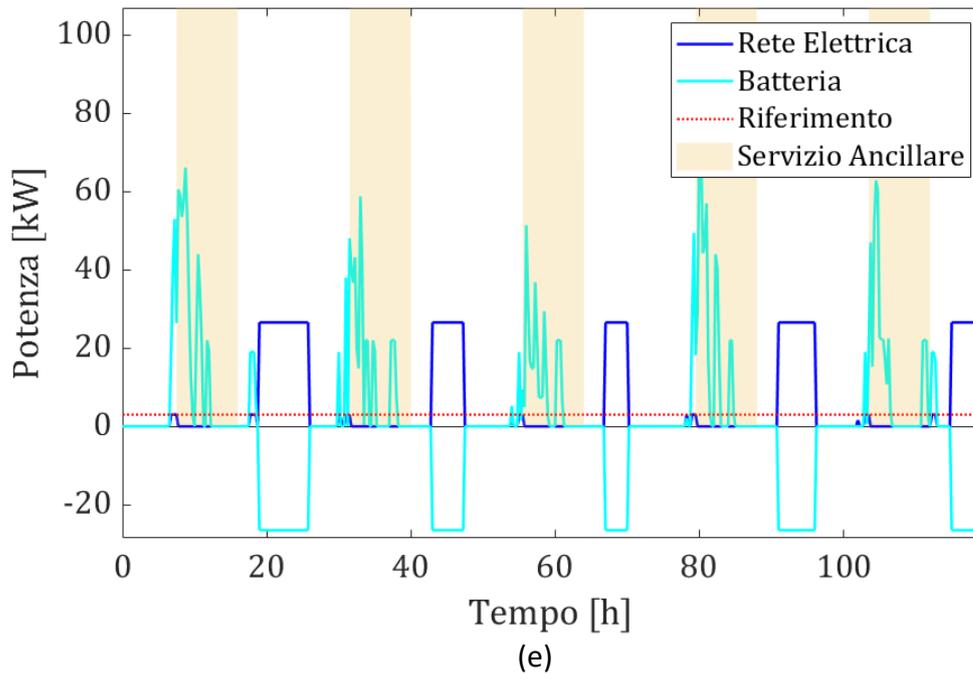
dove  $P_{max}^{rete}$  è il massimo valore di potenza di assorbimento dalla rete senza sistema di accumulo, e  $P_{max}^{batteria}$  è la massima potenza di scarica della batteria (come riportato in tabella 6). Inoltre, la sua carica è stata imposta al di fuori della fascia di picco ( dalle 19 alle 7) ad una potenza costante uguale a:

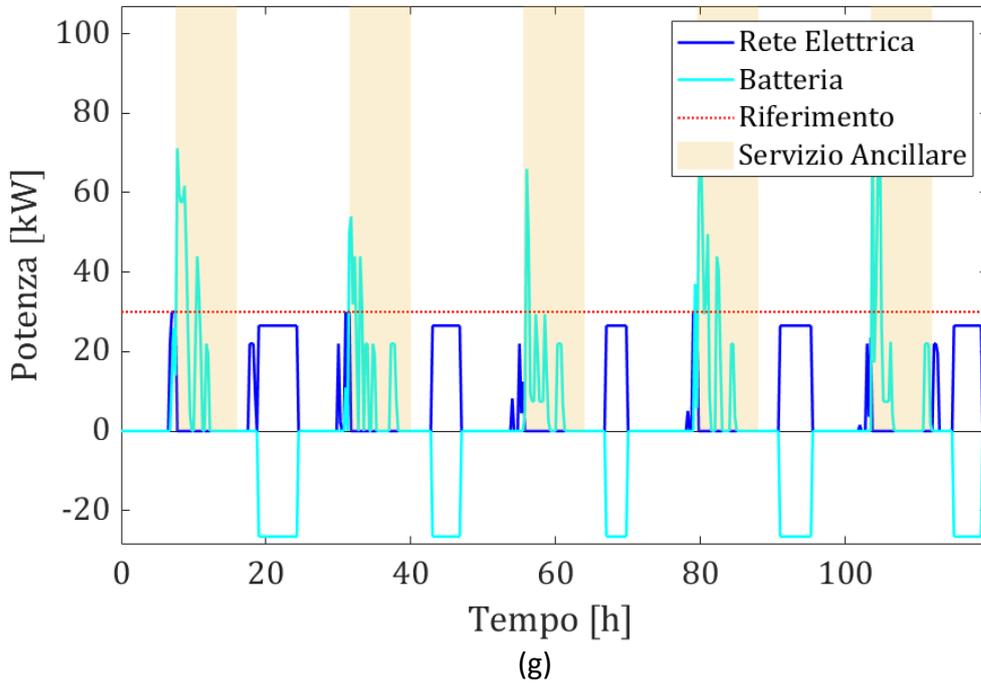
$$P_{carica}^{batteria} = \frac{C^{batteria}}{t} \tag{5}$$

dove  $C^{batteria}$  è la capacità del sistema di accumulo e t è un tempo arbitrariamente scelto pari a 6 ore. Nelle figura 8 sono mostrati dei profili settimanali di potenza assorbita dalla rete e potenza di carica e scarica della batteria per ciascuna dei casi studio sopra presentati.



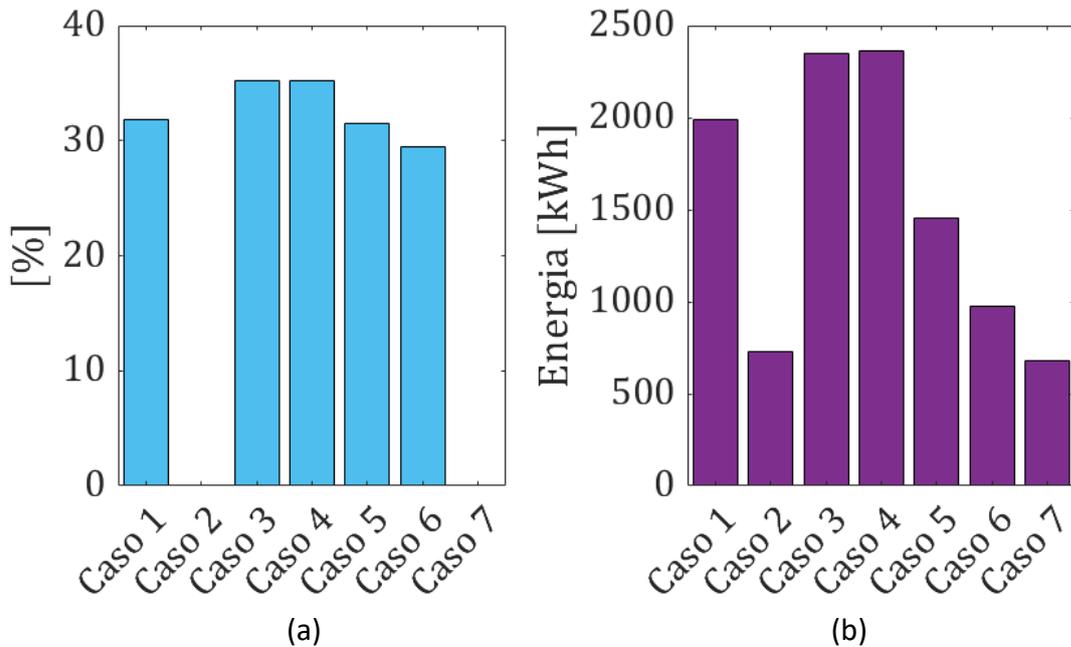






**Figura 8. Profili settimanali di potenza assorbita dalla rete elettrica e potenza di carica e scarica del sistema di accumulo per Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c), Caso 4 (d), Caso 5 (e), Caso 6 (f), Caso 7 (g)**

Si può notare come per la settimana mostrata in figura 8, in tutti i casi analizzati, la batteria risulti in grado di annullare la potenza richiesta alla rete e di mantenere il suo valore al di sotto della potenza di riferimento durante le ore prestabilite. Tuttavia, evidenti differenze tra i casi studiati emergono da un’analisi annuale dei profili di rete. In particolare, è stata valutata la frazione del tempo in cui la stazione di ricarica assorbe dalla rete elettrica una potenza superiore alla  $P_{rif}$ , e l’energia annua assorbita nella fascia di orario in cui si potrebbe garantire il servizio ancillare proposto. I risultati ottenuti sono mostrati in figura 9.



**Figura 9. Percentuale di tempo in cui la stazione di ricarica preleva dalla rete ad una potenza superiore alla  $P_{rif}$  durante le ore giornaliere (a) e valore di energia annualmente assorbita dalla rete nell’orario di servizio ancillare (b)**

Gli andamenti dei valori mostrati in figura 8a e 8b sono molto simili: i casi 2 e 7 mostrano le migliori prestazioni con il raggiungimento della minor richiesta di energia durante le ore di servizio ancillare e l'annullamento della frazione di tempo in cui la potenza è superiore al valore di riferimento; con i casi 3 e 4, invece, si ottengono i risultati peggiori. Detto comportamento dipende dalla capacità della batteria, e in particolare dal valore della potenza di riferimento. Infatti, per il caso 3 e il caso 4 per i quali la batteria è più piccola ma  $P_{rif}$  è pari a 0 la richiesta di energia al sistema di accumulo è molto più elevata rispetto ai casi 2 e 7 in cui la batteria copre solamente una percentuale del carico della stazione di ricarica a fronte di una capacità superiore. I casi 5 e 6 mostrano dei valori intermedi, ma il caso 6 si comporta meglio poiché, a parità di capacità, presenta una  $P_{rif}$  più elevata e dunque viene richiesta meno energia alla batteria al di fuori delle ore di servizio ancillare. Il caso 1, infine, presenta le seconde peggiori prestazioni a causa di un valore per la  $P_{rif}$  relativamente basso rispetto alla capacità del sistema di accumulo.

Si sono inoltre analizzati due ulteriori indici per confrontare la qualità del profilo di potenza tra le diverse configurazioni: la deviazione standard e il valore massimo della potenza richiesta alla rete (figura 10).

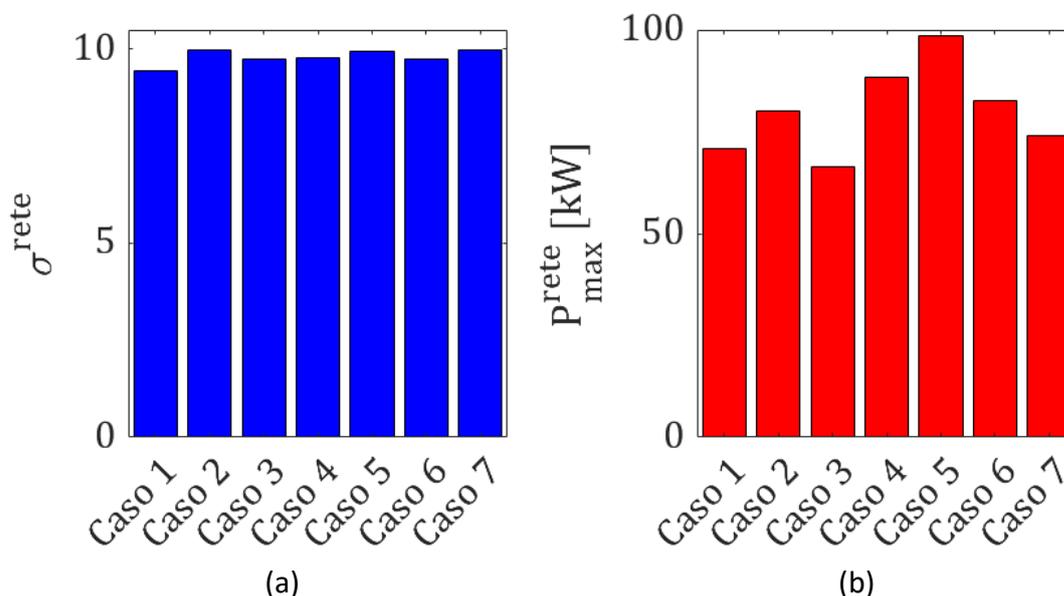


Figura 10. Valori di deviazione standard (a) e massimo (b) del profilo di potenza richiesto alla rete

Nonostante non vi siano delle differenze significative tra le deviazioni standard dei casi studiati, si può notare come i valori di potenza massima richiesta tendano ad essere molto diversi. Anche in questo caso, i motivi di tali differenze dipendono dal rapporto tra capacità della batteria e  $P_{rif}$ , poiché più bassa è la potenza di riferimento, più velocemente la batteria tenderà a scaricarsi obbligando la stazione di ricarica a richiedere energia alla rete durante l'ora di picco della domanda. Differentemente dalle considerazioni tratte per l'energia, il caso 3 risulta il migliore in quanto è caratterizzato dal valore di potenza massima richiesta dalla stazione di ricarica più basso. Il caso 1 risulta immediatamente seguente, dato che il valore della  $P_{rif}$  garantisce che la batteria copra il picco di domanda. I casi 2, 6 e 7 risultano le configurazioni migliori sia dal punto di vista dell'utente che della rete.

## 4 Conclusioni

Nel presente Rapporto Tecnico è stata illustrata l'attività di ricerca atta a definire un primo dimensionamento di un sistema di accumulo stazionario basato su batterie second-life per una stazione di ricarica di veicoli elettrici da implementare presso il centro di ricerca ENEA Casaccia.

L'installazione del sistema di accumulo ha lo scopo di fornire flessibilità alla stazione di ricarica, in modo da poter offrire un servizio ancillare alla rete elettrica. In particolare, si è studiata la possibilità di annullare la richiesta energetica alla rete durante le ore di picco della domanda e di mantenere il profilo di assorbimento nelle restanti ore del giorno al di sotto di un valore di riferimento.

Al fine del dimensionamento del sistema di accumulo è stato definito un profilo di domanda della stazione di ricarica. Tale profilo è stato ottenuto seguendo due principali passaggi: il calcolo della richiesta energetica

dei veicoli elettrici e la definizione di una configurazione della stazione, (in termine di numero e tipologia di colonnine da installare), con una strategia di controllo per la gestione della ricarica dei diversi veicoli. Per valutare la domanda energetica è stato dapprima implementato un metodo di ricostruzione di cicli guida di riferimento in condizioni reali; inoltre, detti cicli sono stati considerati in un modello di Multi Regressione Lineare per il calcolo del consumo energetico dei veicoli. Infine, sono state studiate sette diverse possibili configurazioni per la stazione di ricarica e, per ciascuna di esse, è stata individuato un valore per la potenza di riferimento della rete.

I principali risultati ottenuti consentono di trarre le seguenti conclusioni:

- la scelta della configurazione migliore è influenzata sia dal livello di soddisfazione degli utenti che questa è in grado di garantire, sia dalle caratteristiche del profilo di potenza dal punto di vista della rete elettrica;
- la qualità del servizio ancillare offerto alla rete dipende dal numero e dalla tipologia di colonnine di ricarica installate;
- la scelta ottimale in termini di capacità del sistema di accumulo stazionario è determinata non solo dalla richiesta energetica dei veicoli elettrici, ma anche dalla tipologia del servizio ancillare che si vuole offrire in relazione alla configurazione della stazione di ricarica;
- sono stati rilevati margini di miglioramento in termini di benefici derivanti dall'installazione del sistema di accumulo che permettono di presagire come l'utilizzo di un sistema di controllo intelligente della stazione di ricarica possa ulteriormente migliorare il comportamento evitando profondità di scarica elevate della batteria e limitando i picchi di assorbimento;
- a fronte di un costo di investimento e livello di soddisfazione degli utenti simile, le configurazioni con sole colonnine a ricarica veloce (caso 2) e sia veloce che lenta (caso 6) mostrano le migliori prestazioni in termini di potenzialità di offerta di servizi ancillari.

## Riferimenti bibliografici

1. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030 /\* COM/2014/015 final \*/
2. Documento di posizionamento sulla transizione verso l'economia circolare nel settore Mobilità Elettrica del Gruppo di Lavoro 4 (GdL 4) "Sistemi di progettazione, produzione, distribuzione e consumo sostenibili e circolari" della Piattaforma Italian Circular Economy Stakeholder Platform (ICESP)
3. Energy & Strategy Group, Electricity Market Report, 2020
4. Philipp Andreas Gunkel, Claire Bergaentzlé, Ida Græsted Jensen, Fabian Scheller, From passive to active: Flexibility from electric vehicles in the context of transmission system development, Applied Energy, Volume 277, 2020, 115526, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115526>
5. Tirupati Uttamrao Solanke, Vigna K. Ramachandaramurthy, Jia Ying Yong, Jagadeesh Pasupuleti, Padmanathan Kasinathan, Arul Rajagopalan, A review of strategic charging–discharging control of grid-connected electric vehicles, Journal of Energy Storage, Volume 28, 2020, 101193, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101193>.
6. eMobility Prodotti e sistemi per la ricarica dei veicoli elettrici. Disponibile al link: <https://www.veglia.com/wp-content/uploads/E-mobility-ABB-privato.pdf>
7. <https://rechargebatteries.org/battery-market-and-technologies/>

8. [http://www.soleinrete.org/files/page/veicoli\\_elettrici/103839.par.9198.file.pdf](http://www.soleinrete.org/files/page/veicoli_elettrici/103839.par.9198.file.pdf)
9. Yang Y, Zhang Q, Wang Z, Chen Z, Cai X. Markov chain-based approach of the driving cycle development for electric vehicle application. *Energy Procedia* 2018;152:502–7.
10. Gong H, Zou Y, Yang Q, Fan J, Sun F, Goehlich D. Generation of a driving cycle for battery electric vehicles : A case study of Beijing. *Energy* 2018;150:901–12.
11. Zhao X, Zhao X, Yu Q, Ye Y, Yu M. Development of a representative urban driving cycle construction methodology for electric vehicles: A case study in Xi'an. *Transp Res Part D Transp Environ* 2020;81:102279.
12. Gong Q, Midlam-Mohler S, Marano V, Rizzoni G. An Iterative Markov Chain Approach for Generating Vehicle Driving Cycles. *SAE Int J Engines* 2011;4:1035–45
13. Modi, S., Bhattacharya, J., & Basak, P., Estimation of energy consumption of electric vehicles using Deep Convolutional Neural Network to reduce driver's range anxiety. *ISA Transactions* 2020; 98: 454–470.
14. De Cauwer, C., Verbeke, W., Coosemans, T., Faid, S., & Van Mierlo, J. A data-driven method for energy consumption prediction and energy-efficient routing of electric vehicles in real-world conditions. *Energies* 2017, 10(5)
15. Zuccari, F., Orecchini, F., Santiangeli, A., Suppa, T., Ortenzi, F., Genovese, A., Pede, G. Well to wheel analysis and comparison between conventional, hybrid and electric powertrain in real conditions of use. 74th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI 2019.

## Abbreviazioni ed acronimi

BEV = Battery Electric Vehicle

G2V = Grid to Vehicle

PHEV = Plug-in Hybrid Electric Vehicle

V2G = Vehicle to grid