



Ricerca di Sistema elettrico

Studio degli aspetti energetici ed economici di un sistema di stazioni di ricarica rapida

R. Ragona, A. Genovese, S. Orchi, N. Andrenacci

STUDIO DEGLI ASPETTI ENERGETICI ED ECONOMICI DI UN SISTEMA DI STAZIONI DI RICARICA RAPIDA

R. Ragona, A. Genovese, S. Orchi, N. Andrenacci (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

Progetto: D.7 "Mobilità elettrica sostenibile"

Obiettivo: Scenari mobilità elettrica, sub-obiettivo a.2 Localizzazione ottima stazione di ricarica

Responsabile del Progetto: ing. Antonino Genovese, ENEA

Sommario

In questo documento verranno presentati i risultati di uno studio, inquadrato nell'accordo di Programma per la Ricerca di Sistema Elettrico (RdSE), che si propone di completare lo sviluppo, già avviato con la precedente attività [1], di nuovi strumenti per la gestione dei processi decisionali relativi alla pianificazione delle infrastrutture di ricarica rapida. Nello specifico, in questo studio si è voluta estendere l'analisi, sviluppata precedentemente, che partiva dalla domanda per formulare la definizione delle infrastrutture di ricarica per auto elettriche da localizzare in una *zona urbana specifica*, includendo le considerazioni del lato offerta, sempre basandosi sull'analisi di una grande mole di dati reali.

Il primo set di dati reali si riferisce alle rilevazioni di dati geolocalizzati di una percentuale del traffico veicolare privato nella zona interna al Grande Raccordo Anulare di Roma. Partendo da questo database, si definisce un campione di utenti potenziali della mobilità elettrica, ipotizzando un passaggio parziale o totale di questi utenti di auto tradizionali alla mobilità elettrica.

Il secondo set di dati fa parte di una vasta campagna di misure sui consumi reali di un'auto elettrica su strada. Da questi dati è stato possibile estrarre i profili di ricarica a diversi livelli di carica della batteria dell'auto. Questi dati sono stati utilizzati per calcolare la richiesta energetica istantanea per un dato scenario di stazioni di ricarica, partendo dai profili di affollamento istantanei di ciascuna stazione che erano stati determinati nella precedente annualità [1].

È stata inoltre valutata la convenienza economica di una stazione di ricarica dotata di un sistema di accumulo stazionario rispetto ad una stazione rifornita solo dalla rete elettrica.

Lo strumento sviluppato è utile nella progettazione della struttura di ricarica locale da parte di possibili investitori e gestori.

L'attenzione è stata focalizzata esclusivamente sulla *ricarica veloce*, poiché questa è di importanza fondamentale nel contesto urbano.

Introduzione

La diffusione dei veicoli elettrici, che utilizzano un combustibile pulito, negli agglomerati urbani porta indubbi vantaggi in termini di miglioramento della qualità dell'aria e riduzione dell'inquinamento acustico.

A livello europeo sono state messe in atto molte iniziative, come ad esempio, la European Roadmap "Electrification of Road Transport", nell'ambito del 7 FP; l'istituzione del work programme "Smart, Green and Integrated Transport" all'interno della strategia Horizon 2020; la strategia "Europa 2020" che mira a promuovere i veicoli "verdi" incentivando la ricerca, fissando standard comuni e sviluppando l'infrastruttura necessaria; la strategia "Trasporti 2050", una Roadmap per un settore trasporti competitivo e obiettivi ambiziosi di sostenibilità quali la riduzione del 60% delle emissioni di CO2 nei trasporti e la presenza preponderante di veicoli ecologici nelle città europee.

Uno degli ostacoli alla diffusione su larga scala delle auto puramente elettriche risulta essere la componente "batteria di trazione", che finora aveva presentato delle limitazioni importanti in termini di costi, affidabilità ed autonomia garantita. In effetti, nonostante i progressi fatti sulla tecnologia alla base delle batterie, l'ansia da autonomia rimane uno dei più grandi ostacoli alla diffusione su larga scala dell'auto elettrica.

Per questo, lo sviluppo di una efficiente e sufficientemente estesa infrastruttura di ricarica è riconosciuto come uno degli elementi chiave del successo dell'adozione delle soluzioni elettriche. L'esistenza di tale rete risulta essere di vitale importanza per l'accettazione della mobilità elettrica da parte degli utenti.

In Italia, è stato adottato nel 2013 in Piano nazionale infrastrutturale per la ricarica dei veicoli elettrici alimentati ad energia elettrica. Il Piano ha come oggetto la realizzazione di reti infrastrutturali per la ricarica, con l'obiettivo di garantire lo sviluppo unitario del servizio di ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica nel territorio nazionale, tenendo conto nelle diverse realtà territoriali. Nel marzo 2017, è

stata firmata l'intesa della Conferenza delle Regioni sul decreto del Governo che approva l'accordo di programma con le Regioni e gli Enti locali per la realizzazione di reti di ricarica dei veicoli elettrici. Il provvedimento sull'accordo di programma è finalizzato ad individuare programmi di intervento predisposti dalle Regioni per un valore complessivo pari a 28 milioni di euro.

Alla luce degli investimenti previsti, diventa quindi di fondamentale importanza avere degli strumenti che permettano di pianificare una rete di punti di ricarica che possa efficientemente servire la potenziale richiesta, sia dal punto di vista del cliente, riducendo i tempi di attesa per la ricarica e coprendo il territorio in maniera soddisfacente, che del gestore, evitando di installare colonnine di ricarica che resterebbero poco o nulla utilizzate e che rappresenterebbero quindi uno spreco per gli investitori.

Nel presente studio partiremo dall'analisi lato domanda presentata lo scorso anno [1] per determinare la taglia energetica delle stazioni di ricarica individuate nei differenti scenari analizzati. In questo modo, è possibile stabilire l'assorbimento massimo, minimo e medio di una stazione nonché l'assorbimento istantaneo. Queste informazioni saranno poi utilizzate per un'analisi economica sulla convenienza di installare un sistema di accumulo basato sulle batterie al litio, piuttosto che attingere l'energia solo alla rete elettrica.

Lo studio si basa su dati reali che riguardano il traffico veicolare e l'assorbimento della batteria di un'auto elettrica in ricarica veloce, partendo da differenti livelli di carica iniziale.

I dati riguardanti gli spostamenti compiuti dai veicoli sono stati rilevati via GPS e si riferiscono al database OctoTelematics, di cui si parlerà in dettaglio; essi contengono informazioni quali posizione, velocità, tempo, distanza percorsa e coprono circa il 6% del parco vetture circolante all'epoca del rilevamento, ovvero una quantità ritenuta statisticamente significativa dal punto di vista dell'affidabilità dei risultati.

I dati relativi alla batteria sono ottenuti da una vasta campagna di misure realizzata dall'ENEA sui consumi reali di un'auto elettrica utilizzata su strada. Oltre a verificare i consumi, sono stati registrati i dati anche nella fase di ricarica, sia standard che rapida. Questi ultimi sono stati registrati per vari valori iniziali dello stato di carica. In questo modo, si è potuto ottenere l'andamento dell'assorbimento di potenza da parte della batteria in differenti condizioni iniziali.

L'uso combinato di questi dati permette un'analisi molto dettagliata e puntuale della richiesta energetica di una stazione che ne permette di valutare il costo di gestione e la convenienza economica dell'investimento. Considereremo inoltre la convenienza economica dell'utilizzo di un sistema di accumulo stazionario rispetto alla erogazione in via esclusiva dalla rete elettrica nazionale.

1. La ricarica rapida

Nell'ambito dei possibili approcci al problema della ricarica di veicoli elettrici, il modello di "stazione di rifornimento elettrico" rimane quello più interessante per la possibilità di rifornire di energia il veicolo in tempi contenuti. È universalmente riconosciuta la difficoltà del veicolo elettrico a garantire un contenuto energetico a bordo tale da essere paragonato ad un veicolo convenzionale in termini di autonomia su strada. Questa difficoltà è affrontata sia a livello di crescita della capacità di accumulo presente a bordo che di opportunità di espletamento della ricarica in tempi contenuti. Tuttavia occorre notare che la crescita della capacità di accumulo richiede un aumento della potenza di ricarica per contenere i tempi di rifornimento elettrico.

Attualmente le impostazioni a livello internazionale prevedono che le ricariche di tipo rapido (ed ultrarapido) avvengano in corrente continua. Questo è abbastanza coerente con l'esigenza di non poter ospitare a bordo del veicolo l'elettronica di conversione che a potenze elevate inizia ad assumere pesi ed ingombri non trascurabili. La visione normativa di questa modalità di ricarica è espressa nei diversi contesti mondiali con connotazioni simili. La IEC 61851-1 (Electric vehicle conductive charging system) definisce il modo di ricarica in DC come "modo 4" ed usualmente si applica a potenze di ricarica superiori a 22 kW. In Nord America la ricarica fast è definita "Level 3" con potenze, anche qui, maggiori di 22 kW. La differenza è invece maggiore a livello di interfaccia di collegamento tra veicolo e stazione. In tale ambito si manifesta la mancanza di interoperabilità, poiché le nazioni hanno scelto diverse impostazioni fisiche del sistema di

connessione. Ad esempio, in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportate i tre tipi di connettori maggiormente adottati sul mercato mondiale : il CHAdeMO (proposto dal Giappone), l'europeo COMBO-2 ed il cinese GB/T 20234. A questi occorre aggiungere un quarto tipo di interfaccia, ossia il connettore per il Supercharger Tesla .



Figura 1: Connettori per ricarica fast DC

Questa diversità di standard complica i sistemi di distribuzione dell'energia per la ricarica, che devono provvedere ad una molteplice presenza di connettori per poter soddisfare gli svariati veicoli elettrici sul mercato (Figura 2).

I limiti di erogazione sono altrettanto diversi. Ad esempio CHAdeMO dichiara una corrente massima di 125 A ed una tensione di lavoro di 500 V per 62.5 kW massimi. Attualmente il consorzio CHAdeMO indica la possibilità di innalzare a 200 A la corrente massima per 100 kW di potenza disponibile. Il sistema europeo CCS ha limiti di 200 A e 850 V per cui la massima potenza è di 170 kW (anche se attualmente lavorano a 50 kW). In Cina invece i limiti sono di 250 A e 750 V per 187.5 kW massimi in corrente continua. Tesla in Europa ha un connettore che consente una ricarica a 120 kW massimi in DC.



Figura 2 : Punto di ricarica rapido multistandard

Fissati i contorni operativi massimi dei sistemi di ricarica rapida, è necessario puntualizzare che il processo di ricarica avviene attraverso un controllo puntuale delle condizioni presentate dalla batteria del veicolo. Questo è garantito attraverso un protocollo di comunicazione veicolo-stazione di ricarica che abilita le operazioni di ricarica dopo un corretto riconoscimento del veicolo, dell'inserzione della spina nella presa e del via libera (Figura 3). Inoltre poiché la struttura del protocollo è di tipo master (veicolo) – slave (stazione), è sempre il veicolo a determinare le condizioni di carica della batteria. Pertanto la connessione fisica presenta ulteriori linee di comunicazione per il riconoscimento delle condizioni della connessione.

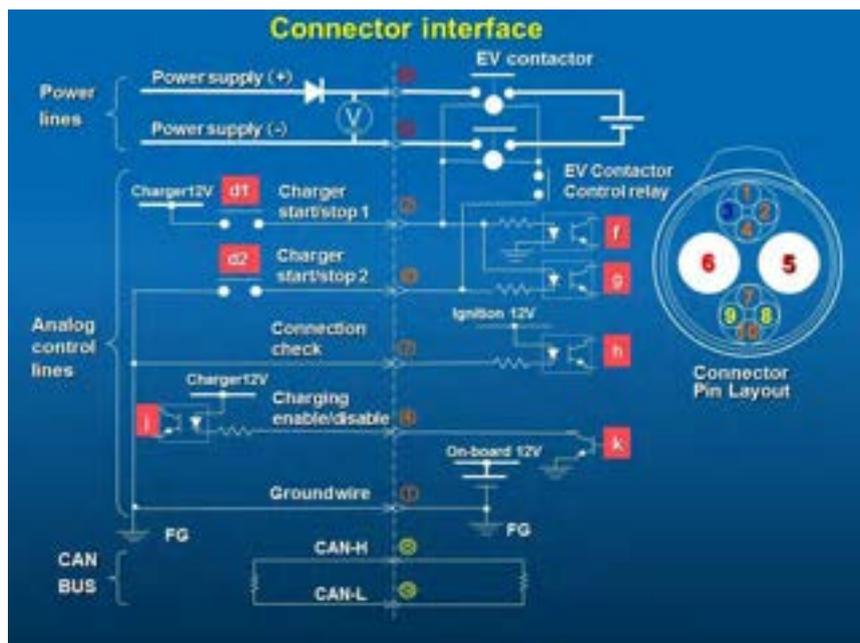


Figura 3 : interfaccia CHAdeMO

Questa impostazione nasce per una salvaguardia dell'accumulo veicolare e per non incorrere in superamenti delle condizioni massime ammissibili per il sistema di accumulo. Nel caso della CHAdeMO il controllo del flusso e gli allarmi viaggiano su un bus CAN che contiene anche le informazioni sulla massima corrente ammissibile. Le condizioni di ricarica sono pertanto fissate dalla batteria che in base al suo stato di carica (SOC) seleziona i diversi parametri del profilo. Questo profilo è genericamente definito come un profilo di tipo CC-CV (corrente costante – tensione costante): all'inizio della carica la batteria accetta una corrente costante con un suo valore massimo relativo impostato dal costruttore e che trova un limite massimo assoluto nel valore accettabile dallo standard. Nel caso CHAdeMO il valore massimo sarà di 125 A. La batteria imporrà una corrente più bassa di quella iniziale a CC quando la tensione sulla batteria avrà raggiunto un determinato valore oppure quando una o più celle del pacco hanno raggiunto una condizione limite. Questa seconda fase vede la riduzione continua della corrente di ricarica in modo da mantenere la tensione della batteria costante (CV). La durata complessiva della ricarica dipenderà da una serie di fattori quali lo stato di carica iniziale, le condizioni della batteria e la temperatura.

Sovente è uso parlare di tempo di ricarica necessario a completare una sessione di ricarica. Ma questo valore è estremamente suscettibile di variazioni e funzione di variabili come la capacità di batteria, il livello di carica iniziale, la temperatura, lo stato di salute della batteria, la potenza di ricarica. Se la capacità nominale della batteria è C_b (in Wh) applicando una potenza P_r costante il tempo utile (in ore) ad effettuare il ripristino dell'energia è pari a :

$$t_r = \frac{C_b}{P_r} \quad (1)$$

L'energia ricaricata cresce linearmente con il tempo sino a raggiungere il valore della capacità nominale C_b

$$E_r = P_r * t \quad (2)$$

Come si vede dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, l'energia massima ricaricabile (pari alla capacità nominale) corrisponde all'area del rettangolo potenza-tempo . Le due grandezze sono pertanto unite da una relazione inversamente proporzionale con parametro la capacità di batteria.

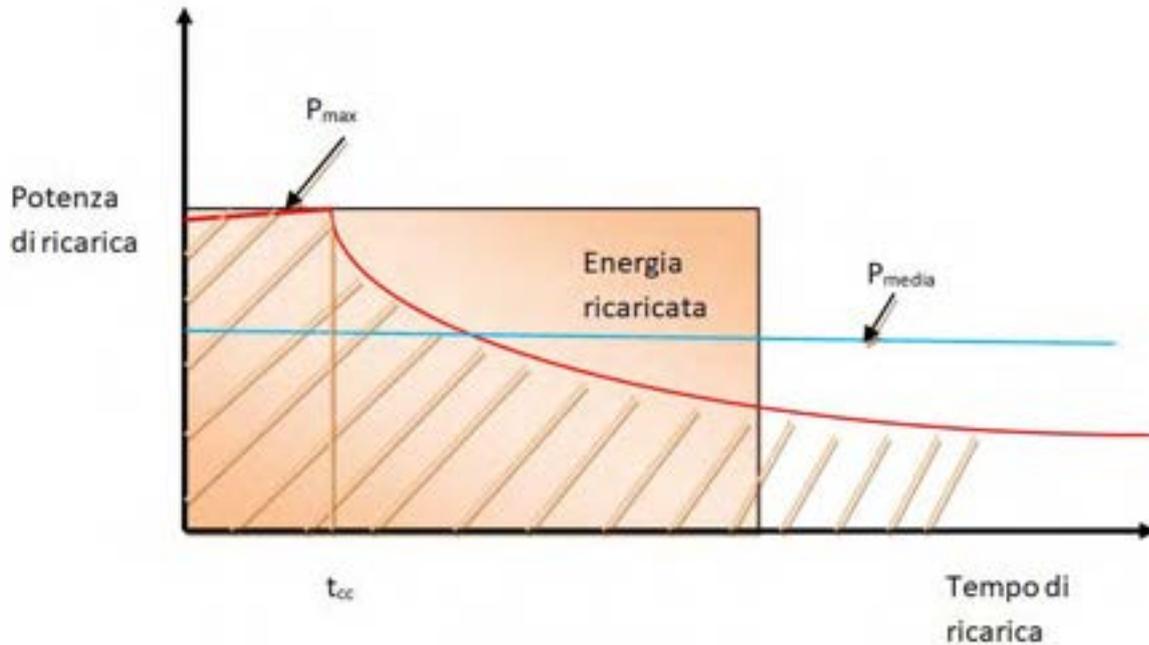


Figura 4:potenza e tempi di ricarica a confronto

Il profilo di ricarica cc-cv ha invece una potenza applicata che è quasi costante nel tratto iniziale e scende durante la fase a tensione costante diminuendo il valore della corrente erogata dal caricabatteria. Il tempo di ricarica dipenderà dal valore medio della potenza di ricarica:

$$t_r = \frac{C_b}{P_m} \quad (3)$$

La potenza media applicata durante la ricarica fast è legata allo stato di carica della batteria poiché esso interagisce con il tempo di ricarica a corrente costante. Infatti se lo stato di carica iniziale è alto la frazione a c.c. potrebbe risultare minore poiché le celle raggiungono prima il valore di soglia in cui si ha il passaggio alla ricarica a tensione costante (Figura 5) .

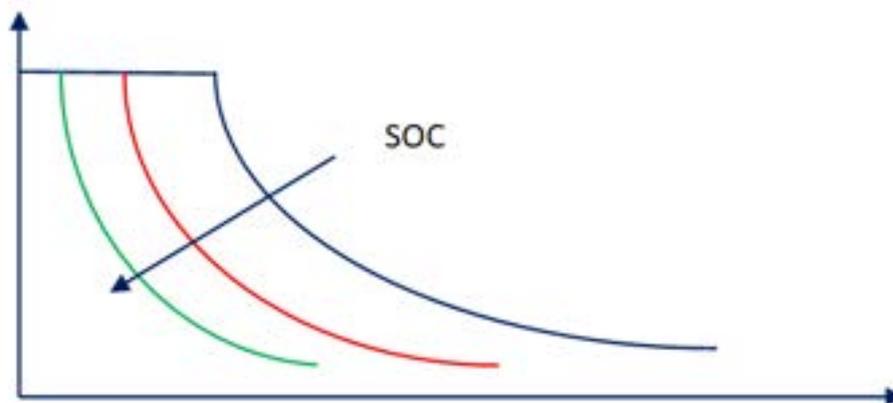


Figura 5 : potenza e tempi di ricarica a confronto al variare del SOC iniziale

Se invece varia la potenza massima sarà il tempo t_{cc} ad allungarsi andando ad aumentare il tempo complessivo di ricarica (Figura 6).

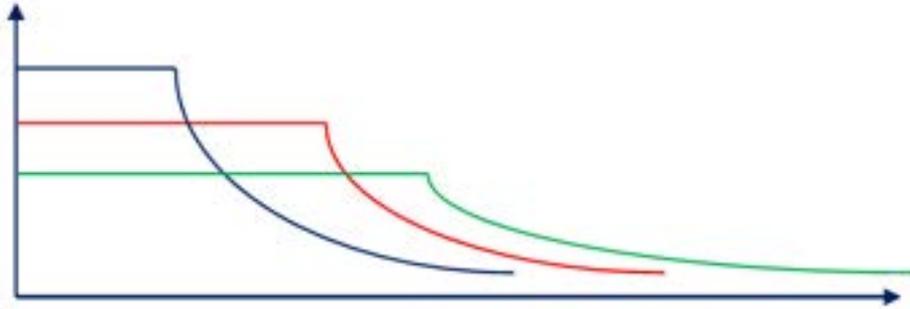


Figura 6 : potenza e tempi di ricarica a confronto al variare della potenza massima

Determinare quindi la potenza media di ricarica è importante per la valutazione dei tempi di ricarica stabilita la potenza massima di ricarica applicata e conoscendo lo stato di carica iniziale della batteria.

1.1. Misure di carica rapida al variare del SOC

Nell'ambito delle attività della RdS, sono state eseguite presso i laboratori ENEA della Casaccia un serie di test sperimentali di ricarica di un veicolo elettrico commerciale utilizzando una stazione di ricarica rapida. La sperimentazione mirava ad appurare il comportamento della ricarica al variare dello stato iniziale della batteria ma anche a valutare i tempi di ricarica al variare della potenza massima di ricarica.

Per questo scopo si è lavorato con una Nissan Leaf da 24 kWh di capacità di batteria su cui è stato installato un sistema di acquisizione dati (Figura 7) in grado di rilevare alcune grandezza di batteria (tensione e corrente complessivi, temperatura delle celle, SOC, tensione delle singole celle). Il sistema è dotato di una interfaccia CAN in grado di leggere i messaggi della rete CAN del veicolo ed estrarre i valori delle grandezze di riferimento. Attraverso un monitor da 7" è possibile monitorare costantemente l'andamento della ricarica o l'evoluzione delle grandezze in misura durante i cicli stradali (Figura 8).



Figura 7 : sistema di acquisizione dati a bordo del veicolo

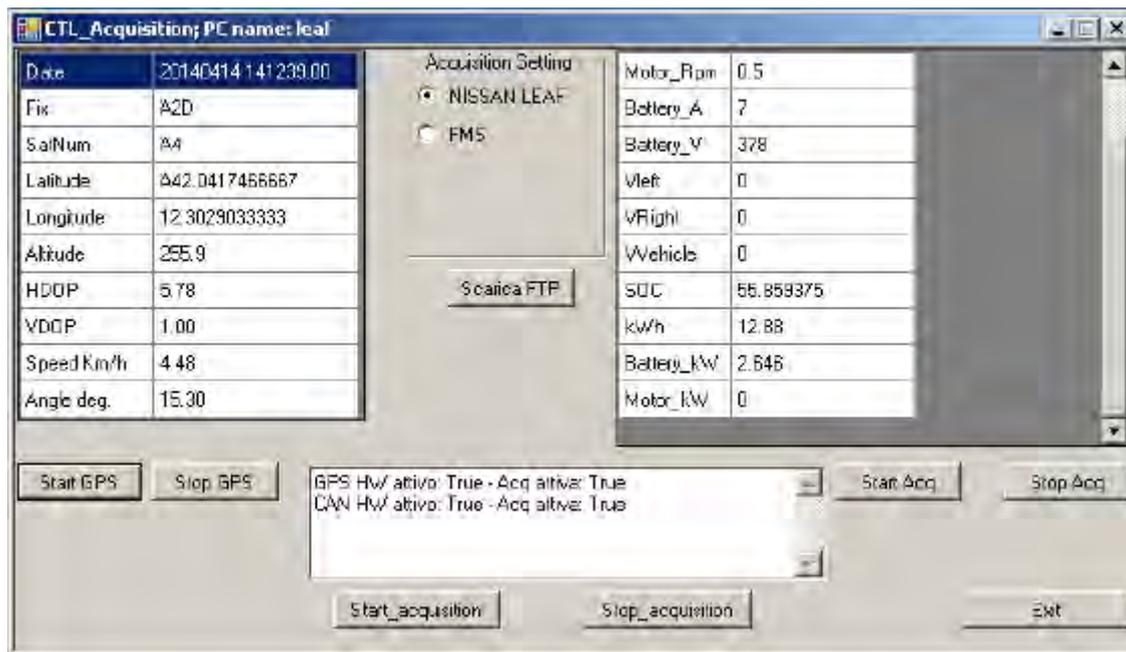


Figura 8 : maschera visualizzazione misure on-board

La stazione di ricarica (Figura 9) è una stazione da 50 kW c.c. con standard CHAdeMO EQC-50 prodotta dall'azienda spagnola Circutor. La colonnina presenta la predisposizione per il collegamento con cavo LAN che permettere di accedere, tramite PC, alla sezione di setting e controllo. Questo consente di riportare su un PC remoto la stessa schermata che si ha sul monitor della colonnina durante la ricarica (Figura 10).



Figura 9 : stazione di ricarica da 50 kW c.c.



Figura 10 : maschera informativa della ricarica in corso

Attraverso il cavo LAN è inoltre possibile accedere alla sezione di controllo riportata in Figura 11. In essa sono riportati i valori istantanei di corrente, tensione, capacità residua e massima di batteria per il veicolo. Una parte della maschera è destinata al controllo alla configurazione di alcuni parametri. In questo modo, in relazione all'obiettivo della sperimentazione, è stato possibile modificare anche la potenza elettrica in uscita e verificare costantemente lo stato di funzionamento della stazione.

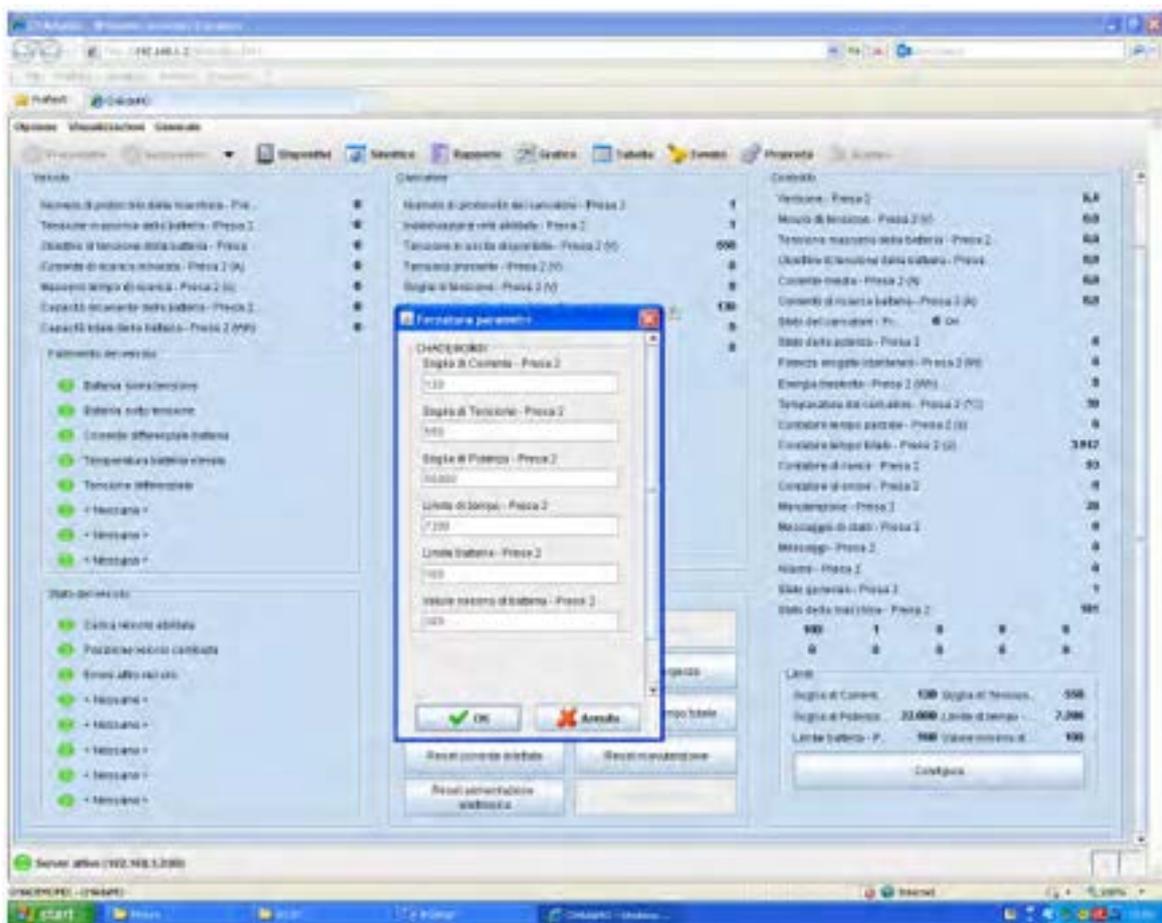


Figura 11 : maschera per le impostazioni delle grandezze limite

La sperimentazione è condotta per un duplice scopo: verificare l'andamento della potenza di ricarica al variare del SOC iniziale della batteria e rilevare i tempi di ricarica al diminuire della potenza massima di

ricarica. Per tali motivi si è operato impostando una tabella sperimentale di prove che si basa su quattro livelli di potenza massima e tre livelli di SOC iniziale (vedi Tabella 1).

SOC iniziale	20	40	60
Potenza kW			
16	*	*	*
22	*	*	*
43	*	*	*
50	*	*	*

Tabella 1 : mappa dei parametri potenza di ricarica e SOC iniziale per i test di ricarica

La scelta dei livelli di potenza è stata eseguita in base ad alcune considerazioni di mercato :

- 50 kW perché rappresenta la potenza massima della maggior parte delle stazioni in c.c. presenti sul mercato;
- 43 kW è la potenza massima di ricarica in c.a. secondo lo standard “fast AC” a 400 V 63 A;
- 22 kW è la potenza di riferimento per la ricarica con caricabatterie a bordo di tipo trifase;
- 16 kW è una scelta arbitraria sulla base delle soglie contrattuali di distribuzione dell’energia elettrica.

Prendiamo ad esempio la ricarica con potenza di 50 kW c.c. e con un SOC iniziale della batteria del 20% di cui riportiamo in Figura 12 i parametri elettrici rilevati in misura. La prima parte della carica avviene a corrente costante con un valore della medesima di 125 A. La durata di questo tratto è di 127 sec e durante questa fase la tensione cresce in modo quasi lineare. Al raggiungimento di 388 V avviene la commutazione, con susseguente riduzione della corrente ed una crescita della tensione sempre lineare. Successivamente la tensione rimane costante e la corrente diminuisce sino allo stop dell’operazione di ricarica.

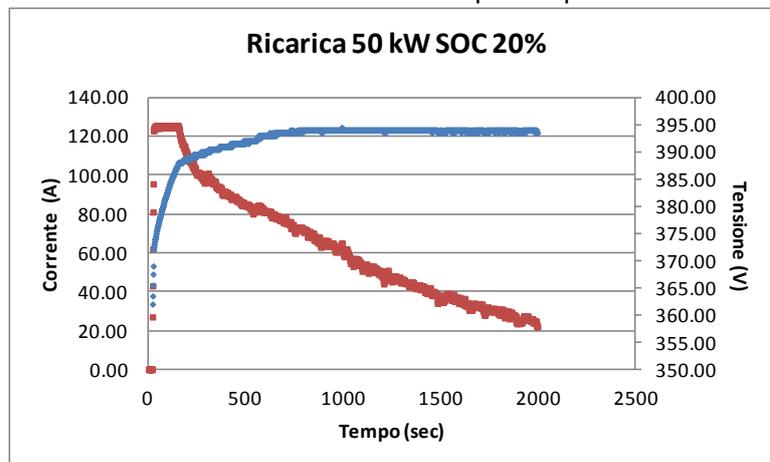


Figura 12: V ed I in ricarica con SOC iniziale del 20%

E' interessante confrontare questo dato di misura con una misure antecedente corrispondente a batterie nuove, come mostrato in Figura 13. In quella ricarica il tempo a corrente costante è maggiore e pari a circa 450 sec contro i 120 circa dell'altro caso. Se verificiamo il valore della tensione alla commutazione il valore è di 395 V. Probabilmente le celle del pacco batteria, nel caso precedente, sono sbilanciate ed si giunge prima al valore limite inducendo una commutazione anticipata.

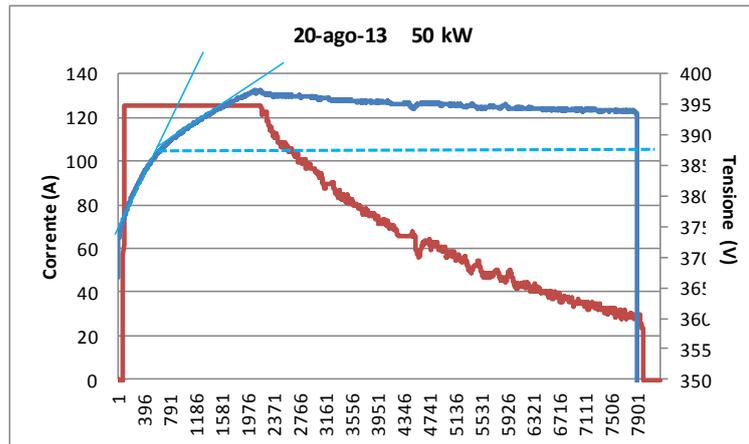


Figura 13 : V ed I in ricarica con SOC iniziale del 20% con batterie nuove

Da notare che la tensione cresce con due pendenze distinte con una discontinuità intorno ai 388 V in entrambe le condizioni. Questo potrebbe essere dovuta alla variazione della tensione di batteria a vuoto con la variazione del SOC. La Figura 14 mostra che la tensione a vuoto cresce repentinamente nel primo tratto di ricarica se il SOC è molto basso per poi crescere più lentamente ma con una discontinuità intorno al 40% del SOC (40 Ah).

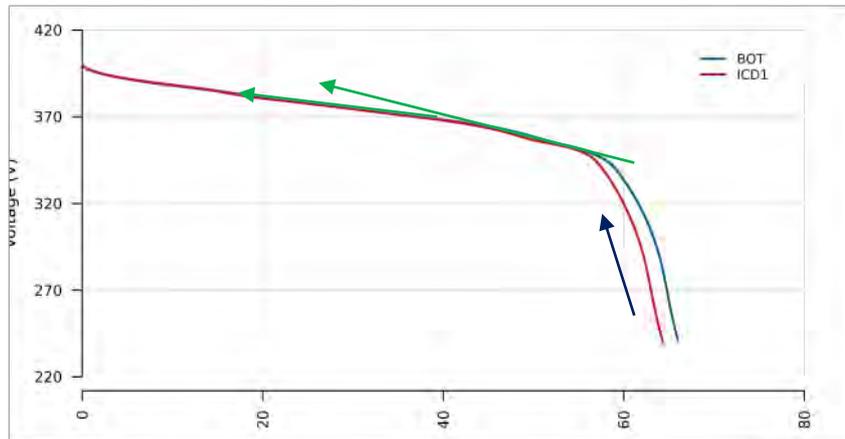


Figura 14 : curva batteria LEAF al variare del SOC

Data l'espressione per la tensione:

$$V_b = E_0(SOC) + R_i * I_b \quad (4)$$

Si deduce che con I_b costante è la $E_0(SOC)$ che impone una crescita della tensione di batteria nel tratto iniziale. Nella Figura 15 sono riportate le curve della tensione di batteria al variare dello stato di carica iniziale (tre curve 20, 40 e 60 % del SOC). Nel caso di SOC iniziale basso si nota la discontinuità della tensione mentre per le altre due curve la discontinuità non è evidente avendo uno stato di carica iniziale maggiore.

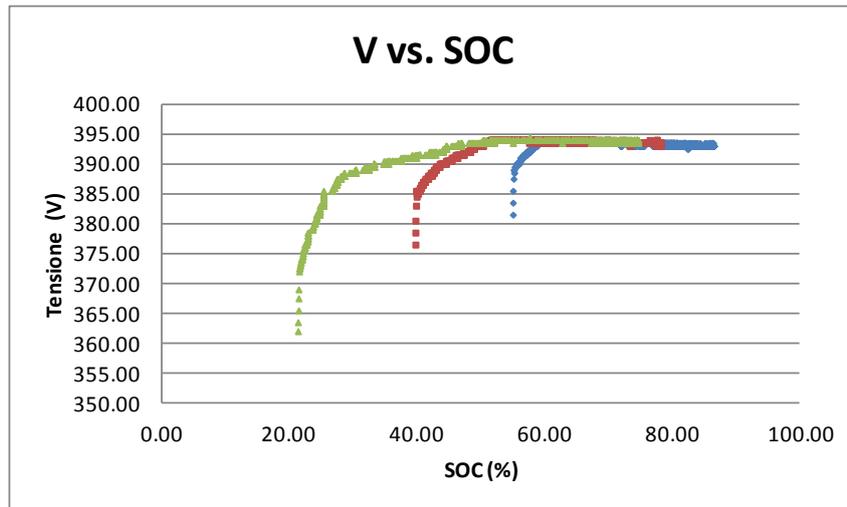


Figura 15 : tensione batteria al variare del SOC in ricarica

La corrente in ricarica, a parità di potenza massima in ricarica, è determinata dalla batteria attraverso il BMS (Battery Management System). A valori del SOC elevati il BMS impone un valore massimo inferiore al massimo assoluto e senza la configurazione a corrente costante. La Figura 16 mostra questo andamento evidenziando nel solo tratto a basso SOC iniziale il tratto a corrente costante. L'assenza del tratto a corrente costante è dovuto alle condizioni delle celle della batteria che sono monitorate dal BMS e che si trovano in condizioni tali da richiedere una corrente di carica più bassa della massima possibile.

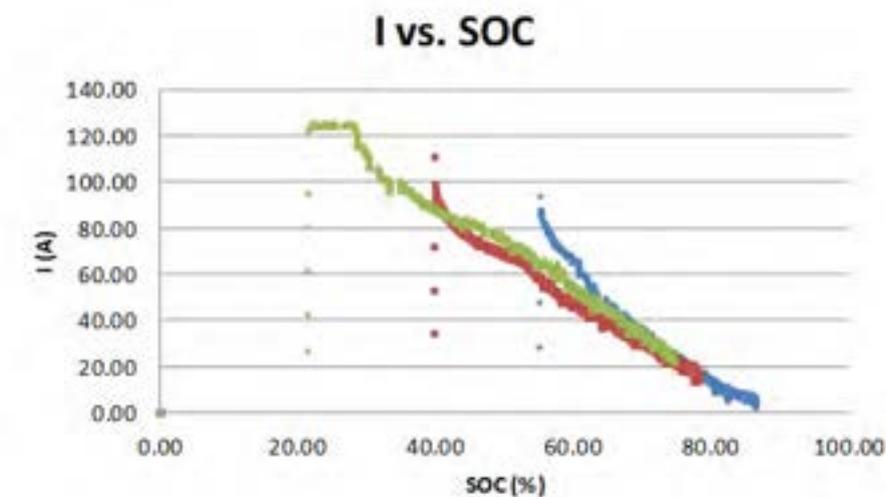


Figura 16 : corrente in ricarica al variare del SOC iniziale

La potenza impegnata è quindi dipendente dal livello di carica iniziale presente nell'accumulo come è possibile rilevare nella Figura 17. Il profilo mostra una riduzione della potenza massima richiesta con un profilo di potenza decrescente nel tempo con le medesime caratteristiche.

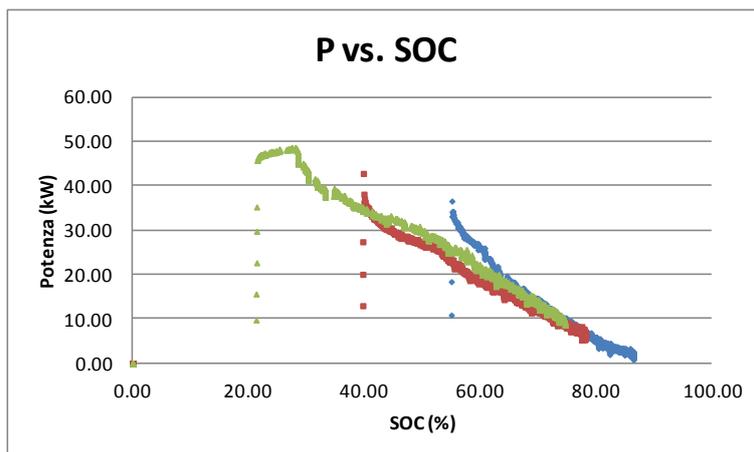


Figura 17 : profilo potenza in ricarica al variare del SOC

La potenza media associata alla ricarica si riduce al crescere del SOC iniziale ed insieme ad esso anche l'energia ricaricata. La Figura 18 evidenzia come evolve l'energia in ricarica della batteria nel tempo ed in relazione alla crescita del SOC.

SOC	60	40	20
P_m (kW)	8.56	15.84	24.91
P_{MAX} (kW)	36.6	42.8	48.6
E (kWh)	6.9	8.8	13.6
T (sec)	2916	2000	1978

Tabella 2 : potenza media e massima erogata in ricarica al variare del SOC

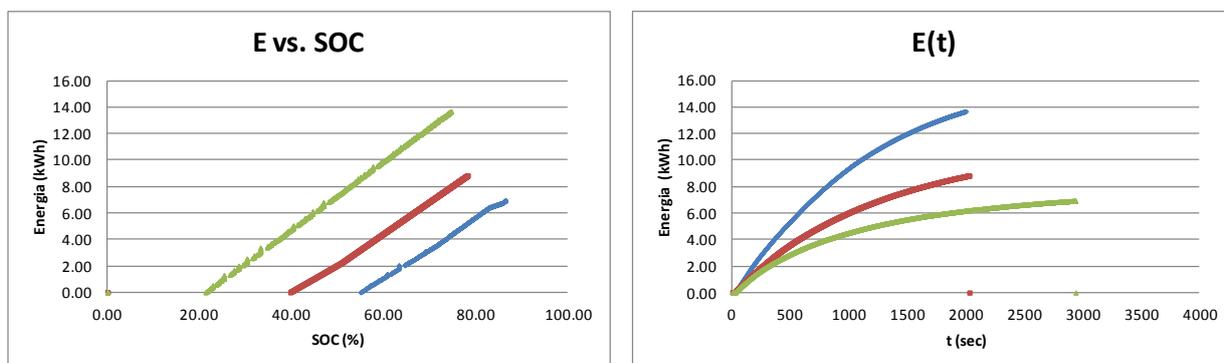


Figura 18 : energia in ricarica

Come già detto i tempi di carica, a parità di capacità di accumulo disponibile, sono funzione della potenza disponibile per la ricarica. Infatti la Figura 19 mostra l'andamento della potenza per un SOC iniziale del 20% al variare della potenza massima disponibile: ridurre la potenza massima allunga l'intervallo a corrente costante ed il tempo di ricarica totale.

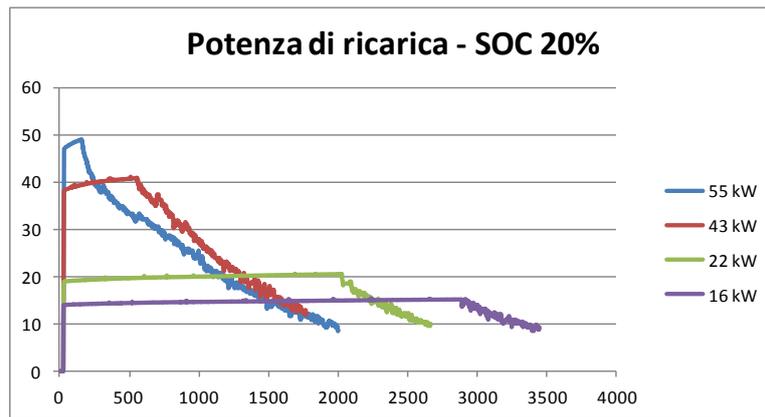


Figura 19 : tempi di ricarica al variare della potenza massima

Infine è interessante notare come la riduzione della potenza massima di ricarica faccia crescere il livello del SOC finale (Figura 20) . Infatti, aumenta la percentuale di ricarica a correnti basse andando a migliorare l'efficienza della ricarica e riducendo la crescita delle tensioni di cella.

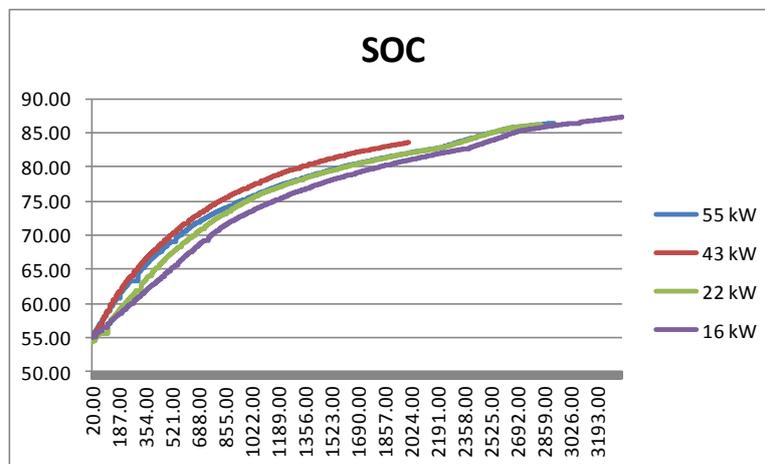


Figura 20 : SOC al variare della potenza massima

2. Dal profilo di affollamento all'impegno di potenza elettrica

1.2. Importanza della taglia energetica.

La possibilità di disporre di una stima del profilo di potenza elettrica istantanea impegnata da una stazione di ricarica elettrica (nel presente lavoro consideriamo solo ricariche veloci) ha ricadute immediate sulla progettazione e sull'esercizio dell'impianto: infatti dal profilo di potenza si può desumere la sua taglia energetica massima, media, minima.

Queste conoscenze hanno un impatto immediato sul modo di costruire e gestire l'impianto, perché aprono la strada a diverse scelte progettuali possibili (ad esempio: a rifornimento unico dalla rete elettrica, oppure alla scelta di un mix rete-produzione energetica locale da fonti rinnovabili, oppure ancora pensando alla contemporanea presenza di sistemi di accumulo stazionari a batteria, ecc..).

Questi aspetti rivestono un'importanza fondamentale per l'investitore che decida di impiegare risorse economiche in una stazione di ricarica elettrica, perché decidono il suo punto di ritorno economico e gli sviluppi prevedibili di profitto; quindi la taglia energetica ricorre come elemento fondante ed indispensabile nella *business-side analysis*.

Nel seguito illustreremo la procedura computazionale che permette di arrivare a definire il profilo di potenza elettrica assorbita dalla stazione durante la sua operatività, a partire dal profilo di affollamento ottenibile con le procedure già illustrate nel report RdSE [1] relativo alle attività dell'anno 2016.

I passi salienti di questa procedura sono i seguenti:

- 1) Definizione di un profilo di ricarica tipico (cioè per una vettura tipo) dipendente dallo stato di carica (SOC, state of charge; il SOC% è il SOC espresso in percentuale della carica totale) attuale, cioè relativo al momento della richiesta di ricarica;
- 2) Definizione istante per istante per ogni presa o punto di ricarica della stazione degli impegni elettrici delle vetture in ricarica assegnate alla presa, rispettando rigorosamente i tempi di arrivo delle vetture al punto stesso (profilo di impegno energetico del punto di ricarica elettrica);
- 3) Somma dei profili di impegno energetico di tutti i punti di ricarica di una stazione, onde ottenere il profilo di impegno elettrico totale di stazione.

2.2 Definizione del profilo tipico di ricarica

Nel capitolo precedente si è visto come sia stata organizzata una campagna specifica di misure dei profili di scarica e ricarica veloce in varie condizioni di SOC per una vettura elettrica abbastanza diffusa, la Nissan Leaf.

Ci riferiremo nel seguito a questa vettura come ad una vettura tipo di medie prestazioni, quindi adatta a rappresentare un parco veicolare di varia composizione, ad esempio quello italiano.

La campagna di misure è stata effettuata mediante rilevazioni secondo per secondo dei consumi e delle ricariche della Nissan Leaf in un utilizzo reale su strada; le misure sono poi state registrate su supporto digitale. Queste misure hanno permesso di ottenere le curve di ricarica con diverse condizioni iniziali di SOC.

L'influenza del SOC sulla ricarica e sui suoi comportamenti è conosciuta ed è stata ribadita da queste esperienze sperimentali: infatti si sa che l'impegno elettrico, e quindi il profilo di ricarica delle batterie varia in dipendenza dello stato di carica residua delle batterie, quello disponibile al momento della ricarica.

Le misure hanno impegnato diversi periodi di tempo, durante i quali sono state monitorate le diverse missioni fatte appositamente su strada per valutare le prestazioni della vettura ed i suoi comportamenti nelle fasi di carica (lenta e veloce) e scarica elettrica su strada (si veda cap. 1).

Noi ci rivolgeremo in particolare alle fasi di ricarica veloce, che sono state eseguite in diverse situazioni di SOC e che sono state estratte dai profili energetici complessivi registrati.

Nel seguito intenderemo in maniera equivalente il SOC% residuo a fine percorrenza (di giornata, di missione, ecc..) oppure il SOC% iniziale all'avvio della ricarica immediatamente successiva, ossia riterremo trascurabile qualsiasi fenomeno di autoscarica.

In dettaglio, abbiamo selezionato quattro profili di ricarica veloce con i seguenti SOC% residui: 20%, 40%, 55%, 74%.

In Figura 21 vengono riportati i relativi quattro profili di ricarica su 1800 secondi (30 minuti, la tipica durata di ricarica veloce), ottenuti dalle registrazioni con campionamento ogni secondo.

Se il livello di carica della batteria è molto basso, quindi ad esempio con SOC residuo del 20%, la ricarica a mezz'ora non esaurisce la capacità energetica della batteria; si vede in Figura 21 che alla fine della mezz'ora c'è ancora una richiesta di 12 kW circa.

Per situazioni di batteria poco scarica (SOC% residuo del 74%), invece, la richiesta elettrica finale è di qualche kW.

In Figura 21 i profili sono stati ottenuti troncando a 30 minuti le registrazioni di ricariche che in realtà avevano una durata più lunga, tali in da arrivare sino alla situazione di ricarica totale; la rappresentazione quindi è limitata nel tempo a 30 minuti, poiché è la durata temporale della ricarica rapida che abbiamo utilizzato nella nostra simulazione. Le misure utilizzate rispettano comunque la situazione di valore iniziale di SOC%.

La colonnina di ricarica utilizzata ha una capacità di erogazione di 50 kW.

Si può notare in Figura 21 l'effettiva differenza tra i vari profili, di cui bisogna tener conto se si vuole stimare ragionevolmente il profilo di impegno elettrico istantaneo della colonnina e della stazione. Abbiamo assunto che ogni veicolo del nostro campione all'inizio delle sue varie missioni che lo portano a compiere un tragitto compreso tra i 70 ed i 140 km fosse a batteria completamente carica, a cui corrisponde secondo i dati Nissan un'autonomia di 200 km circa.

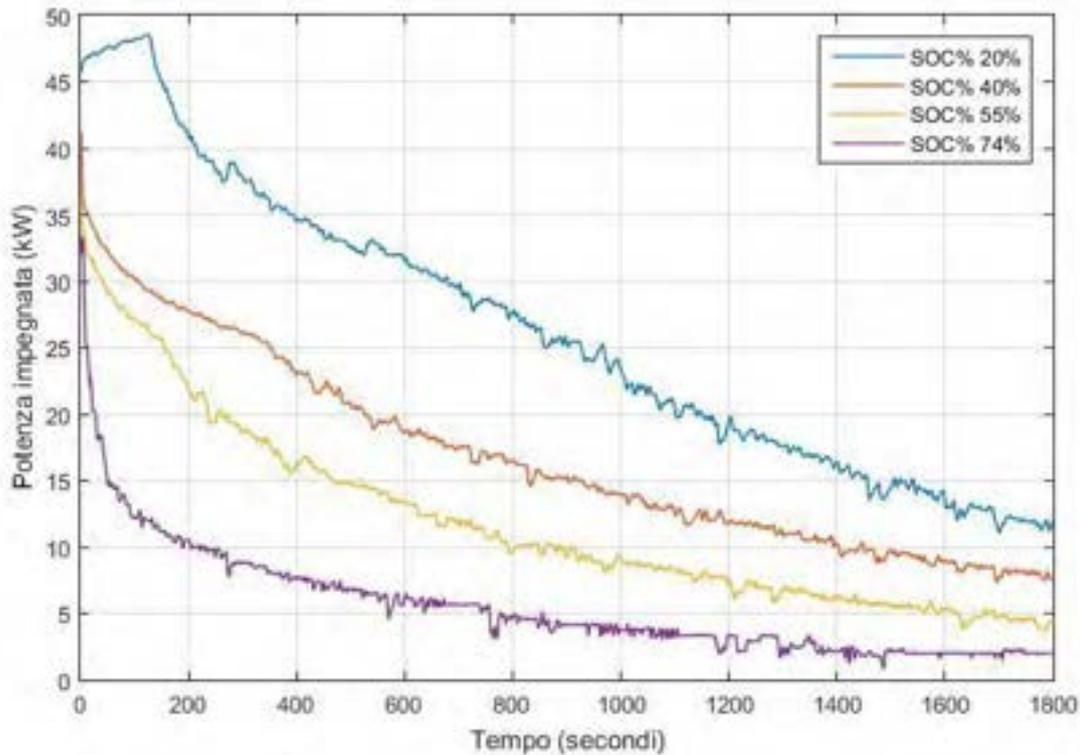


Figura 21: I profili di ricarica veloce in funzione del SOC% iniziale

Questa ipotesi ci permette di calcolare facilmente il livello del SOC% residuo alla fine del tragitto urbano con percorrenza compresa nel range chilometrico prefissato (70-140 km) e con termine di missione nella nostra area di studio (si veda in [1] la metodologia di selezione del campione di utenti).

Infatti in generale si ha:

$$\text{SOC\%} = 100 \times (\text{Autonomia} - \text{Percorrenza}) / \text{Autonomia}$$

$$0 \leq \text{Percorrenza} \leq \text{Autonomia}$$

In particolare:

$$\text{SOC\%}_{70\text{km}} = 100 \times (200 - 70) / 200 = 65\%$$

$$\text{SOC\%}_{140\text{km}} = 100 \times (200 - 140) / 200 = 30\%$$

Questi due valori estremi di SOC%, validi per le percorrenze del nostro campione, si vanno a collocare entro i valori estremi di SOC% delle nostre curve sperimentali (20% - 74%). Possiamo quindi assumere che per le vetture del nostro campione veicolare, che presentano un SOC% iniziale che si colloca nel range 30% - 65%, i profili di ricarica si possano ottenere per interpolazione delle curve sperimentali.

2.3 Determinazione del profilo di ricarica di un veicolo elettrico tramite interpolazione

Come noto, l'interpolazione matematica permette di ottenere un insieme di punti interni ad un insieme discreto di punti noti, supponendo che questi punti noti possano essere rappresentati da una funzione matematica.

Nel nostro caso il problema si pone nel modo seguente.

Supponiamo di voler ottenere per interpolazione il valore del profilo energetico di ricarica (in kW) al tempo $t = 600$ secondi relativamente ad un SOC% iniziale del 30% (si veda la Figura 22).

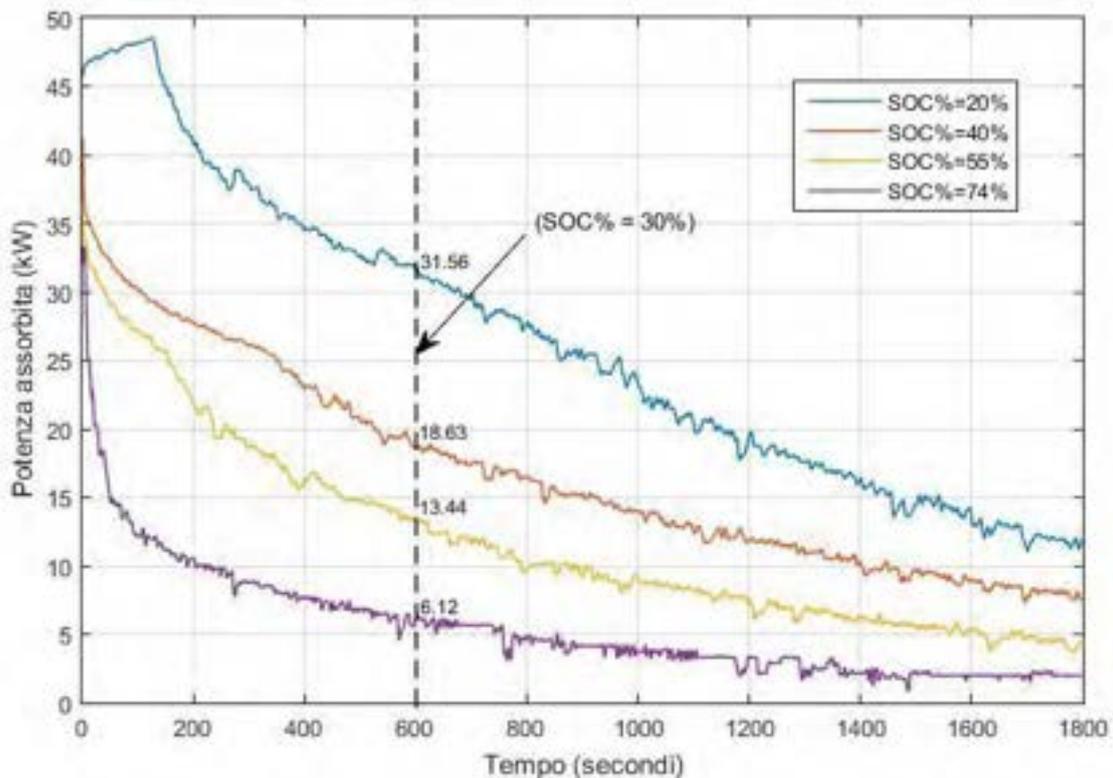


Figura 22: – Interpolazione per un valore di SOC% = 30% al tempo $t = 600$

Dalle 4 curve sperimentali si estraggono per $t = 600$ sec. i valori di potenza elettrica assorbita, corrispondenti ai valori di SOC% del 20%, 40%, 55%, 74% (nella Figura 22 sono rappresentati tali valori, accanto al corrispondente profilo).

Il problema allora può essere visto come in Figura 23, dove è stata effettuata una trasposizione rappresentativa nel piano (SOC%, kW).

Su questi 4 valori di potenza, considerando i corrispondenti valori di SOC%, si può dunque avviare un processo di interpolazione matematica che, come noto, si avvale di una pluralità di metodi; nel nostro caso abbiamo scelto una interpolazione condotta con funzioni spline cubiche.

L'interpolazione è stata effettuata in ambiente Matlab [2] con la routine *csapi*, che appunto considera la desiderata funzione interpolante e fornisce in corrispondenza di un SOC% del 30% un valore di potenza impegnata di 23.78 kW.

La Figura 23 nel piano (SOC%, kW) illustra con maggiore dettaglio la procedura, riportando anche in rosso l'andamento complessivo della interpolante nel range (15% - 80%) di SOC%.

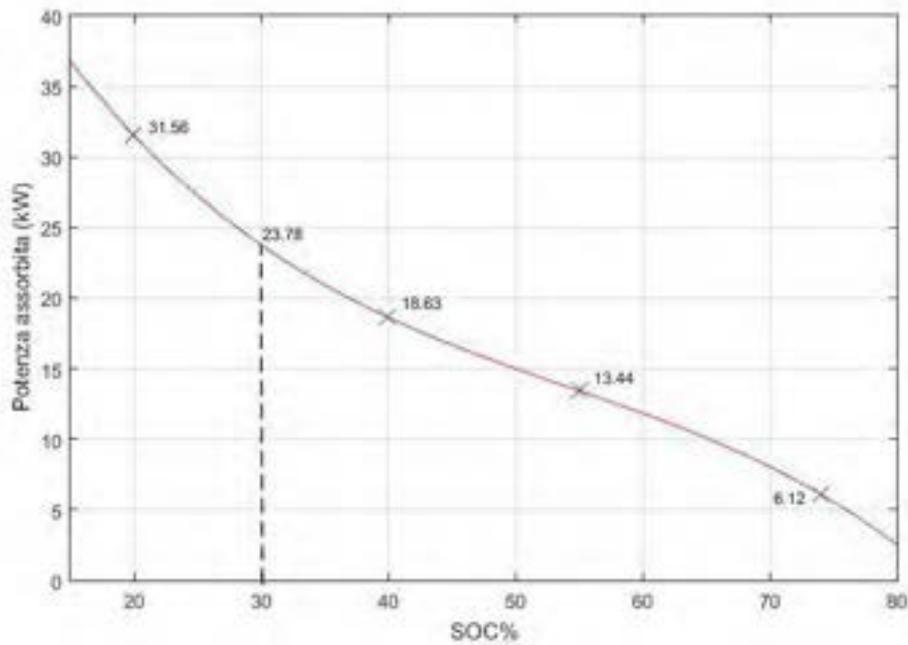


Figura 23: Interpolazione per il valore di SOC% del 30%

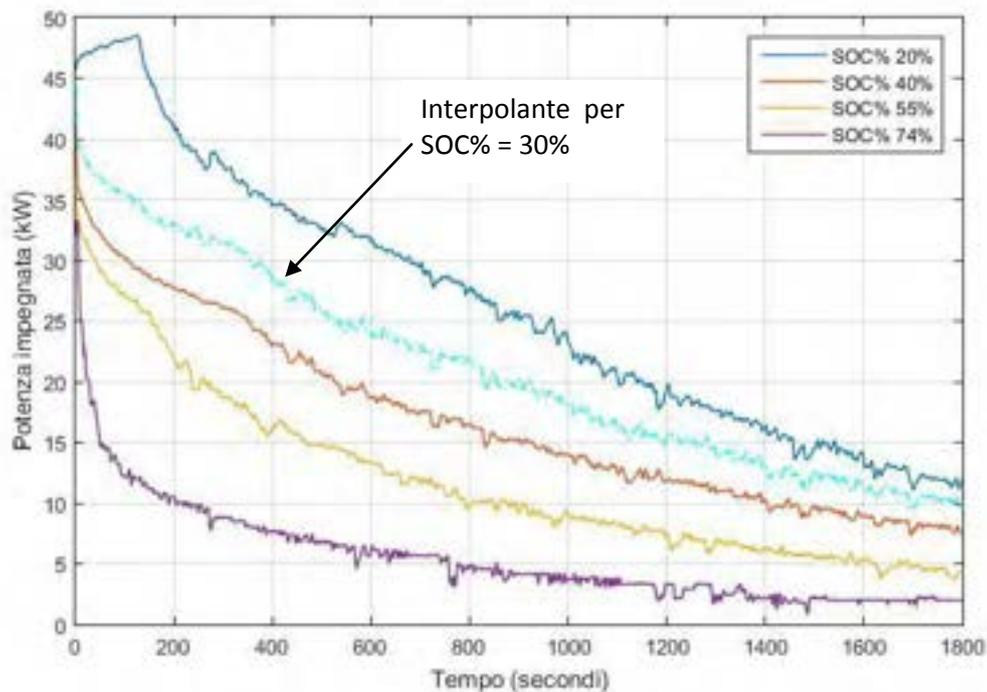


Figura 24: Interpolante completa per un valore di SOC% del 30%

Iterando il processo 1800 volte, per $t = 1, 2, \dots, 1800$, a SOC% uguale nel nostro esempio al 30%, si arriva alla fine a costruire l'intero profilo di ricarica elettrica nel tempo, come riportato in Figura 24. La procedura può essere applicata a qualunque altro valore di SOC% per ottenere il relativo profilo di impegno di potenza elettrica.

L'impegno computazionale per l'interpolazione di un profilo completo di ricarica è abbastanza contenuto, nonostante l'elevato numero di singole interpolazioni (1800). Esso risulta di durata pari a circa 1 secondo su un PC portatile Lenovo Ideapad 500 con processore Intel @ 2.50 GHz, 12 GB di memoria.

Un opportuno software in ambiente Matlab è stato appositamente sviluppato in maniera da realizzare un profilo completo di ricarica del veicolo tipo, dopo assegnazione di un certo valore di SOC% iniziale compreso nel range (20% - 74%).

2.4 Il profilo di potenza elettrica di punto di ricarica (colonnina) di una stazione

Abbiamo visto nel paragrafo precedente come definire per interpolazione la stima del profilo di ricarica di una vettura elettrica tipo, a partire dal SOC% del suo momento iniziale di ricarica.

Nella precedente annualità, abbiamo analizzato l'andamento temporale di una ipotetica domanda di ricarica elettrica di una zona urbana di Roma. Per simularne l'andamento, abbiamo analizzato un campione di dati OctoTelematics e abbiamo preso in considerazione diversi scenari possibili per le stazioni di ricarica, che sono state collocate in tre punti della zona e il cui numero di colonnine costituiva una variabile del problema (si veda [1]). L'assegnazione dei veicoli del campione alle stazioni di ricarica si può quindi risolvere in un insieme di storie individuali di ricariche dalle varie colonnine disponibili.

Per costruire una storia di colonnina bisogna rispettare un vincolo fondamentale: ciascuna sua storia di impiego deve riportare nei giusti tempi i profili di ricarica dei veicoli a lei assegnati, cioè rispettando i momenti di inizio della ricarica e senza sovrapposizioni temporali tra ricariche successive alla stessa presa.

Un'opportuna procedura software è stata messa a punto per realizzare appunto la storia di colonnina, integrando vari aspetti già sviluppati nella presente annualità ed in quella precedente.

Tale procedura software, per ogni colonnina presente, recupera dal programma di assegnazione presentato in [1] ciascun veicolo a lei assegnato, ne calcola il SOC% iniziale di ricarica deducendolo dalla sua percorrenza (ipotizzando che l'autonomia di tutti i veicoli coincida con quella della Nissan), ne determina tramite la tecnica di interpolazione presentata nel § 2.3 il profilo di carica e lo colloca sull'asse temporale della settimana 6 – 12 maggio 2013 col giusto tempo iniziale: si costruisce in questo modo la storia di ricarica di ciascuna colonnina.

In Figura 25 sono presentate le storie della colonnina no.1 e no.15 della stazione #3, ovvero la sequenza di ricariche in ciascuna colonnina, relativamente allo scenario a) di [1], formato da 3 stazioni opportunamente distribuite nella zona in studio e con la seguente distribuzione di colonnine di ricarica:

- stazione #1: 20 colonnine di ricarica
- stazione #2: 30 colonnine di ricarica
- stazione #3: 30 colonnine di ricarica

per una dotazione totale di 80 colonnine.

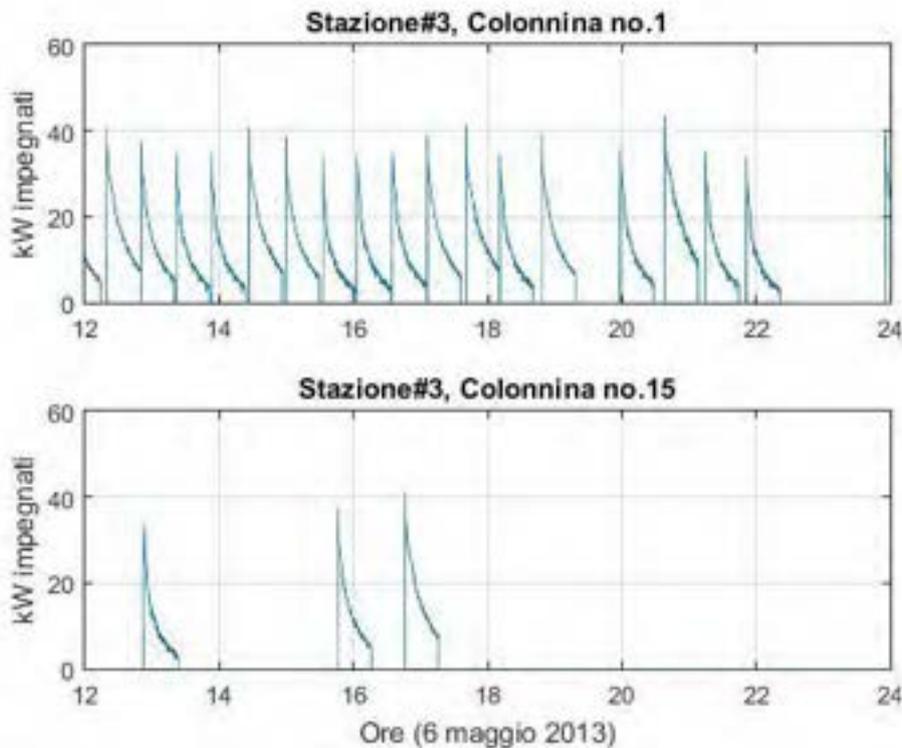


Figura 25: Storie di ricarica per alcune colonnine dello scenario a)

Questo scenario è stato costruito per simulare una situazione con un'alta disponibilità di punti di ricarica rispetto alla domanda ipotizzata.

Viene presentata la colonnina no.15 (sono disponibili 30 colonnine in questo scenario per la stazione #3) per poter fare utili confronti con un altro scenario che verrà presentato nel seguito.

Le storie presentate in Figura 25 si riferiscono per chiarezza solo al giorno di lunedì 6 maggio 2013, relativamente all'intervallo orario compreso tra le 12:00 e le 24:00.

Si può notare nella stessa figura la situazione di saturazione quasi continua per la colonnina no.1 e la situazione di disimpegno spinto per la colonnina no.15. Infatti la procedura di assegnazione delle vetture alle stazioni su cui ci siamo basati (presentata nel report [1]) procede, come è giusto che sia per ragioni di compattamento delle richieste di ricarica, cercando di saturare il più possibile le colonnine di numerazione più bassa, e procedendo verso la numerazione più alta quando se ne presenti la necessità.

Si notano ancora in Figura 25 le diverse forme dei profili di ricarica di ciascun veicolo, dovute al fatto che ciascuna vettura si presenta alla colonnina con un SOC% iniziale diverso.

La colonnina no.1 effettua in tutta la settimana 237 ricariche, mentre la no. 15 ne effettua 31; per completezza di informazione, la colonnina no. 30 effettua solo 3 ricariche in una settimana: l'alta disponibilità di punti di ricarica rende le ultime colonnine poco operative, e quindi antieconomiche dal punto di vista dell'investitore/gestore.

Un punto di forza della nostra metodologia è che si può valutare il rapporto tra la soddisfazione del cliente (in termini di livello dei tempi di attesa) e la soddisfazione dell'investitore (in termini di contenimento delle spese di investimento) con facilità: è chiaro che eliminando le colonnine meno frequentate si risparmia sull'investimento a discapito del livello di servizio.

Il cliente in una situazione di affollamento si vede ricollocato su altre colonnine già impegnate, e quindi costretto a tempi di attesa: la nostra metodologia permette di valutare quantitativamente gli aggravii dei tempi di attesa (in termini di valore medio, massimo, individuale).

In Figura 26 vengono presentate le storie delle colonnine no.1 e no.15 dello scenario c) riportato in [1], che è relativo ad una situazione di sottodimensionamento del numero di punti di ricarica rispetto alla domanda ipotizzata; essa è sempre relativa al giorno 6 maggio 2013, tra le ore 12:00 e le ore 24:00.

Nello specifico, lo scenario c) è composto da:

- stazione #1: 5 colonnine di ricarica
- stazione #2: 5 colonnine di ricarica
- stazione #3: 15 colonnine di ricarica

per una dotazione totale di 25 colonnine.

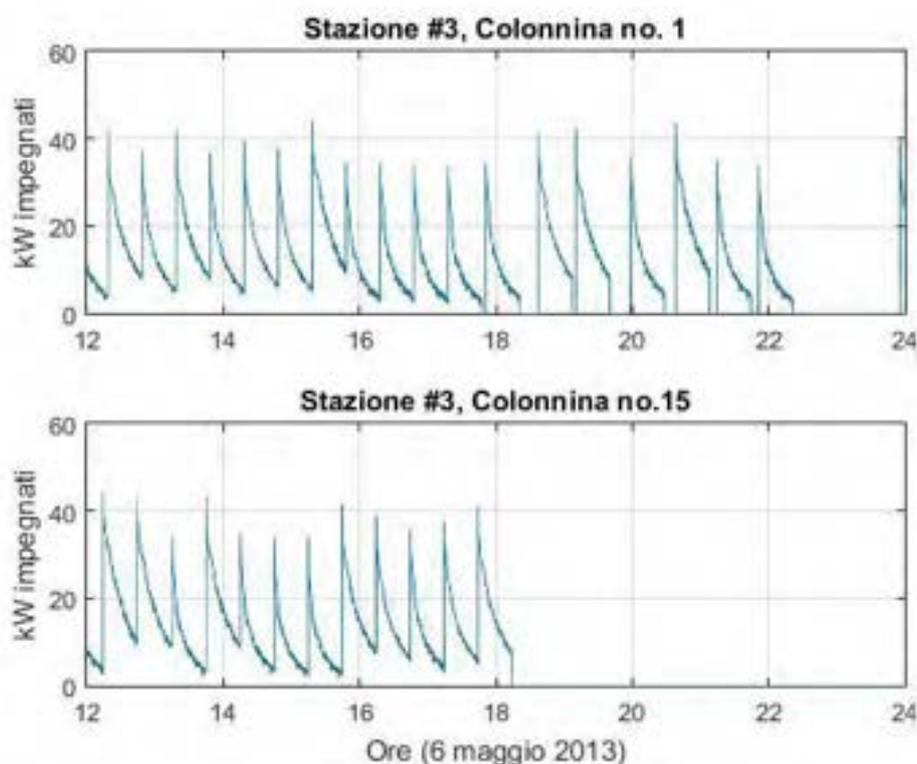


Figura 26: Storie di ricarica per alcune colonnine dello scenario c)

E' evidente dal confronto tra la Figura 25 e la Figura 26 come nello scenario c) risulti un maggiore livello di impegno di ricarica elettrica, che risulta evidente quando si confrontino la colonnina no. 15 dello scenario a) con quello dello scenario c), che è l'ultima disponibile per la stazione #3 in questo scenario di scarsa disponibilità di punti di ricarica. Il maggiore affollamento della colonnina 15 nello scenario c) è effetto della redistribuzione dell'utenza tra le 3 stazioni e tra i relativi punti di ricarica, quando questi ultimi a parità di domanda vengano ridotti in numero.

Per completezza di informazione, la colonnina no.1 della stazione #3 in quest'ultimo scenario effettua nell'arco della settimana 240 ricariche (contro le 237 della corrispondente colonnina nello scenario a),

quindi in entrambi i casi siamo vicini alla saturazione), mentre la colonnina no. 15 ne effettua 47 (che sono circa il 50% in più rispetto al primo scenario).

2.5 Il profilo di impegno energetico di stazione

Nel report [1] abbiamo assunto come scenario di disponibilità intermedia di punti di ricarica (chiamandolo scenario b)) la seguente ipotesi di situazione d'area:

- stazione #1: 10 colonnine di ricarica
- stazione #2: 10 colonnine di ricarica
- stazione #3: 20 colonnine di ricarica

per una dotazione totale di 40 colonnine.

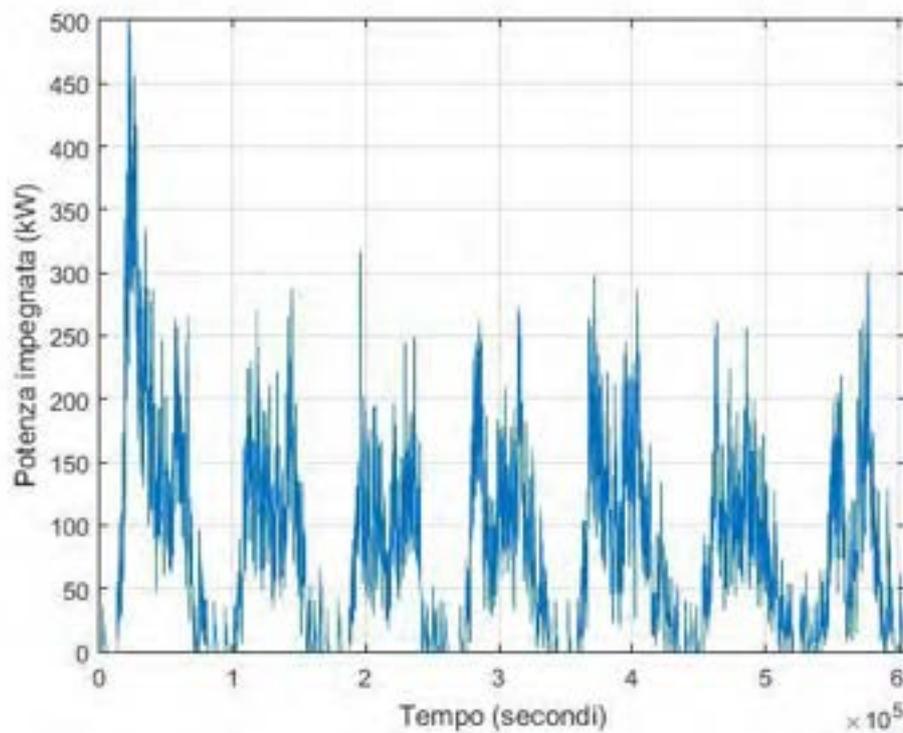


Figura 27: Il profilo di impegno elettrico della stazione #3 per lo scenario a)

Prendendo in considerazione i tre scenari considerati, è stata effettuata l'analisi di impegno elettrico per la sola stazione #3 tramite la nostra procedura software, che ha costruito tutte le storie individuali di colonnina (precisamente: 30 per lo scenario a), 20 per lo scenario b) e 15 per lo scenario c)).

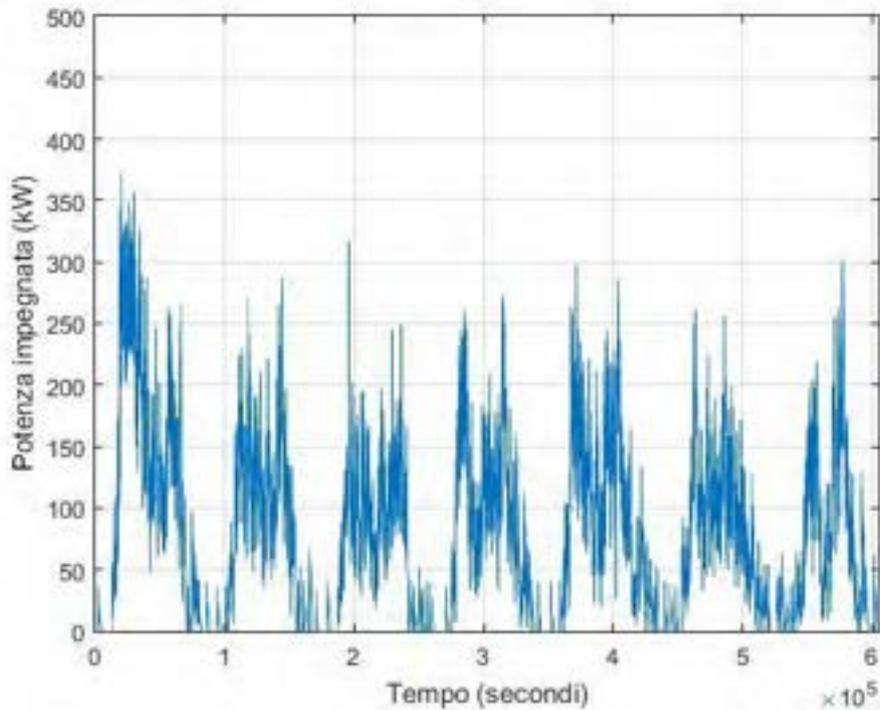


Figura 28: Il profilo di impegno elettrico della stazione #3 per lo scenario b)

Sommando per ogni secondo di tempo lungo tutta la settimana le storie individuali di colonnina pertinenti a ciascuno scenario, si ottiene il profilo di impegno elettrico per la stazione #3 nelle varie situazioni ipotizzate.

La Figura 27, la Figura 28 e la Figura 29 presentano i 3 profili sui tre scenari; quindi la Figura 27 è stata ottenuta come somma istante per istante delle 30 storie individuali di colonnina relative al primo scenario, e così via per le altre figure degli altri scenari.

È interessante notare, per confronto tra la Figura 27 e la Figura 29, che si riferiscono alla situazione di massima e minima disponibilità di punti di ricarica, come il profilo di potenza elettrica impegnata si appiattisca e si abbassi nella Figura 29 (specie il primo giorno) per effetto della maggiore dispersione dell'utenza nel tempo, con creazione però di tempi di attesa più lunghi. Ossia, una minore disponibilità di colonnine corrisponde ad una minore richiesta in termini di potenza massima da parte della stazione, ma ha come conseguenza un peggioramento del livello di servizio.

Infatti la stazione eroga nei due scenari complessivamente la stessa quantità di energia elettrica (in kWh), poiché serve nella settimana la medesima utenza, ma con una dotazione minore di punti di ricarica per quanto riguarda lo scenario c): le punte massime di impegno di potenza si riducono quindi da circa 500 kW della Figura 27a circa 300 kW della Figura 29.

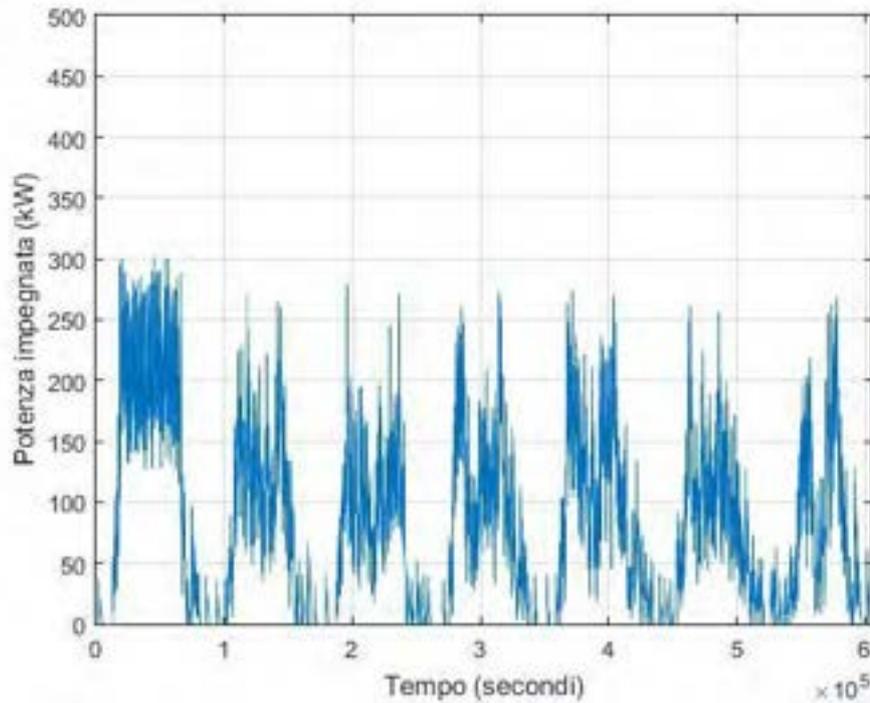


Figura 29: Il profilo di impegno elettrico della stazione #3 per lo scenario c)

Le analisi i cui risultati sono riportati nelle figure appena discusse costituiscono la base della progettazione di una stazione e di uno scenario, per le loro implicazioni demand-side e business-side; l'analisi economica che verrà sviluppata nel prossimo capitolo si avvierà basandosi proprio su questi dati.

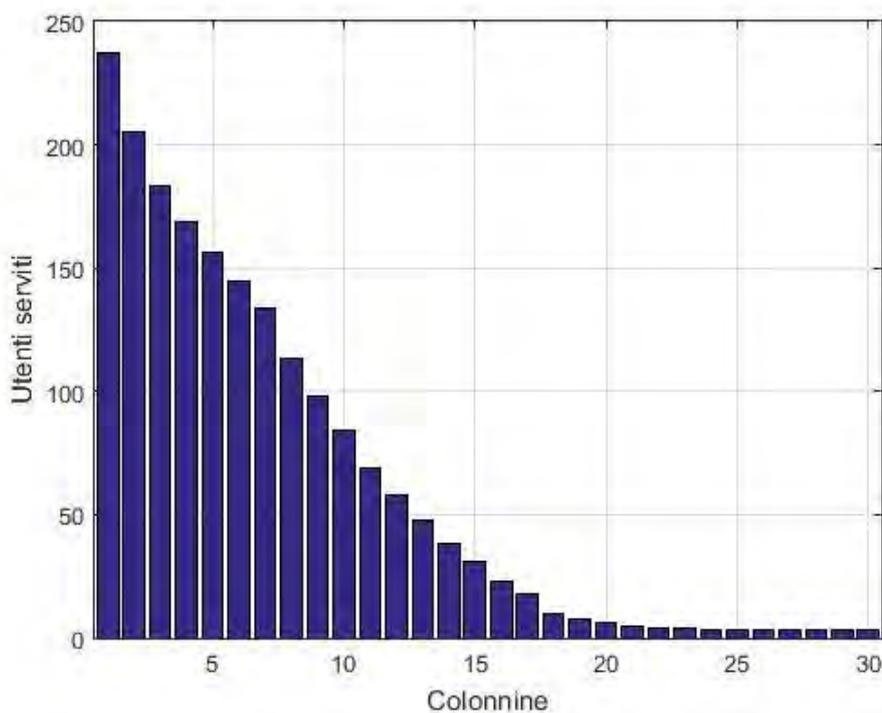


Figura 30: Distribuzione dell'utenza fra le 30 colonnine della stazione #3, scenario a)

Infine in Figura 30 e fig. Figura 31 vengono presentati sotto forma di diagrammi a barre i profili di servizio per ciascuna colonnina della stazione #3 nei due scenari contrapposti, scenario a) e scenario c); le barre rappresentano il numero di utenti serviti durante la settimana su ogni punto di ricarica.

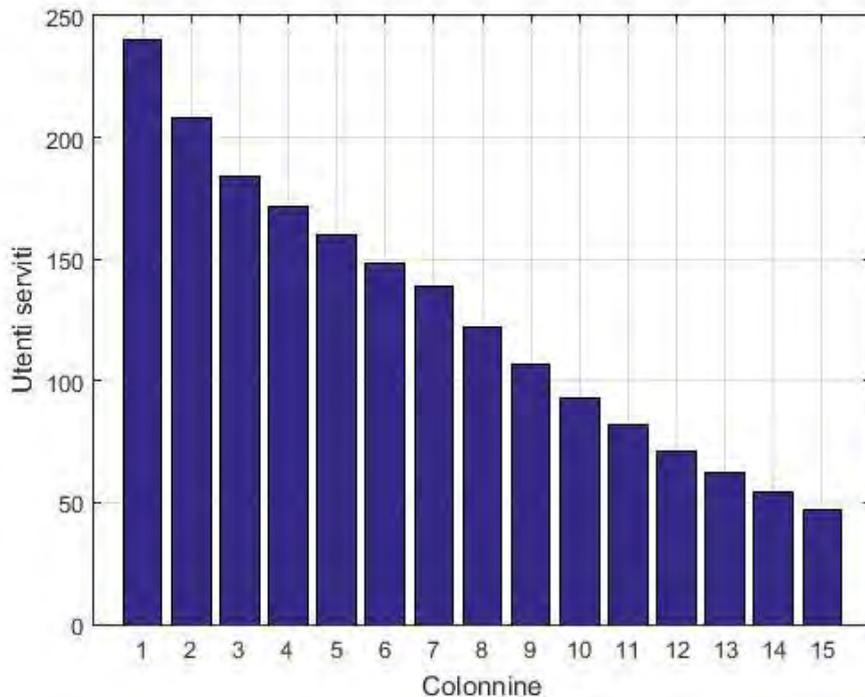


Figura 31: Distribuzione dell'utenza fra le 15 colonnine della stazione #3, scenario c)

Per effetto della redistribuzione dell'utenza passando dallo scenario sovradimensionato a quello sottodimensionato, alcuni utenti passano da una stazione all'altra delle 3 disponibili, ma i numeri complessivi non sono molto diversi.

Infatti risultano:

- 1867 utenti serviti durante la settimana dalla stazione #3 nello scenario a);
- 1889 utenti serviti durante la settimana dalla stazione #3 nello scenario c).

I valori medi di utenti per colonnina risultano però molto diversi:

- Nello scenario a) si ha un valore medio di $1867/30 = 62.23$ utenti nella settimana;
- Nello scenario c) si ha un valore medio di $1889/15 = 125.93$ utenti nella settimana

e questo influisce sul livello del servizio offerto, elemento di cui si deve tenere conto nella progettazione di una stazione di servizio.

3. Confronto della convenienza economica tra una stazione di ricarica rifornita solo dalla rete e una stazione di ricarica ibrida rete-accumulo stazionario

Nei paragrafi precedenti è stata investigata la richiesta energetica e di potenza istantanee di tre stazioni di servizio per la ricarica rapida in un'area urbana di Roma per alcuni scenari predefiniti. In questo capitolo

indagheremo la economicità della stazione di ricarica tenendo conto della richiesta energetica che la stazione fa alla rete. In realtà, il ricorso alla sola rete elettrica non è l'unica via percorribile e potrebbe essere interessante indagare la convenienza economica di soluzioni ibride che integrino dei sistemi di accumulo stazionari. L'utilizzo di sistemi di accumulo stazionari è oggi tra le opzioni della ricerca maggiormente esplorate tra le varie soluzioni per la rete elettrica. Infatti, i sistemi di accumulo stazionari sono in grado di fornire alla rete un servizio fondamentale, il così detto peak shaving, che consentirebbe di migliorare le prestazioni della rete stessa grazie al livellamento della domanda di potenza, realizzata con l'assorbimento della produzione intermittente dell'energia generata dalle fonti rinnovabili, con il prelievo dell'elettricità nei momenti di bassa domanda e anche supportando la potenza e l'assorbimento di energia nei punti di ricarica dei veicoli elettrici e nei momenti di maggiore richiesta.

Dal punto di vista dell'investitore, i vantaggi prodotti da tali sistemi consisterebbero nel potenziale riconoscimento economico del servizio reso alla rete, nel potenziale abbattimento dei costi legati alla minore potenza impegnata ed eventualmente nel minore costo del kWh prelevato, a fronte, dall'altro lato, di un investimento iniziale legato all'accumulo stazionario stesso.

Data l'eterogeneità del panorama attuale relativo alle tecnologie degli accumuli elettrochimici, risulta complesso esplorare tutte le possibili soluzioni percorribili nella progettazione di un sistema di accumulo. Tuttavia, osservando il mercato e l'orientamento dell'industria, appare chiaro che la direzione oggi sia prevalentemente indirizzata verso le batterie al litio. Ovviamente, anche la chimica basata sul litio non è esente da problemi etici e di impatto ambientale e avendone consapevolezza, le industrie si stanno attrezzando per trovare sistemi di riciclo e/o riuso e allo stesso tempo stanno strutturando i processi di produzione e assemblaggio in modo tale da facilitare il successivo recupero delle varie sostanze. Attualmente il litio non è riciclabile, quindi l'unica via percorribile sarebbe quella del riuso. In particolare, per quanto riguarda le batterie giunte alla condizione di fine vita per le applicazioni automobilistiche e di trazione, il riuso favorirebbe l'ampliamento dell'impiego nei sistemi di accumulo stazionari, poiché le batterie in second life sono adatte ad utilizzi nella quale è richiesta poca potenza. Ci si aspetta comunque che i sistemi di accumulo stazionario, soprattutto in un primo momento, saranno realizzati con un mix di tecnologie, di cui alcune di riuso ed altre nuove. La scelta dipenderà dal vantaggio economico che l'accumulo sarà in grado di generare nel tempo, quindi, dall'economicità del costo del kWh stoccato.

Gli accumuli stazionari, rispetto ad altre applicazioni, sono sottoposti a cicli di lavoro meno onerosi. Inoltre il peso e le dimensioni del sistema di accumulo hanno sicuramente un'importanza molto più contenuta rispetto ad altre applicazioni, come ad esempio per i veicoli, dove quelle stesse caratteristiche sono vincolanti nella realizzazione del sistema. A questo si va ad aggiungere il minor costo della batteria second life per kWh rispetto alle batterie nuove. Per questo, il riuso delle batterie al litio potrebbe essere vantaggioso, ma molto dipenderà da quanto scenderà il loro prezzo e dal costo della rigenerazione del pacco batteria usato, compresa la facilità di estrazione delle singole celle e la loro capacità residua. Quest'ultima, in particolare, inciderà sulla durata del ciclo di vita¹ delle batterie second life, determinando la convenienza economica o meno della scelta rispetto all'acquisto di uno storage composto da celle nuove. Un recente studio [3] recensisce gli elementi in grado di garantire il riutilizzo di un sistema di accumulo, quali la vita utile residua pari a cinque anni, l'assenza di danni particolari, l'elevata capacità residua, la presenza di una garanzia a copertura del secondo uso all'esterno dei veicoli e un assemblaggio studiato per facilitare le operazioni di recupero, rigenerazione e reimpiego dei dispositivi. Lo stesso studio stima il costo sia per le nuove batterie sia per quelle second life. Per le prime, il valore sarebbe pari a circa 230-300\$/kWh, al quale occorrerebbe aggiungere un costo ad alta intensità di lavoro di 600-700 \$/kWh per assemblaggio del sistema di accumulo stazionario, ottenendo un totale di 1.000 \$/kWh. Per le batterie al

¹ Diversi studi (NREL, BNEF) stimano che la durata delle batterie al litio *second life* possa essere di dieci anni.

litio usate e rigenerate, il prezzo sarebbe pari a un terzo di quelle nuove, destinato a scendere ulteriormente fino a 50 \$/kWh nel 2018 e a 26 \$/kWh nel 2025. Il costo dell'assemblaggio è previsto in netto declino ed entro brevissimo termine si assesterebbe intorno ai 400 \$/kWh, portando il costo complessivo dell'accumulo stazionario con batterie second life a costare circa 426-500 \$/kWh. Il vantaggio dell'accumulo stazionario quindi dipenderà dalla variazione dei costi delle materie prime e dalle economie di scala nei processi di rigenerazione e assemblaggio delle batterie in riuso. In Tabella 3 sono presentati alcuni scenari possibili, che sono stati ordinati in modo decrescente rispetto al costo complessivo del sistema di accumulo, insieme alle ipotesi di base per le singole voci che li compongono.

Tabella 3: Ipotesi di scenario per i prezzi dei sistemi di accumulo stazionario nuovi e di riuso fino al 2020

	Scen_1	Scen_2	Scen_5	Scen_3	Scen_4	Scen_6	Scen_7	Scen_8
	Celle nuove			Celle second life				
	\$/kWh			\$/kWh				
Celle	300	230	230	100	100	100	50	26
Assemblaggio	700	600	400	700	600	400	400	400
Sistema	1.000	830	630	800	700	500	450	426

Al fine di valutare l'opportunità di integrare un accumulo stazionario nelle stazioni di ricarica, si è ritenuto utile verificare l'esistenza di un potenziale beneficio, in funzione delle sole voci economiche discriminanti, distinguendo tra i maggiori ed i minori costi d'investimento e di gestione operativa che l'operazione genererebbe. Si considera non rilevante il maggior consumo di energia legato all'efficienza dell'accumulo stazionario. La valutazione viene fatta su un periodo di dieci anni, corrispondente alla durata di un investimento di medio-lungo termine e alla durata media prevista per le batterie *second life* al litio. Il tasso di sconto scelto è pari all'8%.

Ponendo come incognito il costo dell'accumulo stazionario, è stato calcolato il valore tale per cui la realizzazione del sistema stesso è indifferente rispetto al ricorso alla sola rete. Da qui sono poi derivabili tutti i valori per i quali esiste o meno la convenienza ad investire in un accumulo stazionario e se la scelta dello stesso debba ricadere su un sistema costruito con batterie riutilizzate oppure nuove.

Il valore tale per cui vi è indifferenza all'investimento aggiuntivo sarà pari alla differenza dei vantaggi e svantaggi economici che lo stesso genera. In particolare, dal lato degli investimenti, il costo discriminante risparmiato viene contabilizzato in base a due elementi: sui dispositivi di gestione della potenza di ricarica della stazione dal lato rete elettrica (inverter/caricabatteria) stimato pari a 500 €/kW e sulla voce "potenza" del contributo previsto per la realizzazione delle connessioni stabili alla rete in Media Tensione (MT) pari a 55,4 €/kW. Ritenendo infatti che la connessione alla rete dovrà comunque essere realizzata, le altre voci, a titolo di contributo, saranno considerate come invarianti. Dal lato della gestione operativa, il vantaggio è dato dal risparmio del costo annuale nella bolletta elettrica relativo alla voce della potenza impegnata, pari a 30,64 €/kW, attualizzato per il periodo di dieci anni sopra richiamato. I dati sono riassunti nella Tabella 4.

Tabella 4: Voci di costo risparmiabili

Risparmio su Investimento			Risparmio lato gestione	
Inverter/caricabatteria lato rete	Contributo voce "Potenza" connessione MT		Tariffa "potenza" MT tra 100 e 500 kW	
500 €/kW	55,4 €/kW		30,64 €/kW	

Le voci di costo considerate, invece, riguarderanno l'accumulo stazionario, dal lato degli investimenti in conto capitale, e la manutenzione dello stesso, per i costi annuali di parte corrente. Queste due voci sono due incognite. Inoltre il costo della manutenzione è parametrizzato in termini percentuali al costo delle celle e pari a circa il 3% di questo.

Alle sole voci della gestione operativa dovrà essere applicato il fattore di attualizzazione come indicato nella formula (5), relativo ad un pagamento unitario annuo posticipato immediato di durata n anni, valutato secondo il regime dell'interesse composto.

$$a_{n-i} = \frac{(1-(1+i)^{-n})}{i} \quad (5)$$

dove

- i = tasso di attualizzazione (8%)
- n = periodi di attualizzazione (10 anni).

Sostituendo con i valori, il fattore di attualizzazione (f_a) sarà:

$$f_a = \frac{(1-(1+0,08)^{-10})}{0,08} = 6,71 \quad (6)$$

Partendo dai costi noti risparmiabili, attraverso una semplice equazione, deriviamo i termini ignoti relativi al costo dell'accumulo (CI) e della sua manutenzione (CG1) quest'ultima posta uguale alla (7)

$$CG1 = CI * m * f_a \quad (7)$$

Dove:

- CG1 = Costo attualizzato della gestione relativo alla manutenzione dell'accumulo stazionario [incognita]
- CI = Costo di investimento dell'accumulo stazionario [incognita]
- m = quota del costo di manutenzione sul costo dell'accumulo stazionario [3%]

L'equazione di bilancio fra costi e risparmi è indicata dalla (8)

$$CI + CG1 = IR1 + IR2 + GR1 * f_a \quad (8)$$

Dove

- IR1 = Investimento risparmiato relativo all'Inverter/caricabatteria lato rete [500 €/kW]
- IR2 = Investimento risparmiato relativo al contributo voce "Potenza" connessione MT [55,4 €/kW]
- GR1 = Costo di gestione risparmiato relativo alla tariffa "potenza" MT tra 100 e 500 kW [30,64 €/kW]

Sostituendo nella (8) i valori noti (Tabella 4) e semplificando, si ottiene la (9)

$$CI * (1 + 0,2013) = 500 + 55,4 + 30,64 * 6,71 \quad (9)$$

Complessivamente, il valore tale per cui i costi aggiuntivi equivalgono ai potenziali risparmi, rendendo indifferente l'investimento è pari a 761 € e con le formule seguenti viene calcolato esplicitamente il valore marginale a kW dell'accumulo stazionario (10) e il costo marginale attualizzato della manutenzione (11) e (12).

$$CI = \frac{761}{(1,2013)} = 633 \text{ [€/kW]} \quad (10)$$

$$CG1 = 633 * 3\% * 6,71 = 128 \quad (11)$$

$$CG1 = 761 - 633 = 128 \quad (12)$$

Sulla base dei prezzi attualmente stimati per le batterie al litio-ione nuove o second life, come visti precedentemente, e sulla base delle caratteristiche tecnologiche delle stesse, come indicate nella Tabella 5 seguente, sono stati calcolati i prezzi corrispondenti espressi in termini di €/kW omogeneizzando le grandezze economiche per renderle confrontabili. Il tasso di cambio utilizzato è pari a 0,85 Euro/Dollaro. Come mostra la Tabella 6, i prezzi sono nettamente superiori rispetto al valore capitale (633 €/kW) che rende indifferente l'investimento nell'accumulo stazionario, evidenziando la non convenienza attuale e, in prospettiva, nel breve periodo dell'adozione di un sistema di accumulo stazionario.

Tabella 5: Caratteristiche delle batterie litio-ione

	Densità di potenza gravimetrica	Densità energetica gravimetrica
	w/kg	Wh/kg
Celle	720	168
Sistema	480	126

Fonte: Technology Roadmap Energy storage for Electric mobility 2030 (Fraunhofer ISI)

Tabella 6: Scenari di prezzi in termini di €/kWh e €/kW dei sistemi di accumuli stazionari

	Scen_1		Scen_2		Scen_3		Scen_4		Scen_5		Scen_6		Scen_7		Scen_8	
	€/kWh	€/kW														
Celle	255	1.093	196	838	85	364	85	364	196	838	85	364	43	182	22	95
Assemblaggio	595	2.145	510	1.850	595	2.226	510	1.902	340	1.202	340	1.255	340	1.275	340	1.285
Sistema	850	3.238	706	2.688	680	2.590	595	2.267	536	2.040	425	1.619	383	1.457	362	1.379

Ipotizzando una riduzione nel tempo del prezzo del sistema di accumulo, come mostrato nel grafico di Figura 32, tale per cui si giunga ad uguagliare il valore di indifferenza sopra stimato per il sistema stesso e pari a 633 €/kW, la tabella seguente mostra quale dovrebbe essere il rispettivo prezzo espresso in termini di €/kWh e \$/kWh nei diversi scenari prospettici. Tale uguaglianza si verifica nello scenario 12 per un prezzo del sistema di accumulo finito pari a 196 \$/kWh oppure 166 €/kWh.

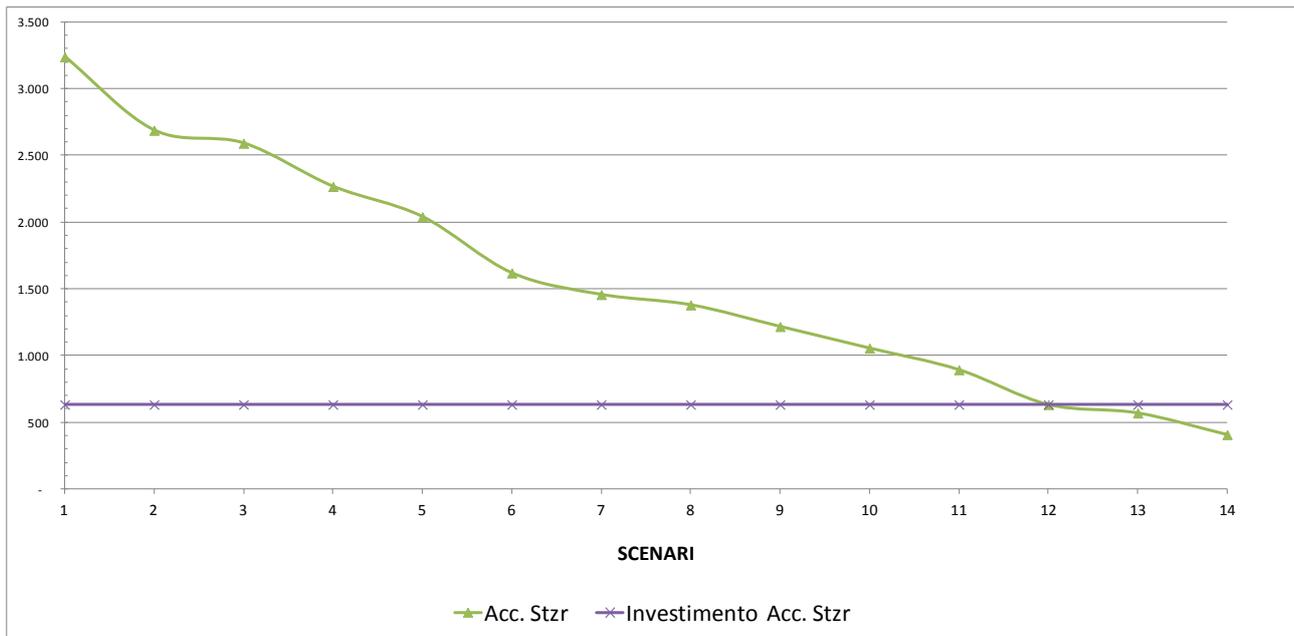


Figura 32: confronto tra i risparmi e costi aggiuntivi generati dall'accumulo stazionario

Tabella 7: Valori di prezzo per il sistema di accumulo nei vari scenari prospettici

Sistema di accumulo stazionario			
	€/kW	€/kWh	\$/kWh
Scen_9	1.218	320	376
Scen_10	1.056	277	326
Scen_11	894	235	276
Scen_12	633	166	196
Scen_13	570	150	176
Scen_14	408	107	126

Conclusioni

Nel report è stato illustrato un approccio per la valutazione della taglia energetica di una stazione di ricarica. L'analisi si basa sui risultati ottenuti in precedenza riguardanti l'affluenza istantanea alle stazioni di ricarica in un'area urbana di Roma. Questi risultati erano stati ottenuti analizzando i dati di traffico reale, rilevati da opportuni dispositivi a bordo che inviano alcune informazioni quali posizione, velocità, tempo, distanza percorsa ad un database centrale. I dati vengono registrati ogni due chilometri o ogni 30 secondi. Dato uno scenario per le stazioni di ricarica che fissa il numero di punti di ricarica e la loro distribuzione fra le stazioni e avendo a disposizione l'affluenza istantanea di auto ad ogni punto di ricarica di ciascuna stazione possiamo calcolare l'assorbimento massimo, minimo, medio e istantaneo di ogni punto di ricarica e quindi anche della stazione. Per fare questo, occorre avere il profilo di ricarica delle auto quando si connettono alla rete.

Il profilo di ricarica dipende dallo stato di carica della batteria al momento dell'inizio della ricarica. Questi profili sono stati estrapolati da un vasto set di dati relativi alla batteria di una Nissan Leaf, ottenuti da una vasta campagna di misure realizzata dall'ENEA sui consumi reali di un'auto elettrica utilizzata su strada, durante la quale sono state monitorate anche le fasi di ricarica, sia standard che rapida. I dati relativi alla ricarica rapida sono stati registrati per vari valori iniziali dello stato di carica. In questo modo, si è ottenute delle curve che descrivono l'assorbimento di potenza al variare del tempo da parte della batteria per differenti condizioni iniziali. Poiché dai dati OctoTelematics conosciamo la percorrenza delle auto prima della ricarica, ipotizzando che le auto inizino il loro percorso con batteria completamente carica, conosciamo il livello di carica della batteria al momento della ricarica. Utilizzando i dati dell'assorbimento ottenuti per la Leaf (che rappresenta un'auto elettrica di media grandezza) e interpolando questi risultati possiamo ottenere il profilo di assorbimento per i punti di ricarica e quindi l'impegno energetico di ciascuna presa per un dato scenario. Analizzando questi dati e incrociandoli con quelli del livello di servizio fornito da ciascuno scenario (vedi report [1]), l'investitore può simulare degli scenari che gli permettano di decidere quale combinazione sia la più conveniente.

È stato inoltre valutata dal punto di vista della convenienza economica l'ipotesi di utilizzare un sistema di accumulo stazionario per livellare i picchi di richiesta di potenza di una stazione di ricarica. I risultati mostrano che al momento non risulta conveniente adottare un sistema di accumulo stazionario a batterie litio-ione, né nuove né in second life. Perché l'investimento sia conveniente il prezzo del sistema di accumulo finito deve essere uguale o inferiore a 166 €/kWh.

Bibliografia

[1] N. Andrenacci, A. Genovese, R. Ragona, "Sviluppo di un simulatore comportamentale per la valutazione dei livelli di servizio di una struttura di ricarica elettrica di zona", Report di Ricerca di Sistema Elettrico PAR 2015, Report RdS/PAR2015/ 210

[2] *Curve Fitting Toolbox*, Matlab, <https://www.mathworks.com/products/curvefitting.html>

[3] Bloomberg New Energy Finance (BNEF) "Forecast of gross second life battery availability", 2016