POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Energia

Corso di laurea in Ingegneria Elettrica

Tesi Magistrale

Le nuove frontiere dello smart charging

Implementazione del sistema per la ricarica elettrica intelligente.

Relatore:
prof. Spertino Filippo

Candidato:
Barisone Paolo

Tutor Aziendale
e-distribuzione
Dott. Valentinetti Tiziano

Luglio 2017

…

…
…

Sommario

Questo lavoro mette in evidenza alcune problematiche legate agli algoritmi di SmartCharging di tipo Event-drinven aggiornati in tempo reale tramite sistemi ICT. In particolare le problematiche affrontate sono il fattore di potenza non unitario, l'errore sulla corrente assorbita, l'errore sulla lettura dei dati e gli eventuali errori introdotti nelle trasformazioni dalla potenza al valore di PWM. Per ogni problema viene suggerita una possibile soluzione e viene testata prendendo in considerazione due veicoli. Alcune implementazioni sono state già introdotte altre sono state solo teste ma verranno implementate a breve.

This abstract highlights some features of Event-driven SmartCharging algorithms updated in real-time through ICT systems. Specifically, this study investigates problems related to non-unity power factor, the error on the assessment of absorbed current, the data-reading error and other possible errors introduced by power passage- PWM value. For each problem,a solution has been suggested and tested considering 2 vehicles. Some of these implementations have already been introduced, other ones have been preliminarily tested and will be implemented shortly.

Indice

Sommario III

1 Introduzione 1

2 La nascita delle smart grid 3
2.1 Il cambiamento della produzione di energia elettrica nei secoli 3
2.1.1 L'impatto ambientale dell'attività umana 5
2.1.2 I protocolli d'intesa per la riduzione di gas serra e l'importanza del rinnovabile [19] 7
2.1.3 Piano per il futuro 15
2.2 Nuovo paradigma della rete elettrica 16
2.2.1 Una nuova configurazione di rete 16
2.2.2 Da tradizionale a smart 21

3 Stato dell'arte delle ricariche elettriche 24
3.1 Nascita dell'infrastruttura e modelli di Business 24
3.2 Veicoli Elettrici 27
3.2.1 Veicoli elettrici a batteria 29
3.3 Infrastrutture di ricarica 36
3.3.1 Colonnine con tecnologia Enel 38
3.4 Connettori 42

4 La visione della mobilità elettrica in Enel 49
4.1 Progetti 51
4.1.1 Accordi con altri distributori ed enti locali 53
4.1.2 Accordi con le aziende 54
4.1.3 Accordi con le case automobilistiche 55
4.1.4 Estero 55
4.1.5 Progetti futuri 55
4.2 Electrical Mobility Management System 56

5 Smart Charging 60
5.1 Impatto sulla rete dei veicoli elettrici 60
5.2 Algoritmi di Smart Charging 62

5.3 Struttura di Smart Charging Mobincity 64
5.4 Metodologia α 70
5.5 Risultati ottenuti primi test 77
5.5.1 Veicolo A 77
5.5.2 Veicolo B 84

6 La nuova generazione di ricariche "smart" 89
6.1 Problematiche riscontrate 89
6.1.1 Errore sulla stima del rendimento 90
6.1.2 Errore sul comportamento al fine ricarica 91
6.1.3 Errore di disallineamento della tensione di EMM e la rete 91
6.1.4 Errore sul fattore di potenza non unitario 91
6.1.5 Errore sulla corrente assorbita 92
6.1.6 Errore sulla lettura dei dati 93
6.2 Possible soluzione 93
6.2.1 Soluzione per l'errrore sul rendimento 93
6.2.2 Per errore di potenza durante la durante la fase a corrente costante . 93
6.2.3 Soluzione per l'errore sulla potenza massima al fine ricarica 94
6.2.4 Soluzione per l'errore sulla lettura dei dati reali 96

7 Implementazione della soluzione 97
7.1 Metodologia β 97
7.2 Veicolo A 99
7.2.1 Modello 103
7.2.2 Costruzione del blocco pre-distorsore 106
7.2.3 Rendimento 108
7.2.4 Valutazioni fine ricarica 110
7.3 Veicolo B 112
7.3.1 Modello 115
7.3.2 Costruzione del blocco pre-distorsore 118
7.3.3 Rendimento 119
7.3.4 Valutazioni fine ricarica 121

8 Controllo della soluzione implementata 124
8.1 Nuovo applicativo 124
8.2 Nuove ricariche 126
8.2.1 Nuova ricarica veicolo A 126
8.2.2 Nuova ricarica veicolo B 129

9 Conclusioni 134

A Norma 61851 136
A.1 Tabelle circuito pilota di controllo 137
A.2 Sequenze dei passaggi di stato del circuito pilota di controllo 140
A.3 Tabella di conversione PWM 152
A.4 Tabella delle resistenze per codifica corrente 154

Riferimenti bibliografici 159

Elenco delle figure

2.1 Quantità di energia elettrica dal 1963 al 2013 in italia per tipologia [15] . . 4
2.2 Percentuale della tipologia di generazione utilizzata in italia dal 1990 al 2013 5
2.3 I gas serra devono il loro nome al comportamento da "barriera" nei confronti delle radiazioni solari, provocando un surriscaldamento della crosta, proprio come il principio delle serre agricole [22] 6
2.4 Ghiacciaio del Perito Moreno in Argentina che si sta rapidamente sciogliendo 7
2.5 Risparmio atteso per settore di uso finale[19] 9
2.6 Gli obiettivi nei tre settori - PAN vs. SEN 11
2.7 Benefici attesi nella bolletta elettrica 15
2.8 La trasformazione della rete: da tradizionale a smart 16
2.9 Capacità elettrica installata e prodotta 17
2.10 Esempio di flusso inverso di corrente a Marzo 2010 e 2013 in Puglia 18
2.11 Contributo dei generatori alla corrente di cortocircuito 19
2.12 Selettività delle protezioni in presenza di generazione distribuita 19
2.13 Regolazione in tensione a compensazione 20
2.14 Esempio di formazione di un'isola 20
2.15 Variazione della curva di tensione in presenza di un punto di generazione lungo la linea 21

3.1 Struttura di ricarica e componenti veicolo [49] 30
3.2 Confronto tra diverse tipologie di accumulo elettrico [38] 33
3.3 Andamento della tensione e della corrente quando è applicato un controllo corrente-costante seguito da uno a tensione costante (CC-CV) 34
3.4 Carica e scarica della batteria a diversi valori di corrente [48] 35
3.5 Relazione tensione a vuoto (OVC) e SOC [48] 35
3.6 Struttura di collegamento veicolo colonnina 38
3.7 Box-station 39
3.8 Pole 40
3.9 Stazione di ricarica rapida 43 kW 41
3.10 Stazione di ricarica Multistandard 41
3.11 Schema del circuito equivalente per rilevazione di prossimità e codifica di corrente [28] 45
3.12 Schema equivalente del circuito pilota di controllo [28] 47

4.1 Tre sistemi di interfaccia delle colonnine Enel [46] 50
4.2 Struttura Advanced Management System 53
4.3 EMM business model [21] 57

5.1 Previsione di assorbimento residenziale con diversi tipi di ricarica ([43]) . . 61
5.2 Assorbimento maggiore di potenza sulla rete dovuto ai veicoli ([44]) 61
5.3 Confronto tra ricarica incontrollata e ricarica intelligente ([50]) 63
5.4 Sequenza degli eventi 66
5.5 Richiesta di ricarica utente e fase incontrollata di ricarica 67
5.6 Sequenza del servizio di 'meter reading' e 'scheduling' 67
5.7 Struttura del circuito di acquisizione dati di tensione e corrente 73
5.8 Start remote charge con smart chraging 74
5.9 Andamento della curva target, $P_{cumputed}$ e $P_{erogata}$ test 1 A 77
5.10 Andamento dell'errore di corrente e SOC_{reale} test 1 A 78
5.11 Assorbimento di corrente e $Cos\varphi$ test 1 A 79
5.12 Andamento PWM e $Cos\varphi$ test 1 A 79
5.13 Andamento $SOC_{teorico}$ e SOC_{ca} test 1 A 80
5.14 Andamento del SOC_{reale} e $SOC_{teorico}$ test 1 A 81
5.15 Andamento della curva target, $P_{cumputed}$ e $P_{erogata}$ test 2 A 81
5.16 Andamento dell'errore di corrente e SOC_{reale} test 2 A 82
5.17 Andamento PWM e $Cos\varphi$ test 2 A 83
5.18 Andamento $SOC_{teorico}$ e SOC_{ca} test 2 A 83
5.19 Andamento della curva target, $P_{cumputed}$ e $P_{erogata}$ test 1 B 84
5.20 Andamento dell'errore di corrente e SOC_{reale} test 1B 85
5.21 Andamento PWM e $Cos\varphi$ test 1 B 85
5.22 Andamento $SOC_{teorico}$ e SOC_{ca} test 1 B 86
5.23 Andamento del SOC_{reale} e del $SOC_{teorico}$ test 1 B 86
5.24 Andamento della curva target, $P_{cumputed}$ e $P_{erogata}$ test 2 B 87
5.25 Andamento dell'errore di corrente e SOC_{reale} test 2 B 88
5.26 Andamento del $SOC_{teorico}$ e del SOC_{ca} test 2 B 88

6.1 Andamento dell'errore di potenza introdotto dalle trasformazioni del centro e limitazione della colonnina 92
6.2 Profili di ricarica a diverse correnti ([38]) 95

7.1 Profilo di ricarica con andamento reattivo veicolo A 99
7.2 Andamento dell' errore di corrente e PWM 100
7.3 Distribuzione dell'errore di corrente 101
7.4 Distribuzione dei valori di $Cos\varphi$ per un PWM di 24% 101
7.5 Andamento del valore di $Cos\varphi$ e linea di tendenza 103
7.6 Confronto tra il modello e la potenza reale assorbita dal veicolo 105
7.7 Confronto tra il modello e la potenza reale assorbita dal veicolo 105
7.8 Errore atteso tra $P_{computed}$ e P_{attesa} 106
7.9 Confronto tra la P_{attesa} e $P_{computed}$ con il blocco pre-distorsore 108

7.10 Andamento del SOC_{reale} e $SOC_{nuovorend}$ veicolo A 109
7.11 Confronto del rendimento reale della ricarica e di quello in ChargeAdvaisor nelle diverse prove 109
7.12 Andamento della potenza assorbita e del SOC_{reale} con ricarica alla massima potenza 110
7.13 Andamento della potenza assorbita e del SOC_{reale} con ricarica con profilo di potenza media 111
7.14 Inizo controllo di tensione 111
7.15 Assenza dell'intervento del controllo di tensione 112
7.16 Andamento dell'errore di corrente in funzione del PWM 113
7.17 Distribuzione dell'errore di corrente 113
7.18 Andamento del $Cos\varphi$ in funzione del PWM e linea di tendenza 115
7.19 Confronto tra modello e comportamento reale 117
7.20 Andamento dell'errore P_{attesa} e $P_{computed}$ in funzione della $P_{computed}$ 117
7.21 Andamento dell'errore tra P_{attesa} $P_{computed}$ 119
7.22 Andamento SOC_{reale} e del $SOC_{nuovorend}$ 120
7.23 Confronto tra il rendimento della ricarica e quello in ChargeAdvaisor nelle diverse prove 120
7.24 Andamento della ricarica con $P_{computed}$ pari a 4 kW 121
7.25 Andamento della ricarica con $P_{computed}$ max a 22 kW 122
7.26 Intervento del controllo al 90% del SOC_{reale} 122
7.27 Intervento del controllo SOC_{reale} 123
7.28 $P_{computed}$ impostata a 8 kW 123

8.1 Andamento della target test con soluzione implementata veicolo A 126
8.2 Andamento della SOC_{reale} e del $SOC_{nuovorendimento}$ 127
8.3 Andamento della SOC_{reale} e del $SOC_{teorico}$ 128
8.4 Andamento $Cos\varphi$ e PWM nuova soluzione 129
8.5 Andamento del rendimento del sistema nelle diverse prove veicolo A 129
8.6 Andamento della target e del rendimento previsto 130
8.7 Andamento del SOC_{reale} e del $SOC_{nuovorendimento}$ 131
8.8 Andamento del SOC_{reale} e del $SOC_{teorico}$ 132
8.9 Andamento del $Cos\varphi$ e del PWM nella nuova soluzione 132
8.10 Andamento del rendimento del sistema nelle diverse prove veicolo B 133

Elenco delle tabelle

7.1 Tabella PWM A 102
7.2 Tabella veicoloA 104
7.3 Pre-distorsore veicolo A 107
7.4 Tabella PWM B 114
7.5 Tabella veicoloB 116
7.6 Pre-distorsore veicolo B 119

A.1 Parametri e valori del circuito pilota di controllo per l'apparecchiatura di alimentazione 138
A.2 Parametri e valori del circuito pilota di controllo per il veicolo elettrico . . . 139
A.3 Conversione corrente PWM infrastruttura di ricarica e Auto 153
A.4 Resistenza di codifica corrente per plug e connettore veicolo 155
A.5 Valori normali di Itr, Iref e In 156
A.6 Campi di corrente 156
A.7 Limiti di errore percentuale nelle condizioni di riferimento (contatori monofase e contatori polifase con carichi bilanciati) 156
A.8 Limiti dell'errore percentuale addizionale dovuto alle grandezze di influenza (contatori monofase e contatori polifase con carichi bilanciati) 157
A.9 Tabella veicoloA 158

Capitolo 1

Introduzione

Il settore automobilistico rappresenta uno dei settori di maggior spicco nell'economia mondiale collocandosi al terzo posto per ricavi dopo il settore energetico e quello dell'elettronica.
Secondo recenti studi, nel mondo ci sarebbero circa un miliardo e 200 milioni di automezzi immatricolati, uno ogni 7 abitanti. L'espandersi del mercato automobilistico anche nei Paesi in via di sviluppo altamente popolati quali Cina, India e Brasile, ha determinato il raddoppio degli automezzi circolanti negli ultimi 25 anni e fa ritenere che il numero sia certamente destinato a salire; per il 2035 è stimato un parco macchine di 2 miliardi di mezzi e nel 2050 si prevede ne circoleranno circa 5 miliardi.
Una politica di salvaguardia ambientale e di riduzione delle emissioni di gas serra, non più portata avanti solo dagli ambientalisti, ma imposte da protocolli e Governi, la ricerca di fonti energetiche alternative da applicare al settore dei trasporti è diventata la sfida primaria.
In questa ottica, l'elettrificazione dei trasporti viene vista come una possibile soluzione reale sia ai problemi legati all'utilizzo di carburanti derivati dal petrolio che a quelli ambientali, soprattutto puntando su una produzione di energia elettrica pulita, generata da fonti rinnovabili.
Mentre la produzione di energia da fonti rinnovabili ha raggiunto ottimi risultati, la diffusione delle auto elettriche è ancora marginale per motivi legati al prezzo di acquisto, ai costi delle batterie e all'assenza di un'adeguata rete di punti di ricarica. Incentivi statali per l'acquisto, riduzione dei costi per le batterie, sviluppo di infrastrutture di supporto efficienti ma soprattutto l 'e-mobility in ottica di business auto-sostenibile, permetteranno di registrare quell'incremento del numero di auto elettriche sperato e che permetta una reale diminuzione delle emissioni dei gas serra e dell'inquinamento acustico con conseguente miglioramento della qualità della vita.
E-Distribuzione ha deciso di investire nell'elettrificazione dei trasporti vedendo nella mobilità elettrica una reale soluzione per innovare la gestione della rete e promuovere uno sviluppo green. In particolare la struttura che si ricerca è quella che permetta di armonizzare le esigenze della rete con le richieste del mercato.
Il progetto Mobincity ha sviluppato un sistema di ricarica intelligente che permetta di

considerare i limiti della rete e le richieste del cliente.
Questo lavoro di tesi cerca di ottimizzare e completare la struttura di base già sviluppata da E-distribuzione durante il progetto Mobincity, nel quale viene impiegato un algoritmo di smart charging per la modulazione delle ricariche.
In collaborazione con Ares2T, sono stati testati 2 veicoli con l'attuale struttura di ricarica studiandone i limiti e le potenzialità; attraverso l'impiego dei feedback dal campo e adattando l'analisi dei dati alla struttura dell'algoritmo sviluppato, sono state individuate le criticità del sistema legate all'incapacità di adattarsi alle caratteristiche dei diversi veicoli.
Successivamente sono state apportate delle modifiche al sistema in termine di implementazione dei dati e contemporaneamente sono stati sviluppati due blocchi di pre-distorsione che hanno permesso di eliminare parte delle criticità riscontrate.
Infine il sistema è stato implementato e testato contribuendo ad aumentare l'efficienza del sistema in termini di tempi di ricarica e di affidabilità del sistema.

Capitolo 2

La nascita delle smart grid

Nel corso degli ultimi anni si è passati da una situazione caratterizzata da grandi centrali, concentrate in pochi punti strategici della penisola, ad una forte crescita di generazione distribuita sul territorio. Ciò ha fatto sì che l'infrastruttura elettrica italiana passasse da 'tradizionale' a 'intelligente' ovvero in grado di misurare, interpretare, comunicare e agire in ogni suo punto attraverso la sala di controllo.
Questo cambiamento è conseguenza della forte crescita di generazione distribuita sul territorio rispetto alle grandi centrali concentrate in pochi punti strategici della penisola.

2.1 Il cambiamento della produzione di energia elettrica nei secoli

Con la seconda rivoluzione industriale si sono sviluppate, in Italia e nel mondo, diverse tecniche di generazione primaria per l'alimentazione dei primi impianti elettrici industriali e illuminotecnici. Le prime centrali erano alimentate a carbone, risorsa sempre più utilizzata nei paesi dell'europa centro-settentrionale. Dopo il primo impianto a Milano costruito nel 1883 con motori a vapore alimentati a carbone, in Italia si sviluppò maggiormente l'impianto idroelettrico, essendo il territorio peninsulare naturalmente povero di materie prime fossili e ricc di acqua. In particolare, il primo impianto idroelettrico di un certo rilievo fu quello del Gorzente, realizzato nel 1889, per alimentare stabilimenti industriali nella zona di Genova. L'impianto comprendeva due laghetti artificiali e tre centrali in serie, per una potenza complessiva di 1030 kW. Grazie alla morfologia naturale del territorio, e alle abbondanti acque derivanti dallo scioglimento delle nevi, vennero costruite dighe a serbatoio come la centrale di Entracque (CN) ed impianti ad acqua fluente.
Con il passare del tempo e l'incremento della domanda sull'intero territorio nazionale l'energia viene generata in grandi centrali differenziate per la tipologia di fonte primaria:

- Impianti idroelettrici
  - A serbatoio
  - Ad acqua fluente

  - Con sistema di pompaggio

- Impianti termici
  - Nucleari
  - Carbone, petrolio
  - Gas (ciclo aperto o ciclo combinato)

- Impianti geotermici[1]

A partire dagli anni sessanta a causa di limiti tecnologici e di costi iniziali elevati per gli impianti idroelettrici, l'energia chimica dei combustibili fossili tornò favorita fino a diventare la principale fonte di energia primaria.
Con l'utilizzo delle fonti tradizionali l'italia riuscì a rincorrere la curva di domanda in crescita costante fino al 2008 quando, a causa della crisi economica, la richiesta di energia elettrica invertì il suo andamento restando pressoché costante o in leggera diminuzione. Inoltre, per coprire interamente il fabbisogno nazionale, si intensificarono i collegamenti transfrontalieri per l'acquisto dell'energia dai paesi confinanti, in particolare Francia e Svizzera.

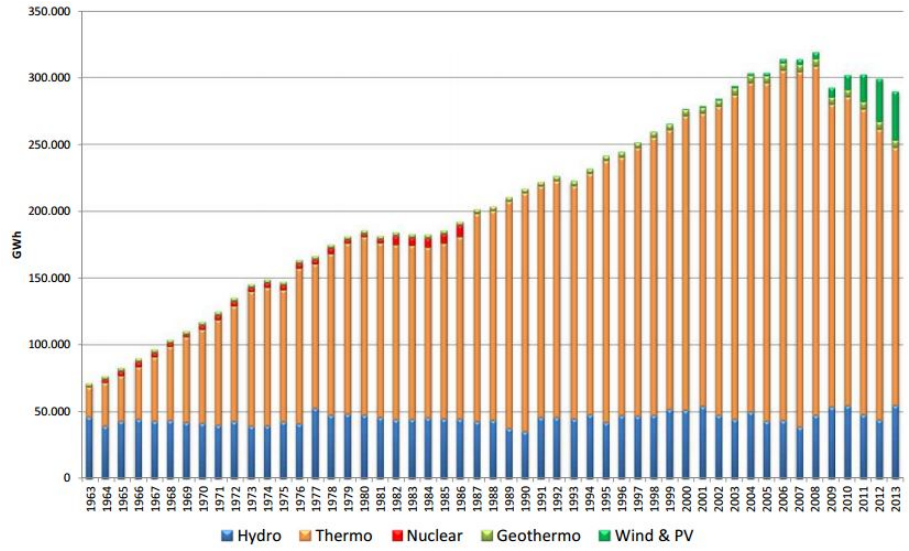


Figura 2.1: Quantità di energia elettrica dal 1963 al 2013 in italia per tipologia [15]

Alla fine degli anni '90, il profilo di domanda sempre più irregolare e il crescente sviluppo di tecnologie alternative, offrì l'ingresso nel panorama produttivo alle energie rinnovabili, le cosiddette RES (Renewable Energy Sources): eolico, termico, fotovoltaico, celle a

[1]Nel 1904 entrò in funzione l'impianto di Larderello, il primo a sfruttare il calore naturale della Terra come fonte di energia per la produzione di elettricità

combustibile, biomassa, geotermia, moto ondoso e maree, ecc. Grazie ai numerosi incentivi in favore dei RES, negli ultimi anni si è registrata una diminuzione della generazione tradizionale in favore del rinnovabile. Questo fenomeno ha portato vantaggi economici, strategico/politici e ambientali. Il costo dell'energia infatti si sta riducendo sempre di più perché la componente variabile, dovuta al consumo della fonte primaria, è considerabile nulla per le fonti rinnovabili, mentre la componente fissa, legata alla realizzazione e alla manutenzione degli impianti, si è ridotta grazie all'adozione di soluzioni tecnologiche sempre meno costose e con rendimenti elevati. Inoltre la variabilità delle fonti primarie utilizzabili permette una strategia politica nella diversificazione e nell'incentivazione di fonti "favorite". Proprio grazie a questa politica incentivante mirata su alcune tipologie rinnovabili, la potenza installata di impianti fotovoltaici è passata da 5 MW a 15 MW tra il 2010 e il 2011 arrivando ad una produzione di energia elettrica di 10 GWh nel 2013.
L'Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico (AEEGSI) riporta che già nel 2015 la produzione italiana da fonti rinnovabili rappresentava il 40% del parco totale di produzione di energia elettrica e tale dato è in continua crescita.

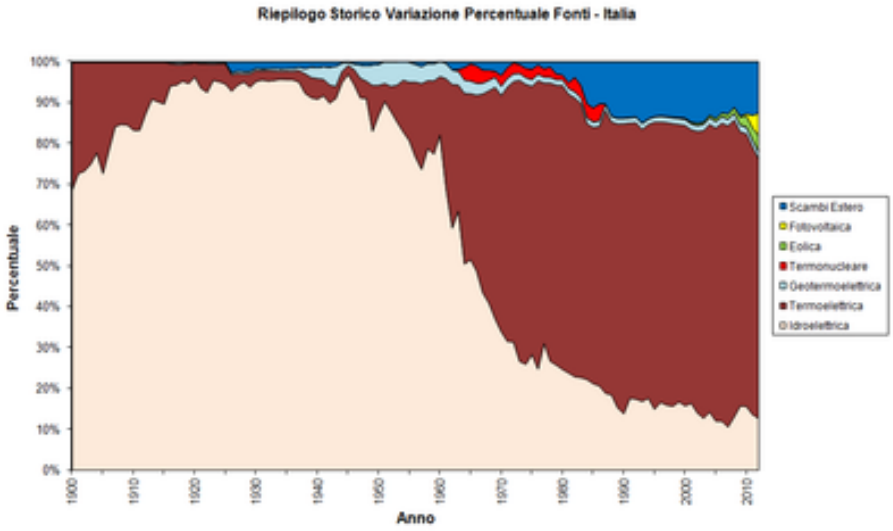


Figura 2.2: Percentuale della tipologia di generazione utilizzata in italia dal 1990 al 2013

In ultimo, ma non meno importante, la crescita della produzione rinnovabile presenta un minor impatto ambientale rispetto alle fonti tradizionali.

2.1.1 L'impatto ambientale dell'attività umana

Dalla metà del XX secolo, grazie alla realizzazione di un sistema di monitoraggio globale, iniziò un'attività sistematica di osservazione del sistema climatico. Questa, unitamente all'attività della paleoclimatologia, scienza che si dedica all'analisi dei fenomeni paleontologici (ghiacciai e fossili) per ricostruire l'andamento del clima nelle epoche passate, ha permesso una valutazione dei cambiamenti climatici nel tempo. I dati raccolti evidenziano

che da sempre la terra è soggetta a mutamenti climatici e che, con l'inizio della rivoluzione industriale, l'attività umana divenuta critica per il mutamento globale: la temperatura atmosferica e degli oceani è in forte crescita, la quantità di neve e ghiaccio continua a ridursi e il livello del mare si è alzato notevolmente. E' stato infatti dimostrato che vi è una relazione diretta tra l'attività umana e l'aumento dei gas a effetto serra nell'atmosfera. Questi gas hanno effetto sull'energia della radiazione solare. Infatti le molecole dei gas serra presenti nell'atmosfera risultano trasparenti alla radiazione solare nella sua lunghezza d'onda standard, ma opache per l'onda riflessa, che è generata dall'incisione della radiazione solare sulla superficie terrestre e che ha una lunghezza d'onda differente. Il risultato è un riscaldamento dell'atmosfera che produce un aumento medio della temperatura terrestre. Tale processo ha permesso lo sviluppo della vita, infatti senza l'atmosfera la temperatura media della terra sarebbe di -20 °C.

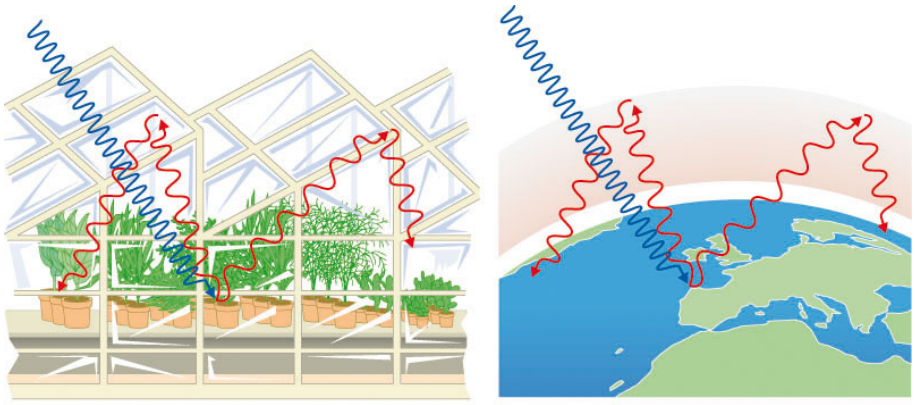


Figura 2.3: I gas serra devono il loro nome al comportamento da "barriera" nei confronti delle radiazioni solari, provocando un surriscaldamento della crosta, proprio come il principio delle serre agricole [22]

I principali gas serra legati alle attività umane sono l'anidride carbonica (CO_2), il metano (CH_4), l'ozono (O_3) e l'ossido di azoto (NO). Oggi la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera ha raggiunto il valore più alto mai registrato negli ultimi 400.000 anni. Le analisi dei carotaggi effettuati sui nuclei di ghiaccio in Groenlandia e in Antartide hanno mostrato che nel passato la concentrazione di biossido di carbonio variava da 190 ppmv fino a 280 ppmv senza mai superarla, ma con l'avvento della I rivoluzione Industriale, questa tendenza è mutata. Nel 1958, quando iniziarono misure sistematiche a livello atmosferico, le emissioni avevano raggiunto i 315 ppmv e oggi sono 370 ppmv, crescendo ad un tasso di 1,5 ppmv all'anno. Si stima che dal 1750 al 2011 siano state emesse nell'atmosfera 555 GtC di emissioni antropogeniche.
Le cause principali vanno ricercate nell'impiego dei combustibili fossili, la deforestazione ed altri cambiamenti di uso del suolo. Le foreste contribuiscono a regolare la CO_2 nell'aria, infatti durante il processo di fotosintesi clorofilliana assorbono anidride carbonica

e rilasciano ossigeno. Come l'anidride carbonica anche il metano oggi ha raggiunto i valori massimi storici. Circa due terzi delle attuali emissioni di metano vengono rilasciate da attività umane come la coltivazione, l'allevamento, l'estrazione del carbone e la movimentazione di gas naturale. Secondo quanto riportato dal rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) del 2007, il riscaldamento globale ha provocato un aumento di 0.74 ± 0.18 °C durante il XX secolo. L'incremento della temperatura media ha ripercussioni disastrose sugli ecosistemi terrestri come lo scioglimento dei ghiacciai e l'innalzamento del livello dei mari. Un effetto si osserva sulla riduzione delle precipitazioni e il conseguente aumento del fenomeno di desertificazione. Il riscaldamento dei mari ha come conseguenza una maggiore produzione di vapore nell'atmosfera: tale incremento dei gas serra caus un ulteriore incremento della temperatura, innescando così un circolo vizioso. Inoltre, l'anidride carbonica prodotta dalle attività umane contribuisce in modo significativo all' aumentato l'acidità degli oceani.

Figura 2.4: Ghiacciaio del Perito Moreno in Argentina che si sta rapidamente sciogliendo

I report dell'IPCC suggeriscono che durante il XXI secolo la temperatura media della Terra potrà aumentare ulteriormente rispetto ai valori attuali, da 1,1 a 6,4 °C in più, a seconda del modello climatico utilizzato e dello scenario di emissione. Per questo diventa sempre più importante la scelta della tipologia di fonte primaria utilizzata per salvaguardare e mantenere il pianeta.

2.1.2 I protocolli d'intesa per la riduzione di gas serra e l'importanza del rinnovabile [19]

Nel 2008 l'Unione europea ha varato il "pacchetto clima energia" anche detto "pacchetto 20-20-20" al fine di predisporre entro il 2020 delle strategie comuni a tutta l'Europa per:

- Ridurre di almeno il 20% entro il 2020 le emissioni di gas serra rispetto ai dati del 1990

- Aumentare la produzione del rinnovabile del 20%, di cui un 10% derivante da biocarburanti
- Ridurre del 20% il consumo di energia primaria da ottenersi tramite strategie di miglioramento dell'efficienza energetica.

Già nel 1992 i rappresentanti di 172 paesi si incontrarono a Rio De Janeiro nella "conferenza sull'ambiente e sullo sviluppo delle nazioni unite". Per la prima volta si parlò in modo globale di crescente disparità tra paesi industrializzati e paesi in via di sviluppo, di economia sostenibile, di politica demografica adeguata, di gestione sostenibile, di inquinamento e di gas serra, ma non vennero fissati dei target specifici e quantitativi da raggiungere.
Solo con il protocollo di Kyoto fu fissata in modo giuridicamente vincolante la riduzione delle emissioni dei sei gas serra principali; firmato nel 1997 da 180 paesi si prefiggeva come scopo principale quello della riduzione del 5% delle emissioni di gas serra rispetto a quelle del 1985. Il trattato entrò in vigore nel febbraio del 2005 e doveva durare fino al 2012.
Con l'accordo di Doha l'estensione del protocollo è stata prolungata dal 2012 al 2020 con ulteriori obiettivi di taglio delle emissioni dei gas serra.
Negli ultimi anni l'Unione Europea ha deciso di assumere un ruolo di leadership mondiale nella riduzione delle emissioni di gas serra, promuovendo un piano energetico per la decarbonizzazione dell'energia.
Accanto a questo si è sviluppata in Italia una strategia energetica nazionale SEN che individua sette priorità:

- Efficienza energetica
- Mercato competitivo del gas e hub sud-europeo
- Ristrutturazione della raffinazione e della rete di distribuzione dei carburanti
- Produzione sostenibile di idrocarburi nazionali
- Modellizzazione del sistema governance
- Sviluppo sostenibile delle energie rinnovabili
- Sviluppo delle infrastrutture del mercato elettrico

Efficienza energetica Rappresenta uno degli aspetti chiave nella nuova strategia energetica poiché contribuisce a ridurre i costi energetici, abbattendo le emissioni dei gas serra con conseguente positiva ripercussione sull'ambiente, migliora la sicurezza, riducendo le importazioni di fonti di energia da paesi esteri e favorisce la riduzione delle spese aumentando la crescita economica. Le iniziative principali volte al conseguimento di questi obiettivi sono state adottate soprattutto verso i consumi termici (riscaldamento e raffreddamento) che assorbono la percentuale maggiore dei consumi energetici. Sono state varate nuove norme per quanto riguarda l'edilizia, sia per nuove costruzioni che per rifacimenti importanti, sono state introdotte e mantenute detrazioni fiscali per quanto riguarda le ristrutturazioni civili, sono stati adottati i certificati bianchi o titoli di efficienza energetica

e introdotta l'incentivazione diretta per le pubbliche amministrazioni tramite il conto termico. Una particolare attenzione è stata volta anche a migliorare l'efficienza energetica nei trasporti promuovendo la costruzione di nuovi veicoli a ridotte emissioni e incentivando la rottamazione dei veicoli vetusti e l'acquisto di veicoli con impianto a metano, gas o elettrico. Il grafico 2.5 riporta in percentuale il risparmio energetico raggiunto nei settori dei trasporti e in quello edilizio.

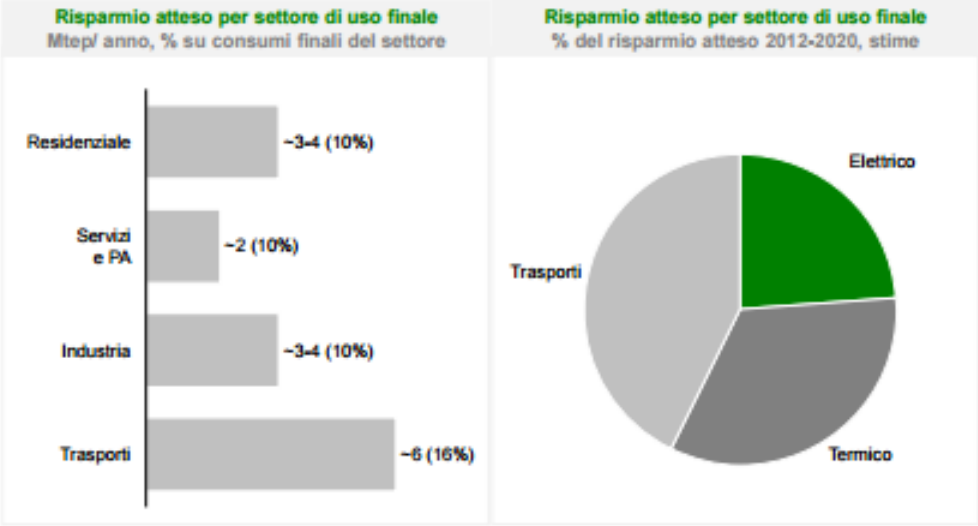


Figura 2.5: Risparmio atteso per settore di uso finale[19]

Mercato competitivo del gas e hub sud-europeo Lo sviluppo di un mercato competitivo ed efficiente del gas è un elemento chiave per consentire al Paese di recuperare competitività e migliorare il suo profilo di sicurezza. Il gas sarà ancora nel prossimo futuro una fonte fondamentale per la produzione di energia. A fronte di un aumento della richiesta di gas, per fronteggiare il progressivo abbandono dell'utilizzo del petrolio, del carbone e del nucleare, si prevede però una riduzione dei giacimenti presenti in Europa con conseguente necessità di maggiori approvvigionamenti dall'estero. Sarà quindi indispensabile diversificare i paesi fornitori per ridurre i rischi di crisi in caso di punte di richiesta eccezionali o di forti riduzioni, volute o meno, delle forniture. Fondamentale, sarà lo sviluppo di un'adeguata infrastruttura europea che permetta la promozione di un mercato unico con l'allineamento dei prezzi e la nascita di collegamenti strategici con gli altri continenti. Sfruttando la sua centralità all'interno del continente Europeo, l'Italia potrà svolgere un ruolo nevralgico per le nuove rotte dei gasdotti dall'Africa verso il vecchio continente.

Ristrutturazione della raffinazione e della rete di distribuzione dei carburanti Gli interventi volti a raggiungere i due obiettivi sono sostanzialmente riconducibili a:

- Progettare un piano di ammodernamento delle raffinerie in modo da determinare una maggiore competitività ed efficienza, una miglior qualità della gamma dei prodotti

offerti ed una produzione più eco sostenibile, cercando di limitare il più possibile le inevitabili ripercussioni sul piano occupazionale derivanti da una graduale riduzione delle capacità produttive legate alla crisi del settore

- Migliorare la qualità del servizio di distribuzione offerto, anche in termini di contenimento dei prezzi dei prodotti petrolio derivati, puntando ad una maggiore liberalizzazione del settore con un incremento del servizio selfservice per il rifornimento di carburante, chiusura degli impianti incompatibili, ad esempio per dettami urbanistici. Ulteriore strategia per il raggiungimento dell'obbiettivo è l'introduzione di nuove norme contrattuali che regolino i rapporti tra le compagnie petrolifere e i gestori degli impianti.

Produzione sostenibile di idrocarburi nazionali L'Italia ha a disposizione considerevoli riserve di gas e di petrolio, le più importanti dopo quelle dei paesi scandinavi, ubicate prevalentemente in cinque zone: Val Padana, Alto Adriatico, Abruzzo, Basilicata e canale di Sicilia.
Con la nuova strategia energetica si è voluto:

- Incrementare la produzione nazionale di idrocarburi mantenendo invariati gli standard di protezione ambientale e di sicurezza internazionale, passando ad una produzione che raggiunge circa il 14% del fabbisogno energetico nazionale.

- Provvedere ad investimenti nel campo implementando l'utilizzo di tecnologie all'avanguardia e progettazioni ottimizzate determinando una ricaduta sia in termini di occupazione sia in termini di diminuzioni dell'importazione di combustibili fossili.

- Adeguare gli iter-autorizzativi agli standard europei molto meno restrittivi.

Modellizzazione del sistema governance A livello nazionale, l'attuale assetto istituzionale è adeguato a garantire un funzionamento efficace ed efficiente dei mercati. All'AEEGSI sono affidati le modalità di accesso alle infrastrutture, il controllo e la promozione della concorrenza, mentre all'Antitrust è riconosciuto il ruolo di garantire il rispetto delle regole concorrenziali e sanzionare le violazioni. Purtroppo notevoli difficoltà si incontrano nell'armonizzare la legislazione dello Stato con quella delle Regioni, per cui sovente i procedimenti per autorizzare le opere sono di durata imprevedibile, ben oltre quella prevista dalle norme. Considerando quanto sopra, è necessario pertanto che si rafforzi in maniera decisa il massimo coordinamento fra i rappresentanti delle diverse istituzioni, sia a livello europeo che nazionale e regionale.

Sviluppo sostenibile delle energie rinnovabili Le energie rinnovabili costituiscono un elemento fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi sella Strategia Nazionale Energetica. E' necessario però:

- superare gli obiettivi di produzione europei 20-20-20, cercando di bilanciare in modo più equilibrato le diverse fonti rinnovabili (in particolare le rinnovabili termiche)

- ottenere una buona sostenibilità economica, allineando i costi di incentivazione agli standard europei e andando gradualmente verso la grid parity
- preferire le tecnologie che offrano nella rete elettrica e nel relativo mercato le energie rinnovabili
- integrare progressivamente nel mercato e nella rete elettrica le fonti rinnovabili

Quantitativamente ci si pone l'obiettivo di raggiungere il 19-20% dei consumi finali lordi (mentre l'obiettivo indicato dalla comunità europea per l'Italia era del 17%), pari a 23-24 Mtep di energia finale l'anno e con una riduzione fino a 50 milioni di tonnellate di anidride carbonica. La promozione delle rinnovabili viene quindi applicata a tre diversi settori: elettrico (RES-E), termico (RES-H), trasporti (RES-T).

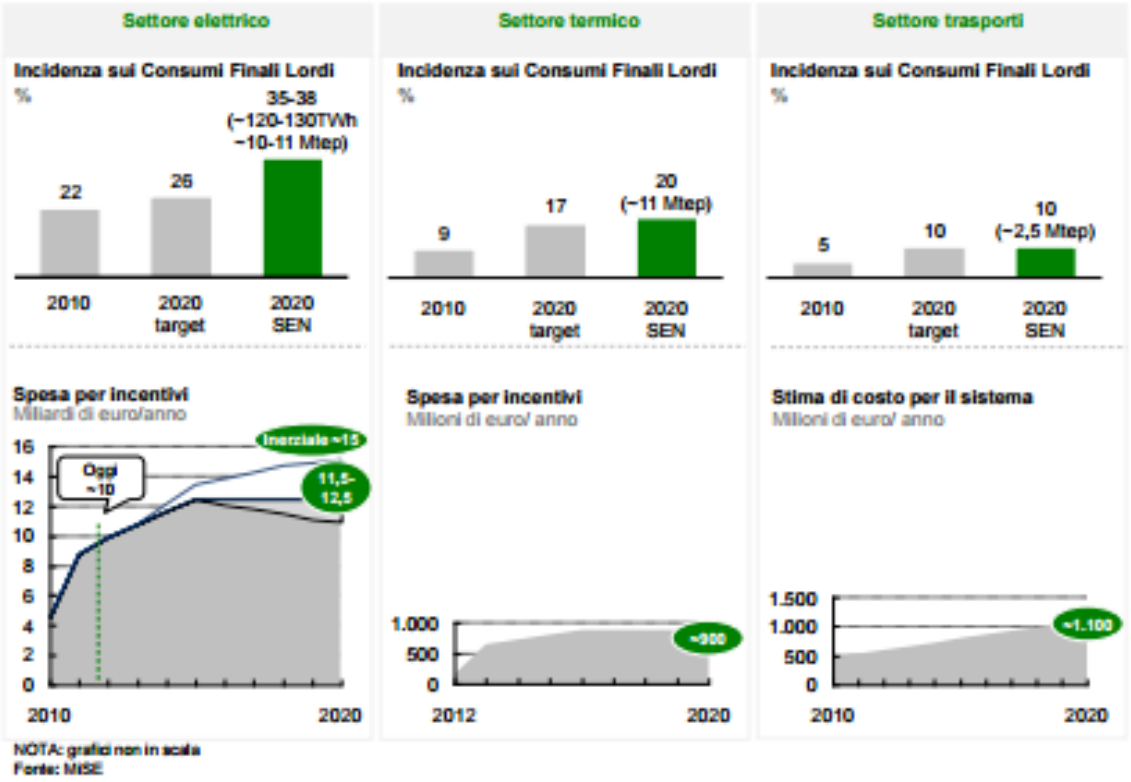


Figura 2.6: Gli obiettivi nei tre settori - PAN vs. SEN

RES-E Nel settore elettrico l'obiettivo 20-20-20 è stato raggiunto 8 anni prima della scadenza prefissata per la forte crescita delle installazioni, specie degli impianti fotovoltaici, grazie ad un sistema incentivante molto generoso. Questo, se da un lato ha comportato costi significativi per il sistema, d'altra parte ha determinato benefici ambientali, occupazionali, economici e di sicurezza energetica notevoli. Essendo però le fonti rinnovabili

discontinue, intermittenti e non programmabili, sono necessari interventi di rafforzamento fra l'infrastruttura di rete e il mercato. Altra grande sfida posta dallo sviluppo delle rinnovabili elettriche è l'evoluzione rapida ed efficiente delle tecnologie ad esse collegate, in modo da ridurre i costi di produzione e affrontare in tempo le possibili implicazioni. Il Governo ha varato due decreti ministeriali (uno per la tecnologia solare fotovoltaica, uno per le altre tecnologie rinnovabili), intendendo continuare a sviluppare le rinnovabili elettriche con obiettivi molto ambiziosi, cercando però contemporaneamente di contenere gli oneri per il sistema e la sua governabilità. Si sono quindi ridotti gli incentivi, avvicinandoli a quelli europei; si sono cercate tecnologie che assieme all'innovazione ricadano di più sull'economia del paese; si pongono le basi per uno sviluppo ordinato e sostenibile del settore; si cerca la massima integrazione fra il mercato e la rete.

RES-H Le fonti rinnovabili termiche rappresentano un elemento fondamentale della strategia italiana per raggiungere gli obiettivi 20-20-20, grazie alla loro efficienza di costo e alla facilità di installazione diffusa. Circa il 45% dei consumi finali è rappresentato dai consumi termici sia in ambito civile che industriale. Rispetto alle rinnovabili elettriche, quelle termiche risultano in generale più efficienti e meno costose per il raggiungimento degli obiettivi europei (in termini di costo per tonnellata di anidride carbonica evitata o di costo per kWh di energia finale prodotta) e comportano benefici significativi di risparmio combustibile per il consumatore finale (ad es. attraverso il riscaldamento a biomassa) e per il paese nel suo complesso (riduzione import di combustibili fossili). Alle termiche sono state dedicate meno iniziative ed incentivazioni ed è anche mancato un meccanismo di riscontro finale degli interventi fatti. Per quanto riguarda le biomasse circa il 65% è di produzione italiana, mentre il resto è importato, quindi questo segmento industriale è ben posizionato.) Per ottenere lo sviluppo della produzione di energia rinnovabile termica, il Governo, ha varato un Decreto Ministeriale che incentiva direttamente l'installazione di impianti dedicati, il cosiddetto "Conto Termico", che nel 2020 consentirà di raggiungere il target PAN. Interventi di maggiori dimensioni, prevalentemente industriali, sono collegati al meccanismo dei Certificati Bianchi, con l'obiettivo di fare investimenti più grandi cercando il massimo dell'efficacia e dell'efficienza. Verrà attivato anche un "fondo di garanzia" per gli investimenti in reti di tele-riscaldamento e tele-raffrescamento per incoraggiare l'applicazione di queste tecnologie. Un discorso importante merita la serie di investimenti nel settore forestale nazionale, da cui ricavare le biomasse per la produzione di energia termica, in linea con le indicazioni del piano per la riduzione dell'anidride carbonica e della carbonizzazione dell'economia italiana.

RES-T Il settore dei trasporti è responsabile di una quota importante di emissioni di gas serra ed è causa di dipendenza energetica poichè i consumi sono basati soprattutto sull'uso dei prodotti petroliferi derivati dall'importazione del greggio.
La legislazione attuale prevede l'obbligo, imposto ai soggetti che immettono in consumo carburanti per autotrazione, di immettere in consumo una determinata quota di biocarburanti. Lo sviluppo dei biocarburanti è tuttavia un tema ancora in discussione per i dati sul bilancio complessivo di riduzione delle emissioni, per la potenziale conflittualità con

gli usi alimentari e per gli elevati costi. La Commissione Europea sta ultimando la predisposizione della revisione della parte della direttiva 2009/28/CE relativa a biocarburanti e bio-liquidi. Si vorrebbe andare verso la seconda e terza generazione, ma la tecnologia non è ancora sufficientemente sviluppata.
L'Italia finora ha raggiunto e superato gli obblighi richiesti e questo ha consentito di sviluppare un settore industriale importante: siamo quarti in Europa per produzione di biocarburanti. Però anche questo settore sta attraversando una forte crisi per la concorrenza dei Paesi extra UE, per cui le compagnie petrolifere preferiscono acquistare prodotti finiti all'estero a prezzi più competitivi, e per una sovraccapacità produttiva dovuta alla rapida costruzione di nuovi impianti di produzione, accompagnata da un calo della domanda a causa della crisi economica.
L'Italia include i biocarburanti negli obiettivi di produzione delle energie rinnovabili ponendosi quali obiettivi che vengano prodotti in maniera sostenibile, cioè come seconda e terza generazione, e promuovendo progetti di "chimica verde", usando la chimica industriale da fonti rinnovabili. Lo sviluppo del bio-metano per l'uso nei trasporti sarà importante sia in termini di volumi per quello ottenibile da allevamenti, imprese di trasformazione alimentari e discariche sia in termini di ricaduta per la filiera industriale nel settore delle auto a metano.
L'utilizzo del metano e del bio-metano dovrà comunque ancora crescere anche attraverso le nuove tecnologie nel settore della raffinazione e i vantaggi aumenterebbero se si creassero condizioni opportune di sfruttamento delle attuali reti di distribuzione e di trasporto del gas. Nel breve termine il Governo è intervenuto orientando il settore verso una produzione più sostenibile, dando maggiore riconoscimento ai biocarburanti di seconda generazione e a quelli prodotti da rifiuti e sottoprodotti non utilizzati diversamente nell'industria e ha cercato di favorire lo sviluppo del sistema produttivo nazionale e comunitario.

Sviluppo delle infrastrutture e del mercato elettrico Nel mercato elettrico italiano è in atto una fase di profonda trasformazione dovuta allo sviluppo impetuoso delle rinnovabili, alla frenata della domanda, alla forte crescita della capacità delle centrali termiche a ciclo combinato (CCGT) e al calo dei prezzi dell'anidride carbonica.
Gli obiettivi principali di questa strategia sono pertanto:

- allineare prezzi e costi dell'elettricità ai valori europei, cercando di ridurre i costi di produzione
- integrare la produzione rinnovabile eliminando le inefficienze e assorbendo gradualmente la sovraccapacità produttiva attuale
- ridurre il livello di importazioni e aumentare la competitività del Paese
- integrarsi all'Europa, realizzando nuove strutture, rendendo più omogenee le regole dei mercati e continuando lo sviluppo del mercato libero.

Nella fase di cambiamento in atto il mercato libero ha raggiunto la piena maturità, anche se restano aree di inefficienza e occorre ancora lavorare affinché il consumatore finale

possa scegliere in modo consapevole l'offerta a lui più favorevole. I nostri prezzi sono più alti rispetto alla media europea perché quasi l'80% di produzione in Italia è basato principalmente su gas e rinnovabili, escluso l'import dai paesi confinanti, e si differenzia per l'assenza di nucleare e la bassa incidenza di carbone, che possono offrire costi inferiori.
In conseguenza delle politiche comunitarie ci sarà comunque nei prossimi anni una convergenza fra i nostri prezzi e quelli europei.
Per quanto riguarda le rinnovabili, bisognerà gestire adeguatamente la crescente capacità rinnovabile non programmabile con in particolare due criticità.
Una dovuta ad un eccesso di produzione rispetto ai consumi, dovuta ad una capacità concentrata in aree del territorio lontane dai centri di consumo con rischi per l'equilibrio e la sicurezza della rete e costi dovuti alla gestione dei flussi e alla remunerazione della eventuale mancata produzione. Già oggi, in determinati momenti, la produzione nazionale da rinnovabile si avvicina all'intera domanda nazionale di elettricità e questo richiede uno sviluppo adeguato delle reti di distribuzione, di trasmissione e di tutte le infrastrutture relative e necessarie.
La seconda criticità di mercato è la necessità di garantire un'adeguata capacità di back-up per la sicurezza del sistema e di neutralizzare gli effetti dello spiazzamento del parco termoelettrico soprattutto CCGT. In certi momenti si può avere la necessità di acquistare risorse più pregiate e quindi scarse con un aumento dei costi per il sistema. Anche il parco termoelettrico può essere chiamato in esercizio in uno spazio di tempo sempre più limitato con effetto sulla dinamica dei prezzi offerti nelle varie ore della giornata e nel lungo periodo vi è inoltre la prospettiva della riduzione dell'offerta disponibile ad es. per la fermata di produzione di gruppi ad olio.
Si rivela fatto essenziale allineare il prezzo del gas e gli incentivi per le rinnovabili a quelli del resto della comunità Europea, potenziando lo sviluppo della rete interna sia del gas sia elettrica, anche per ridurre i "colli di bottiglia" specie tra Centro e Sud Italia; contenendo le inefficienze, sovraccosti, le distorsioni di mercato; facendo una revisione delle agevolazioni a specifici segmenti di clientela.

L'insieme delle misure previste comporterà un potenziale beneficio sulla bolletta elettrica del Paese fino a circa 7,0 miliardi di euro l'anno al 2020 rispetto al 2012: 1,7 miliardi saranno la conseguenza della riduzione dei prezzi della materia prima gas per la generazione termoelettrica; 2,5 miliardi di euro l'anno arriveranno dalle misure di efficienza energetica; infine il resto deriverà dalla "spending review" sugli oneri di sistema e dall'eliminazione di altre inefficienze quali perdite di rete e colli di bottiglia.

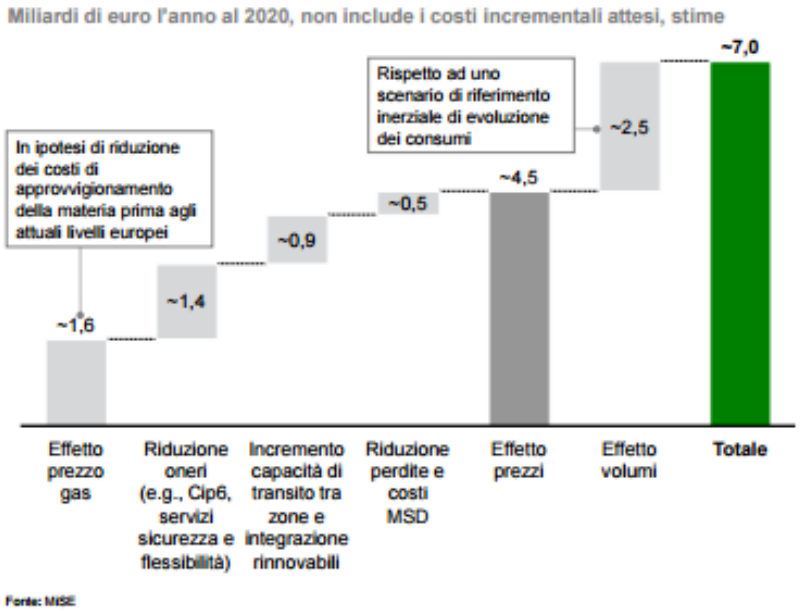


Figura 2.7: Benefici attesi nella bolletta elettrica

2.1.3 Piano per il futuro

Nel futuro altre sfide e traguardi attendono il sistema energetico italiano ed europeo per mantenere competitività nel settore produttivo e garantire la sicurezza e l'accessibilità energetica a tutta la popolazione europea, scongiurando quegli scenari disastrosi paventati in assenza di misure adeguate. La strada segnata con il Pacchetto Clima-energia verrà percorsa anche per il raggiungimento degli standard fissati per il 2030 e il 2050 nella Energy Roadmap 2050. L'Italia ancora un volta ha abbracciato a pieno le indicazioni proposte a livello europeo dal SET Plan (Strategic Energy Thecnology Plan) e in collaborazione con l'ENEA, uno dei maggiori enti di ricerca in materia di energia, ha ipotizzato scenari energetici a lunghissimo periodo, alcuni più in linea con quanto intrapreso col pacchetto 20 20 20 ed alcuni più innovativi con proposte di raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione puntando sull'evoluzione delle tecnologie e lo sviluppo di nuovi materiali. Linea comune degli scenari sarà:

- la riduzione dei costi e miglioramento delle prestazioni delle tecnologie rinnovabili di seconda generazione
- il miglioramento delle prestazioni di accumulo elettrico
- il potenziamento della diffusione dei biocarburanti,
- lo sviluppo di soluzioni di cattura e stoccaggio della CO_2
- l'abbattimento dei costi e la capillare diffusione dei veicoli elettrici

Il tutto in un clima di grande partecipazione e sinergismo tra l'industria, i centri di ricerca pubblici e privati, le università, i Ministeri e gli Enti, indispensabile per non fallire gli obiettivi prefissati, il più ambizioso dei quali la produzione di energie rinnovabili che dovrebbe raggiungere il 29% entro il 2030 e superare il 75% (si parla anche del 90%) nel 2050 con una riduzione dei consumi primari al 2050 tra il 17 e il 26% rispetto al 2010, e con un risparmio di circa 45 [Mtep] l'anno di energie primarie.

2.2 Nuovo paradigma della rete elettrica

Il crescente sviluppo tecnologico e la liberalizzazione del mercato elettrico hanno promosso la nascita e lo sviluppo di piccoli impianti di produzione di energia elettrica e termica localizzati vicino ai consumatori, all'interno di impianti industriali o di edifici per attività commerciale o residenziali. La rete cambia quindi la sua configurazione: da poche grandi centrali che alimentano l'intera rete magliata a molti piccoli impianti distribuiti e integrati all'interno della rete. Spesso questa nuova generazione avviene attraverso la conversione di fonti rinnovabili, come ad esempio gli impianti fotovoltaici, eolici o a biomassa.

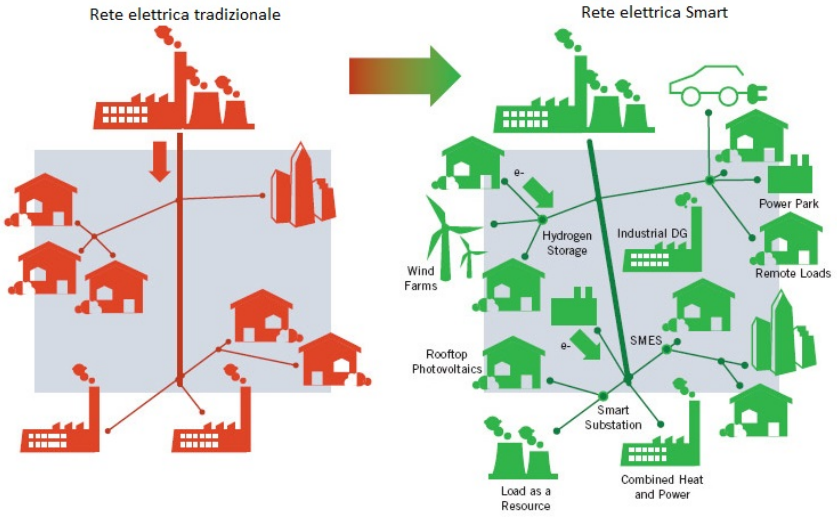


Figura 2.8: La trasformazione della rete: da tradizionale a smart

2.2.1 Una nuova configurazione di rete

La configurazione distribuita sembra rispondere meglio alle problematiche emerse negli anni passati contribuendo a:

- ridurre il rischio finanziario dovuto alla variabilità del prezzo del combustibile
- migliorare l'efficienza del sistema di distribuzione

- garantire una maggiore affidabilità e qualità de servizi

Grazie alla modularità e flessibilità degli impianti questi possono essere installati in tempi brevi e nelle zone più critiche della rete, limitando così il sovraccarico delle linee e mitigando il picco dei carichi. Inoltre l'integrazione nelle reti elettriche della generazione distribuita potrebbe contribuire ai servizi ancillari come la riserva di potenza attiva, il controllo della potenza reattiva, della tensione e della frequenza.
Prima della liberalizzazione la gestione della rete elettrica italiana era infatti affidata ad un unico ente monopolista, ENEL, il quale aveva il controllo su impianti di produzione, sulle linee di trasmissione e di distribuzione. La completa gestione nelle mani di un unico operatore ha permesso lo sviluppo di una rete elettrica strutturata, capillare e stabile. Infatti, in caso di guasti, di variazione dei parametri nominali della rete o di sbilanciamento del carico, l'operatore unico era capace di agire tempestivamente su tutti i punti della rete per ripristinare il corretto funzionamento e limitare i tempi di interruzione dell'alimentazione dei carichi.
Il crescente numero di punti di generazioni all'interno della rete di distribuzione porta a cambiare il paradigma della rete elettrica. La rete elettrica, fino alla liberalizzazione, presentava una struttura verticale in cui i flussi di potenza erano monodirezionali e la corrente fluiva dagli impianti di produzione alla trasmissione e, attraverso la distribuzione, alimentava i carichi. Con la generazione distribuita i flussi di potenza diventano bidirezionali: gli utenti che in passato rappresentavano solo carichi passivi oggi diventano elementi attivi della rete perché durante l'arco della giornata possono cambiare la loro natura e diventare produttori.

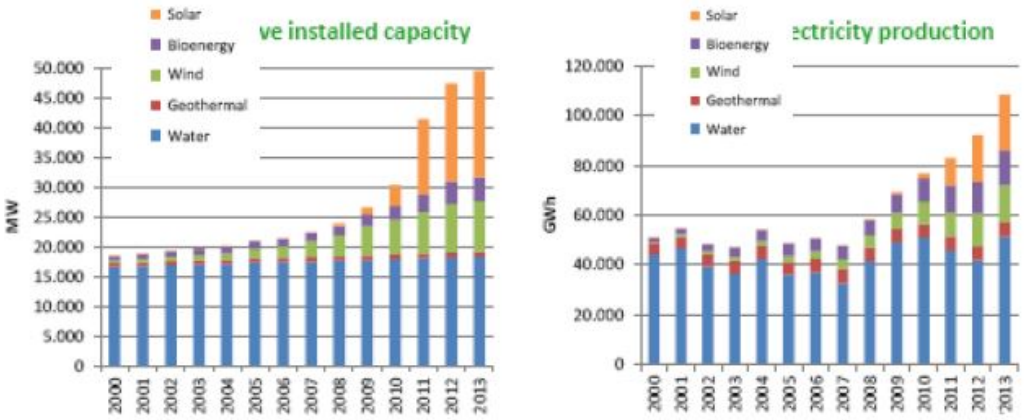


Figura 2.9: Capacità elettrica installata e prodotta

In Italia, grazie alla presenza di forti incentivi statali, la quota delle RES nella rete distribuzione ha avuto uno sviluppo esponenziale, soprattutto nel sud Italia dove è installato circa il 90% degli impianti eolici e, grazie alle condizioni climatiche favorevoli, sono stati installati numerosi impianti fotovoltaici. Questo ha provocato una saturazione della rete del sud Italia dove la generazione risultava essere più elevata della domanda. A causa dei limiti della rete stessa si è registrato un pericoloso sbilanciamento tra l'elevata generazione

degli impianti di produzione rinnovabile al sud e la richiesta di energia elettrica da parte dei grossi carichi industriali al nord. Questo ha portato ad avere un flusso di corrente

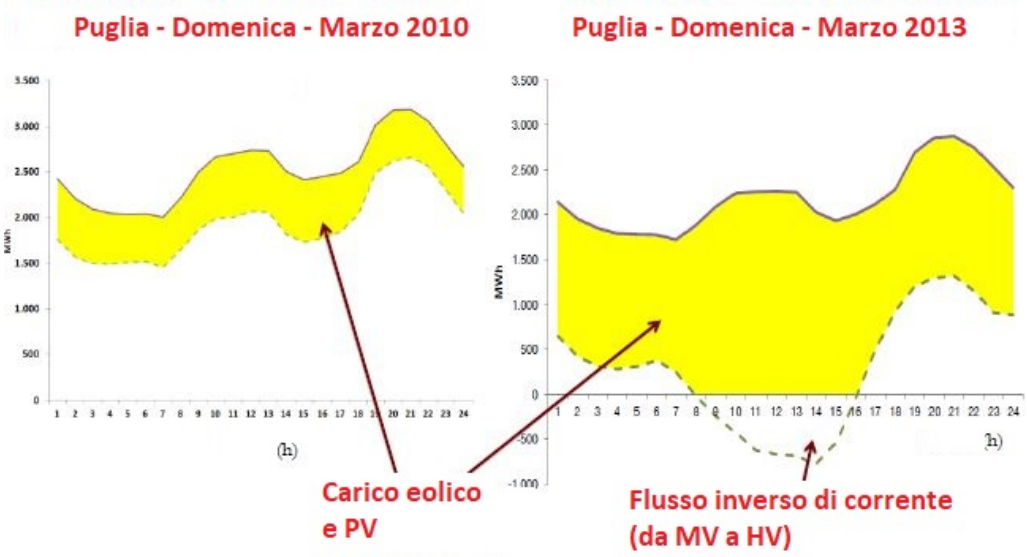


Figura 2.10: Esempio di flusso inverso di corrente a Marzo 2010 e 2013 in Puglia

che dalla distribuzione arriva alla rete di trasmissione e non viceversa. Il fenomeno della corrente inversa risulta essere problematico soprattutto per la selettività delle protezioni del trasformatore AT/MT.
La presenza di punti di generazione dislocati su tutta la rete di distribuzione ha impatto sulla gestione e sul controllo della rete stessa a causa:

- delle variazioni nel livello delle correnti di corto circuito
- delle variazioni nelle sollecitazioni termiche sui conduttori
- dell'impatto sulle protezioni di MT e BT
- dell'impatto sulla regolazione di tensione
- dell'impatto sulle procedure di manutenzione

Il livello delle correnti di corto circuito aumenta in seguito all'installazione di nuovi generatori lungo una linea. Per assicurare il corretto funzionamento dei sistemi di protezione è necessario verificare che le correnti di cortocircuito non siano troppo elevate.
Il caso peggiore si riscontra quando il generatore è vicino alla stazione MT e il collegamento avviene mediante cavo interrato in quanto l'impedenza del conduttore contribuisce poco a limitare le correnti di cortocircuito.
L'aumento delle correnti di corto-circuito deve essere compatibile anche con la massima sovracorrente ammissibile sui conduttori senza che questi subiscano danneggiamenti. La condizione peggiore si ha nel caso di diramazioni con sezione limitata dove la protezione

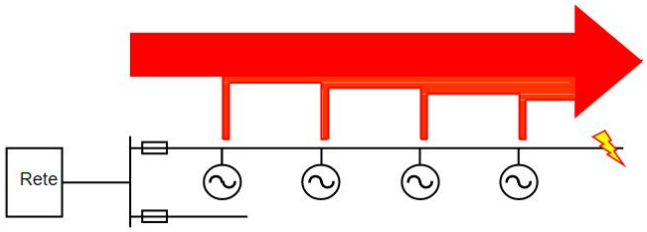


Figura 2.11: Contributo dei generatori alla corrente di cortocircuito

del conduttore è affidata all'interruttore a monte.
La protezione delle linee di distribuzione dai guasti risulta infatti un altro punto critico da rivalutare nel passaggio da generazione concentrata a distribuita. La protezione avviene mediante interruttori di protezione di massima corrente i quali, però, non sono direzionali cioè non possono rilevare la direzione della corrente di cortocircuito e conseguentemente non sono in grado d'identificare la posizione del guasto, se a monte o a valle.

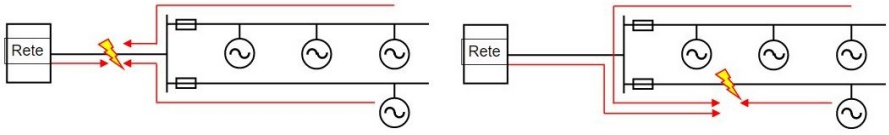


Figura 2.12: Selettività delle protezioni in presenza di generazione distribuita

Ne è un esempio nella media tensione lo scatto intempestivo, ovvero l'apertura non giustificata in un ramo sano dovuta alla presenza di correnti di cortocircuito generate da un ramo guasto limitrofo. Negli impianti di bassa tensione, per evitare questo problema, si limita la potenza della generazione distribuita installata sulla linea a circa 50% della potenza associata alla corrente nominale dell'interruttore.
Un'altra problematica riguarda la regolazione della tensione sulle linee MT. Questa avviene mediante variatori di tensione sotto carico che modificano il rapporto di trasformazione del trasformatore AT/MT. La regolazione può avvenire in due diversi modi: a tensione costante o a compensazione. Nel primo la tensione sulla barra MT viene mantenuta costante indipendentemente dal carico allacciato sul trasformatore e in questo caso la generazione distribuita non ha alcun effetto. Mentre nel metodo a compensazione la tensione è proporzionale alla corrente che fluisce nel trasformatore AT/MT, quindi la presenza della generazione distribuita, contribuendo a ridurre il carico complessivo visto dal trasformatore, ne provoca una riduzione proporzionale.
La generazione distribuita migliora la qualità di fornitura del servizio elettrico. In particolare influisce sulla continuità dell'alimentazione, intesa come assenza di interruzioni nella fornitura di energia elettrica, e sulla qualità di tensione, intesa come qualità della forma d'onda (ampiezza, frequenza, variazioni di corrente). La continuità di servizio viene valutata sia in termini di numero che di durata delle interruzioni. Per ridurre il tempo delle interruzioni sono stati messi a punto, oltre al rapido isolamento e al ripristino del

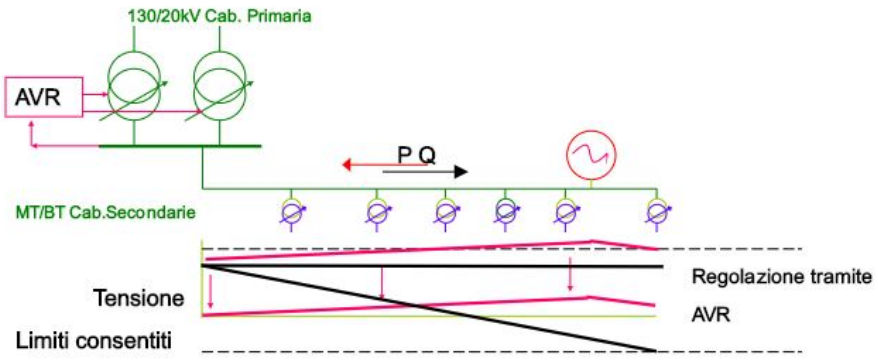


Figura 2.13: Regolazione in tensione a compensazione

servizio mediante rialimentazione, dei sistemi automatici di ricerca guasto. Per esempio, le procedure sviluppate da E-distribuzione per le reti MT di ricerca guasto ed isolamento del tronco prevedono l'utilizzo sia di dispositivi telecontrollati con richiusura rapida integrata che di rilevatori telecontrollati di guasto direzionale. Per i primi la generazione distribuita non incide sulla ricerca guasti in quanto, come prescritto dalla Norma CEI 11-20 per la limitazione del fenomeno dell'"islanding", gli impianti, mediante la loro interfaccia, devono staccarsi automaticamente dalla rete prima che avvenga la richiusura rapida.

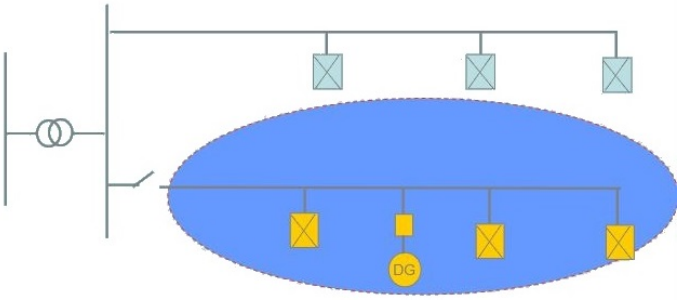


Figura 2.14: Esempio di formazione di un'isola

In caso di sistemi di telecontrollo con rilevatori di guasto direzionale, in cui non è prevista la richiusura rapida, l'attivazione dei dispositivi potrebbe essere provocata dalla corrente di guasto della generazione distribuita e non quella di rete. Per questo motivo sono stati sviluppati sei sistemi automatici di ricerca guasto che, mediante un ritardo nell'apertura di ciascun dispositivo, sono in grado di mantenere la selettività della rete, limitando le aperture involontarie. Per quanto riguarda l'impatto sulla qualità di tensione può essere analizzato sia mediante la variazione dei profili di tensione che la qualità dell'alimentazione stessa.
La presenza della generazione distribuita infatti modifica l'andamento della tensione lungo la linea a cui è allacciata. Nella configurazione di rete in cui sono presenti soli carichi

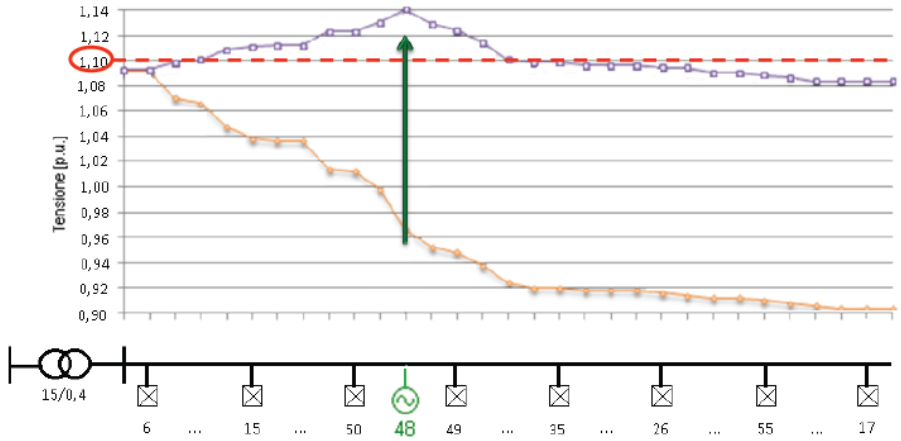


Figura 2.15: Variazione della curva di tensione in presenza di un punto di generazione lungo la linea

passivi, a causa della caduta di tensione sull'impedenza, la tensione a carico risulta essere minore della tensione in cabina. In presenza della generazione distribuita l'andamento della tensione lungo la linea invece cresce.
Risulta quindi necessario verificare che vengano rispettati i limiti di fornitura prima di autorizzare l'installazione di un nuovo impianto. Essendo la generazione distribuita tipicamente rinnovabile, e quindi molto variabile nel tempo, vi sono maggiori accensioni e spegnimenti degli impianti stessi che possono provocare fluttuazioni di tensione e sovratensioni. In termini di armoniche e interarmoniche, gli impianti di generazione distribuita hanno lo stesso impatto dei carichi passivi. Impianti eolici e fotovoltaici contribuiscono maggiormente a questo fenomeno di flicker di tensione. Inoltre, la generazione distribuita impatta anche le procedure di manutenzione, in particolare la norma CEI EN 50110-1 "Esercizio degli impianti elettrici" specifica che, in caso di intervento sulle linee, è necessaria l'apertura dei dispositivi di sezionamento, comando e interruzione a monte della linea e in corrispondenza dei punti di generazione distribuita.

2.2.2 Da tradizionale a smart

I limiti delle nuova configurazione di rete possono essere superati tramite l'utilizzo di un'infrastruttura di comunicazione che facilita il passaggio di informazioni e permette un controllo in tempo reale di aree anche molto estese. Inoltre, tramite opportuni sensori e attuatori digitali, la rete diventa in grado di leggere e comunicare valori o di eseguire comandi. Si passa così da una gestione tradizionale della rete a una smart grid ovvero, come la definirono Gharavi and Ghafurian,

> The Smart Grid can be defined as an electric system that uses information, two-way , cyber-secure communication technologies, and computational intelligence in an integrated fashion across the entire spectrum of the energy system from the generation to the end points of consumption of the electricity.

Si può infatti dire che la Smart Grid può essere definita con 3 parole chiave: bidirezionale, flessibile e digitale.

Bidirezionale La rete diventa in grado di accogliere la nuova generazione distribuita e in particolare di integrare i proconsumers, ovvero i consumatori divenuti attivi mediante l'installazione di impianti domestici di produzione di energia elettrica. La bidirezionalità richiede un sistema di telecontrollo delle protezioni per poter individuare nel minor tempo possibile la posizione del guasto e per impedire la formazione di isole.

Flessibile La rete può adattarsi alla domanda in tempo reale privilegiando l'energia prodotta in modo sostenibile nell'area limitrofa, un vero e proprio "km 0". Mentre con la rete tradizionale il sistema era rigido, con poche e grandi centrali che dovevano funzionare a ciclo continuo anche quando non vi era domanda per sopperire agli elevati tempi di start-up.

Digitale La telecomunicazione permette infatti di gestire le operazioni di routine in maniera automatica, di identificare le anomalie, identificarle e risolverle in remoto nella sala di controllo. In questo modo si migliora la qualità del servizio diminuendo le operazioni di manutenzione sul campo e il numero degli operatori.
Questa intelligenza di rete favorisce l'introduzione di nuove tecnologie di misura e controllo della rete, come ad esempio i contatori elettronici, che forniscono periodicamente alla sala di controllo informazioni sullo stato della rete e su eventuali variazioni anomale.

Rete tradizionale	**Smart grid**
Elettromeccanica	Digitale
Monodirezionale	Bidirezionale
Generazione concentrata	Generazione distribuita
Lineare	Magliata
Pochi sensori	Molti sensori
Monitoraggio manuale	Automonitoraggio
Ripristino manuale	Ripristino automatico
Guasti e black-out	Responsività e islanding controllato
Controlli e test manuale	Controlli e test in remoto
Controllo limitato	Controllo diffuso
Consumatori passivi	Consumatori attivi

Il consumo dell'energia a "km 0" e le letture in tempo reale permettono un ampliamento dei servizi elettri. La tariffazione può seguire direttamente la dinamicità della domanda diventando Time-of-Use Pricing, ovvero prezzo al tempo di utilizzo e, in caso di smart home, vi è la possibilità di ridistribuire i carichi in base al prezzo istantaneo di mercato. Questo incentiva l'inserimento di punti di accumulo, utili per ottimizzare l'uso dell'energia rinnovabile prodotta in loco, ma non consumata. Anche la mobilità elettrica (automobli, scooter e biciclette) è favorita da questa nuova struttura intelligente in quanto i veicoli

elettrici possono essere visti come punti attivi di rete, cioè come delle batterie mobili in grado di comportarsi sia da carichi che da generatori a seconda delle esigenze di rete.

Capitolo 3

Stato dell'arte delle ricariche elettriche

Gli ultimi anni sono stati caratterizzati da grandi cambiamenti in tutti i settori energetici, ma è sicuramente nel mondo elettrico che vengono riposte maggiori aspettative. L'elettricità non permette solo rendimenti maggiori ma se prodotta con zero emissioni permetterà una migliore qualità della vita. In particolare i veicoli elettrici possono rappresentare la chiave di volta in quanto eliminano l'inquinamento e permettono la completa integrazione delle energie rinnovabili. Lo sviluppo dei veicoli elettrici deve essere supportato adeguatamente da una struttura elettrica capillare e ed intelligente.

3.1 Nascita dell'infrastruttura e modelli di Business

L'introduzione dei veicoli elettrici rappresenta un ulteriore radicale cambiamento della gestione della rete. Negli ultimi anni il mercato dell'automobile ha visto l'introduzione dei motori elettrici come possibile soluzione da affiancare o sostituire i classici veicoli a motore a combustione interna (ICE). Le case automobilistiche hanno introdotto nuove soluzioni per la mobilità sostenibile:

- Veicoli ibridi
- Veicoli elettrici

Promuovere lo sviluppo dell'elettro-mobilità e delle tecnologie verdi è un aspetto vantaggioso poiché permette un maggiore rendimento e quindi un risparmio sulla quantità di energia primaria impiegata, inoltre l'elettrificazione dei trasporti stimola la diffusione delle tecnologie innovative a basso impatto ambientale, riduce la dipendenza dai combustibili fossili e le emissioni urbane.
Per stimolare i consumatori al cambiamento è necessario garantire gli stessi confort che possiedono ora con le macchine a combustione interna: liberi spostamenti su tutto il territorio, soste brevi e costi limitati. Ne consegue che è necessaria la presenza di infrastrutture uniformemente dislocate che permettano ai consumatori di ricaricare le batterie velocemente. Le possibili soluzioni individuate:

- Presenza di punti specializzati che permettono la sostituzione di batteria
- Presenza di una fitta infrastruttura di punti di ricarica delle auto

A causa dell'assenza di uno standard comune a tutti i veicoli, in Europa si sta puntando verso la realizzazione di un'infrastruttura di punti di ricarica dislocati sulla rete di bassa tensione in modo da garantire facili spostamenti su tutto il territorio. Studi statistici hanno dimostrato che la maggior parte degli utenti hanno la disponibilità di un garage dove poter installare un caricatore privato ma, per garantire lunghi spostamenti e servire una più ampia clientela, è necessaria un'adeguata infrastruttura pubblica.
L'Autorità, con la delibera del 19 aprile 2010(ARG/elt 56/10), permette lo sviluppo delle ricariche private rimuovendo una vecchia norma che impediva ai consumatori di avere una doppia fornitura di energia elettrica, e quindi di ricaricare privatamente la propria auto. Questa apertura si estende anche alle aree condominiali e alle aree di sosta (parcheggi sotterranei, parcheggi multilivello, parcheggi privati), i quali possono sviluppare un vero e proprio business legato al servizio di ricarica. La fornitura di energia per la ricarica prevede le tasse di rete pari ad una qualsiasi fornitura elettrica, mentre il prezzo dell'energia dipende dal retailer scelto all'interno del mercato libero.
Anche per l'infrastruttura pubblica l'AEEGSI ha dovuto implementare nuove norme che mirano alla standardizzazione dello sviluppo della ricarica e alla definizione del ruolo giocato dal DSO nella mobilità elettrica [32]. Per questo motivo le autorità dei paesi Europei supervisionati dall'ACER (Agency for the Cooperation of Energy Regulators), dopo un confronto sulle diverse realtà e potenzialità della mobilità, intravedono nel mercato competitivo il potenziale acceleratore tecnologico per lo sviluppo dell'infrastruttura di ricarica. Questo, non solo permetterebbe ai consumatori piena liberà di scelta del fornitore, in accordo alla politica di liberalizzazione del mercato elettrico, ma favorirebbe la diffusione sull'intero territorio europeo di punti di ricarica pubblici. In particolare in Italia l'AEEGSI, per promuovere la libera concorrenza sia nella vendita al dettaglio che nella ricerca legata alla mobilita elettrica, evitando così che solo pochi operatori promuovano lo sviluppo della mobilità, ha precisato che l'infrastruttura di ricarica non fa parte della licenza del DSO. Questo comporta due aspetti principali:

- Il Costo della costruzione delle infrastrutture non viene incluso nella Base Asset Regulatory (RAB)
- Il possibile sviluppo di più modelli di business; infatti, il DSO non gioca un ruolo esclusivo nello sviluppo delle infrastrutture

La promozione di una libera concorrenza dello sviluppo delle infrastrutture di ricarica e la promozione di un mercato competitivo di vendita al dettaglio permettono la nascita di soluzioni diverse nate dalla combinazione dei diversi stakeholder. I principali operatori presenti nella struttura del sistema di ricarica sono:

- Asset provider - ente che acquista i charge unit dai produttori. Mediante studi dedicati che prendono in esame le tratte automobilistiche più trafficate e lo stile di vita dei consumatori, determina i punti strategici e favorevoli di installazione delle infrastrutture

- Service Provider - detto anche charge service provider (CSP) è l'operatore che si dedica alla fornitura del servizio di ricarica, cercando di ridurre al minimo il prezzo del servizio o associandolo ad altri benefit.
- Energy vendor - rappresenta l'operatore che si dedica alla fornitura di energia con cui l'asset o service provider hanno deciso di stipulare un contratto di fornitura sulla base di accordi finanziari.

L'assenza di un know how adeguato sulle diverse soluzioni tecnologiche e organizzative legate alle infrastrutture di ricarica, fa sì che vi sia un'incertezza legata al modello da applicare per promuovere la mobilità elettrica. Questo porta l'AEEGSI a formulare l'ARG/elt 242/10, nel dicembre del 2010, un documento con cui viene promosso e incentivato lo sviluppo di progetti pilota in cui i diversi enti partecipanti propongono una loro soluzione riguardo alla progettazione, costruzione e gestione della ricarica pubblica EV. L'AEEGSI permette la partecipazione dei DSO ai progetti, ma impone un vincolo di disaggregazione cioè lo di sviluppo della mobilità deve essere separato dall'attività regolamentate. Per avere un approccio neutrale alle diverse combinazioni tecnologiche e soluzioni organizzative, l'Autorità fissa tre diversi modelli di Business che dovranno essere presi in esame[32]:

- Modello DSO: il DSO coincide con l'operatore di gestione dell'infrastruttura di ricarica, tale soluzione deve essere multivendor cioè tutti i consumatori devono poter caricare sulle colonnine senza che l'energy vendor sia un aspetto discriminante. Oggi tale soluzione è stata realizzata per i progetti pilota ma non nelle altre infrastrutture.
- Modello Charge Service provider con licenza esclusiva: l'amministrazione pubblica, attraverso un sistema di selezione, affida ad un unico Chrage service provider la costruzione e gestione della ricarica BEV. Tale soluzione può essere sviluppata sia mono-vendor cioè l'intera infrastruttura di ricarica è fornita da un unico energy vendor oppure in modalità multi-vendor per promuovere per esempio più produttori locali o per altri vantaggi economici.
- Modello basato sulla concorrenza tra CSP: nella stessa area sono presenti più service provider. Il consumatore è libero di scegliere tra le diverse infrastrutture di ricarica (monovendor) e quindi scegliere il proprio fornitore ma è necessaria una elevata standardizzazione.

Nel corso dello sviluppo di tali progetti[16] è stata applicata ai consumatori una tariffa vantaggiosa e di protezione che prevedeva, oltre ai costi dell'energia, una tariffa di rete, impostata dall'Autorità e comprensiva dei costi dell'infrastruttura di ricarica. I dati raccolti durante lo sviluppo di questi progetti sono stati condivisi con l'AEEG e permettono di acquisire le competenze necessarie per la definizione di un quadro normativo che sostenga la mobilità elettrica e, allo stesso tempo, promuova la concorrenza del mercato.
Alla fine di maggio del 2011 sono stati selezionati e incentivati 5 dei dieci progetti presentati [16]:

- Progetto basato su "DSO" presentato da E-distribuzione in collaborazione con Hera, un progetto operativo già nel 2013 che prevede l'installazione di 310 punti di ricarica a Pisa, Bari, Genova, Perugia e in diversi comuni di Milano e dell'Emilia Romagna.

- Due progetti basati su "CSP con licenza esclusiva", il primo proposto da A2A prevedeva l'installazione di 53 colonnine a Milano e 23 a Brescia, operativo nel 2013, il secondo presentato dal comune di Parma prevedeva 200 punti di ricarica.
- Due progetti "CSP in concorrenza", il primo presentato da Enel Energia, operativo nel 2013, prevedeva 26 colonnine installate tra Milano e Roma, il secondo presentato da un'organizzazione ONLUS prevedeva 150 colonnine in provincia di Monza Brianza e 107 nel parcheggio dei supermercati delle città di Roma, Milano, Bari; Napoli; Catania, Genova e Bologna operativo nel 2014. In questi due progetti venne sperimentata la tecnologia di ricarica rapida che caricano i veicoli in corrente continua ad alta potenza.

3.2 Veicoli Elettrici

La soluzione del veicolo elettrico nacque quasi in contemporanea con i primi motori termici alla fine dell'800. Dopo una prima fase in cui entrambe le soluzioni riuscirono a convivere, successivamente, dopo l'invenzione del quadriciclo con motore a scoppio, inventato da Herry Ford, tali veicoli presero il sopravvento nel mercato automobilistico. Ciò a causa della limitata tecnologia legata sia alle pesanti batterie, ingombranti e con scarsa autonomia, che all'essenza di sistemi di controllo. Grazie alla grande disponibilità di energia a bordo, bassi tempi di rifornimento ed elevato sviluppo tecnologico ed economico, le macchine a combustione interna hanno dominato il mercato automobilistico per tutto il XX secolo.
Oggi, grazie allo sviluppo tecnologico delle batterie e dell'elettronica, alla crescente richiesta di energia elettrica a bordo e all'introduzione della nuova normativa che punta sia alla riduzione dei gas inquinanti e CO_2, sia sull'aumento del rendimento e riduzione dell'energia primaria impiegata, si sono introdotte nuove soluzioni automobilistiche:veicoli ibridi e veicoli elettrici [26].

Veicoli ibridi Sono veicoli in cui l'energia meccanica del movimento delle ruote viene generata mediante due o più sistemi di propulsione.
All'interno dei veicoli sono presenti più accumulatori di energia; questo permette al veicolo di spostandosi usufruendo di forme di energia diverse. La complessità della struttura ha portato le case automobilistiche a realizzare un controllore di supervisione, un sistema automatico che deve gestire adeguatamente i flussi di energia in modo da rispondere alle sollecitazioni del conducente e minimizzare il consumo di energia globale, rispettando i limiti fisici dei diversi componenti. Particolarmente diffusi sono i veicoli ibridi termico-elettrico (PHEV Plug-in Hybrid Electric Vehicle), che permette di combinare i vantaggi dei veicoli tradizionali (grande disponibilità di energia a bordo, bassi tempi di ricarica) e dei veicoli elettrici (emissioni nulle nel luogo di utilizzo e reversibilità). Grazie alla presenza del motore elettrico durante la fase di frenata l'energia cinetica non viene dispersa sui freni, ma viene accumulata in batteria, in super-condensatori oppure nei flywheel ad azionamento elettrico. Questo permette di una riduzione delle emissioni e un aumento dell'efficienza e della flessibilità del veicolo.
I veicoli ibridi posso essere:

- semplici: sul veicolo sono presenti due sistemi di trazione che lavorano in sinergia tra di loro. Possono essere sviluppati due configurazioni:
  - serie: il movimento meccanico che viene trasmesso alle ruote è generato dal solo motore elettrico. Il movimento meccanico generato dal motore termico viene convertito in energia elettrica dal generatore e in continua dal convertitore AC/-DC. I veicoli ibridi semplici serie possono essere suddivisi in base alla quantità di energia elettrica che possono immagazzinare possono essere range Extender, load follower e full series, con capacità di energia immagazzinata decrescente.
  - parallelo: si hanno due linee di power train diverse, il movimento meccanico delle ruote può essere generato dal motore elettrico o direttamente dal motore termico senza ulteriori conversioni di energia. I veicoli ibridi semplici parallelo possono essere suddivisi in base alla quantità di energia immagazzinata, Micro hybrid, Mild Hybrid, Full Hybrid. Strong Hybrid con capacita di energia elettrica immagazzinata crescente
- complessi: sul veicolo sono presenti più di due accumulatori di energia e quindi il controllore deve gestire adeguatamente un sistema più complesso.

Veicoli elettrici I veicoli elettrici: veicoli in cui la trazione è affidata solo al motore elettrico. I veicoli oltre a garantire emissioni nulle, presentano un'efficienza intorno al 90%, molto superiore sia ai motori Diesel (40%) sia ai motori a benzina (30%) [26]. L'impiego dei motori elettrici garantiscono un ottimo spunto alla partenza e consentono di ottenere ottime performance sui cicli urbani. Le soluzioni commercializzate sono veicoli che utilizzano:

- Fuel Cells
- Batterie elettriche

Fuel Cells I veicoli ad idrogeno sono veicoli che sfruttano le proprietà chimiche dell'H2,infatti grazie al suo elevato potere calorifico può essere impiegato come combustibile nei motori a combustione interna, oppure sfruttando le sue proprietà elettrolitiche può essere sfruttato nelle celle a combustione come soluzione alternativa per promuovere la green economy sostenuta dalla Comunità Europea. Nei veicoli fuel Cells l'idrogeno viene fatto reagire con l'ossigeno per generare energia elettrica e acqua. L'idrogeno puro, cosi come l'elettricità, non è una fonte energetica ma un vettore energetico, poiché non lo si trova libero in natura ma deve essere prodotto tramite altre forme di energia. Nel caso in cui l'idrogeno fosse ricavato mediante forme rinnovabili di energia allora i veicoli sarebbero totalmente ad emissione zero.
L'idrogeno presenta però alcuni svantaggi: l'efficienza del processo elettrolitico risulta essere ancora bassa e, inoltre, per garantire un'elevata autonomia deve essere liquefatto. Lo stoccaggio e il trasporto dell'idrogeno liquido richiede infrastrutture adeguate poiché altamente esplosivo.

3.2.1 Veicoli elettrici a batteria

I veicoli elettrici a batteria, sono quei mezzi in cui il movimento delle ruote viene prodotto dalla conversione dell'energia elettrica in enegia meccanica. In base alla potenza delle batterie e alla classe di appartenenza i veicoli elettrici detti anche BEV (battery electric vehicle), possono essere suddivisi in:

- veicoli L7e sono veicoli di piccole dimensioni come le mini-car e con motore di piccola potenza (15kW). La dimensione ridotta delle batterie fa sì che questi veicoli vengano caricati solitamente con il modo 1 o il modo 2 ma l'autonomia è limitata a circa 80 [km].
- I veicoli civili M1 sono veicoli fino a 8 posti più quello del guidatore. Le diverse case automobilistiche cercano di attirare i clienti tramite la diversificazione del prodotto, sia nella forma e dimensione, sia in termini di autonomia (100-250 km). L'impiego di batterie litio-ione garantisce, inoltre, elevata flessibilità nella ricarica, infatti possono essere caricate sia a basse potenze (3 kW) sia a potenze più elevate (350 kW) in continua (nuovi impianti Tesla).
- I veicoli categoria commerciale N1, quattro ruote, massa a carico max 3500 [kg]. Questi veicoli richiedono una potenza disponibile alle ruote molto superiore ai veicoli precedenti, valori tipici sono 40-100 [kW]. Anche in questo caso si necessita di batterie leggere e con buona autonomia, per questo vengono impiegati pacchi di batterie litio ione da circa 40 kwh con consumo medio di 185 [Wh/km].

I veicoli elettrici possono essere caricati o in corrente alternata, sul mezzo è installato un convertitore AC/DC di piccole dimensioni che permette la trasformazione dell'energia, oppure in corrente continua, tale soluzione di ricarica permette il trasferimento di potenze molto elevate, fino a 350 [kW], grazie ai convertitori di grandi dimensioni installati a terra. I componenti principali all'interno di un veicolo alimentato in corrente alternata sono:

- Carica batterie
- Bms
- Batteria

Carica batterie I carica batterie, cosi come lo sviluppo delle infrastrutture di ricarica, svolgono un ruolo fondamentale nello sviluppo dei veicoli elettrici. I tempi di carica e durata della batteria sono infatti direttamente collegati alle loro prestazioni. I carica batterie devono presentare elevata efficienza, in modo da ridurre al minimo le perdite ed evitare surriscaldamenti interni, ma anche elevata affidabilità ed elevata densità di potenza. In particolare per i convertitori installati direttamente sui veicoli, per non gravare sulle prestazioni della macchina e sul suo costo, sono richiesti convertitori con volumi e pesi ridotti ma capaci di gestire potenze elevate. Le loro caratteristiche di funzionamento dipendono dai componenti, dal controllo e dal tipo di commutazione dei switch. I carica

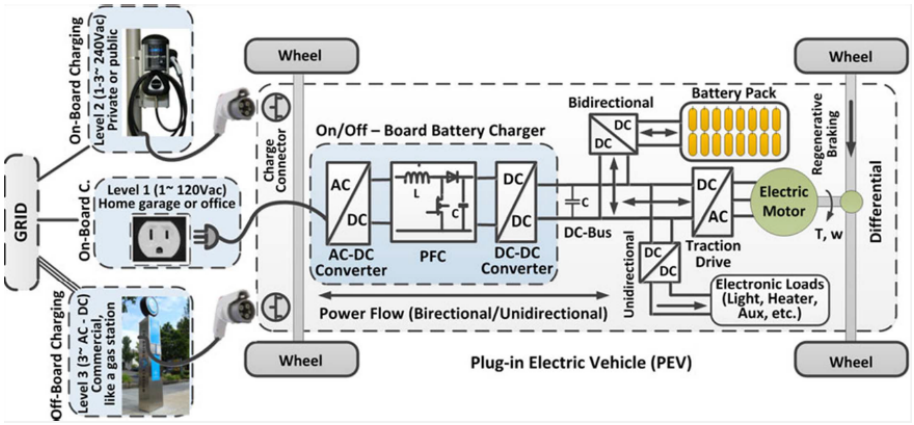


Figura 3.1: Struttura di ricarica e componenti veicolo [49]

batterie possono essere unidirezionali, se la potenza è trasferita dalla rete al veicolo, oppure bidirezionali come nel caso di applicazioni V2G. La struttura è complessa poiché sono presenti tre diversi elementi[49]:

- convertitore AC/DC, in genere un rettificatore a diodi per i convertitori unidirezionali mentre per applicazioni bidirezionali si impiegano MOSFET o IGBT
- PFC, power factor corrector, solitamente un boost, è un elemento che permette di ridurre lo sfasamento tra la tensione e la corrente assorbita dalla rete massimizzando cosi la potenza prelevabile dalla stessa; inoltre permette alle macchine di contribuire al supporto di potenza reattiva locale mediante controllo dell'angolo di fase della corrente senza dover scaricare una batteria
- convertitore DC/DC permette di adattare la tensione ai capi della batteria durante la sua carica

Oggi la normativa richiede ai veicoli elettrici, così come ad altri utenti collegati alla rete mediante convertitori digitali, un fattore di potenza molto elevato; in circolazione sono presenti veicoli antecedenti la pubblicazione della normativa e presentano un unico integrato composto un ponte di diodi in combinazione con un filtro e convertitore DC-DC. Enel, per promuovere lo sviluppo della mobilità elettrica, ha deciso di consentire a tutti i veicoli la ricarica, in altri paesi questo non è avvenuto. Un altro problema legato al collegamento di convertitori alla rete è legato agli effetti deleteri delle armoniche legate alla commutazione sugli impianti di distribuzione, è necessario quindi dimensionare adeguatamente i filtri verso la rete per ridurre le immissioni di armoniche secondo le normative. Le normative per le emissioni delle armoniche sono a livello mondiale ISO e IEC-CISPR, negli Stati Uniti SAE, in Italia la normativa vigente per quanto riguarda i limiti armonici dei veicoli elettrici è la CEI EN 61000 [10].
La presenza dei filtri verso la rete contribuisce ad aumentare sia il peso che il costo soprattutto a causa degli induttori. Una soluzione alternativa consiste nell'impiegare l'induttanza dell'avvolgimento del motore elettrico per ridurre le armoniche verso la rete; modificando

la struttura del motore, e tramite un inverter bidirezionale, è possibile utilizzare la power train per caricare le batterie. La struttura cosi realizzata non permette la configurazione V2G ma permette di risparmiare sulle induttanze, elementi costosi e pesanti.

BMS All'interno della macchina è presente un sistema di monitoraggio, controllo e gestione che permette il corretto funzionamento della batteria. Preservare le potenzialità di quest'ultima è essenziale poiché è l'elemento che contribuisce maggiormente all'elevato costo dei veicoli elettrici. Il battery management system ha diverse funzioni[26]:

- Comunicazione e connessione con l'ambiente esterno. Vengono misurate le grandezze della rete e attraverso la comunicazione con la colonnina il segnale del PWM deve essere adeguatamente interpretato.
- Monitoraggio sia delle singole celle sia della tensione e della corrente ai capi della batteria. Tali rilevazioni, adeguatamente rielaborate tramite il microcontrollore, vengono usati sia per determinare lo stato di carica della batteria, sia per determinare la massima corrente di carica/scarica che la batteria può sopportare in quelle condizione operative. Infatti una carica non corretta a o una scarica profonda potrebbero danneggiare la batteria.
- Diagnostica in modo da rilevare eventuali malfunzionamenti della batteria e della macchina agendo cosi sui dispositivi di protezione come relè di precarica e interruttori. Nell caso in cui vengano rilevati problemi di cortocircuito con il telaio del veicolo, o gas di sfiato, la batteria viene disalimentata. Attraverso il sistema di raffreddamento che può essere ad aria, più facile da realizzare, a liquido più efficiente ma richiede di convogliare il calore celle in uno scambiatore di calore, è possibile riportare le celle a lavorare nel range consigliato dal costruttore.

Il controllo delle singole celle è un'operazione essenziale per preservare lo stato di salute delle celle. Il BMS monitora la corrente, la tensione e la temperatura della singola cella rilevando eventuali anomalie di funzionamento, cercando di far lavorare le celle sempre all'interno dei range imposti dal costruttore. Le singole celle però presentano tensioni molto basse, per le batterie al litio le tensioni variano tra 2.7 e 4.2 [V], si necessita quindi di una strumentazione molto precisa; inoltre la connessione in serie di un numero elevato di celle (100) produce elevate tensioni del singolo gruppo. Per tali motivi spesso si preferisce raggruppare le celle in più gruppi, ognuno formato da numero limitato di celle, questo produce una maggior facilità della misurazione e ridotte tensioni sui singoli gruppi, ma dall'altra si hanno maggiori connessioni di potenza e maggiori problemi per il raffreddamento delle batterie.
Il BMS deve svolgere, inoltre, un ruolo di bilanciamento, nonostante vengano impiegate celle simili tra loro per realizzare una batteria, si avranno sempre delle differenze costruttive, questo porta le celle a caricarsi in maniera differente tra loro con conseguente stato di carica diverso. Nel caso in cui all'interno del pacco di batterie vi sia uno sbilanciamento allora la capacità della batteria sarà legata alla cella difettosa, inoltre le celle sbilanciate possono raggiungere prima delle altre le tensioni limite riducendo così la capacità complessiva della batteria. Esistono due possibili soluzioni per effettuare il bilanciamento, il

primo è di tipo dissipativo, consiste nel collegare uno shunt in modo da dissipare la carica in eccesso, è la soluzione più semplice e meno ingombrante. Il secondo è di tipo attivo e consiste nel trasferimento di carica da una cella all'altra, tale soluzione risulta essere più complessa e costosa.
Lo stato di carica della batteria, detto SOC (state of charge) è un dato che l'elettronica di bordo del veicolo è capace di calcolarsi. Un metodo che permette di determinare il SOC della batteria è attraverso è la misura della tensione a vuoto (Voc). Tale valore di tensione però non è accessibile durante la scarica del veicolo, a causa di elementi dissipativi, come resistenza intera e capacità parassite, la tensione rilevata ai capi della batteria durante una fase di scarica sarà quindi inferiore al valore della tensione a vuoto e superiore nel caso di carica della batteria [3].
Un altro sistema usato per a stima del SOC è attraverso la misura della corrente ingresso e in uscita dalla cella, attraverso l'integrale. Si determina gli Ampere-ora accumulati:

$$A_h = \int I(t)dt = \sum_{t=1} I(t)\triangle t \tag{3.1}$$

A_h= Ampere-ora accumulati
I(t)=corrente misurata all'istante t
triangle t= periodo di osservazione
In questo modello minore è il tempo di campionamento, migliore sarà la stima del SOC,
Un altro metodo utilizzato per la stima dello stato di carica è mediante il flusso di energia:

$$E = \int pdt = \sum_{t=1} v(t) * I(t)\triangle t \tag{3.2}$$

E=energia
p=potenza
v=tensione ai mosetti della batteria
i=corrente che circola nella batteria
Ad oggi sono presenti in letteratura altri modelli interpretativi dell'andamento del SOC, rispetto a quelli citati, che richiedono però una conoscenza più precisa delle caratteristiche della batteria. Per questo motivo, ai fini dell'elaborato, non possono essere presi in considerazione [26].

Batterie Grazie allo sviluppo tecnologico degli ultimi anni nuovi sistemi di accumulo elettrochimico sono stati studiati e introdotti sul mercato. In particolare le batterie al litio stanno avendo una grande ascesa nel mercato globale e della mobilità elettrica, grazie al miglioramento tecnologico e prestazionale, andando a ricoprire significative quote di mercato.
L'elevata versatilità delle batterie al litio permette il loro impiego in vari campi di utilizzazione: computer, cellulari, macchine fotografiche; ovunque sia richiesto un piccolo ingombro ed elevata autonomia è impiegata questa soluzione.

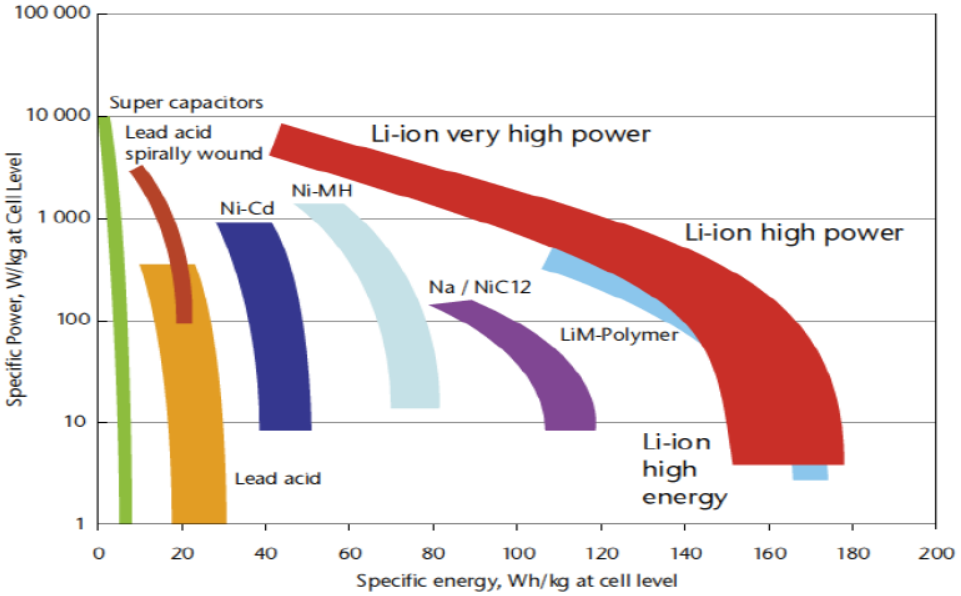


Figura 3.2: Confronto tra diverse tipologie di accumulo elettrico [38]

L'elevata efficienza energetica, il basso valore di auto-scarica e l'elevata densità di potenza hanno contribuito all'impiego delle batterie litio-ione ad essere la soluzione più diffusa nella trazione delle macchine elettriche, sostituendo le batterie al piombo e Nichel-Cadmio.
Un vantaggio di questa tipologia di celle, rispetto alle tecnologie di batteria ricaricabili impiegate in passato, è che non presentano un effetto memoria: ciò permette una gestione più semplificata del ciclo di vita della batteria adattandosi meglio alle esigenze delle auto elettriche.
Le batterie litio-ione sono inoltre capaci di poter sopportare cariche e scariche profonde con correnti elevate, questo significa che possono cedere gran parte dell'energia accumulata in breve tempo e possono essere caricate molto velocemente, a parità di potenza la stessa potenza può essere fornita da celle con capacità più piccola. Aspetto negativo comune a tutti i tipi di batteria è la riduzione della loro capacita con il tempo [8]. La vita utile di una batteria è direttamente collegata al numero di cicli di carica/scarica, per le tecnologie attuali di batterie litio-ione vengono garantiti per circa 1000 cicli. Tale fattore è influenzato non solo dall'età della batteria ma anche dallo sfruttamento e dalle condizioni di lavoro in cui viene fatto lavorare. Un altro aspetto negativo delle celle al litio-ione è il fatto che risultano essere pericolose, in certe situazioni possono anche esplodere. Per questo motivo il loro funzionamento deve essere monitorato e contenuto nei range di limiti prescritti. Per questo motivo i costruttori riportano nei datasheet delle batterie i valori limiti che non devono essere superati: limite termico, il range di temperatura consigliato è da 0 a 55 [°C], i limiti di tensione minima e massima, valori tipici sono 2,7 [V] e 4,2 [V]. Un ulteriore svantaggio legato alle batterie al litio è che necessitano di un controllo più accurato rispetto ad altre soluzioni tecnologiche di batteria. Esistono diverse tecniche di controllo per la carica delle batterie al litio: a corrente costante, a tensione costante, a potenza costante

o miste. La tecnica di controllo a corrente costante (CC) consiste nell'alimentazione da parte di un dispositivo capace di mantenere la corrente in ingresso costante per tutto il tempo della ricarica [27].
Quando la corrente di alimentazione risulta essere elevata, lo stato di carica della batteria cresce velocemente ma arrivati ad un certo valore di SOC deve essere interrotta per preservare l'integrità delle celle. L'alimentazione mediante basse correnti invece, produce una dilatazione dei tempi di ricarica ma permette di raggiungere uno stato di carica maggiore.
La tecnica di controllo a tensione costante (CV) prevede di alimentare la batteria mediante un dispositivo capace di fornire una tensione ai morsetti costante per tutto il tempo di ricarica. Inizialmente la corrente assorbita dalla batteria risulta essere molto elevata, ma man mano che si carica la corrente diminuisce fino a raggiungere un valore limite che termina il processo di ricarica.

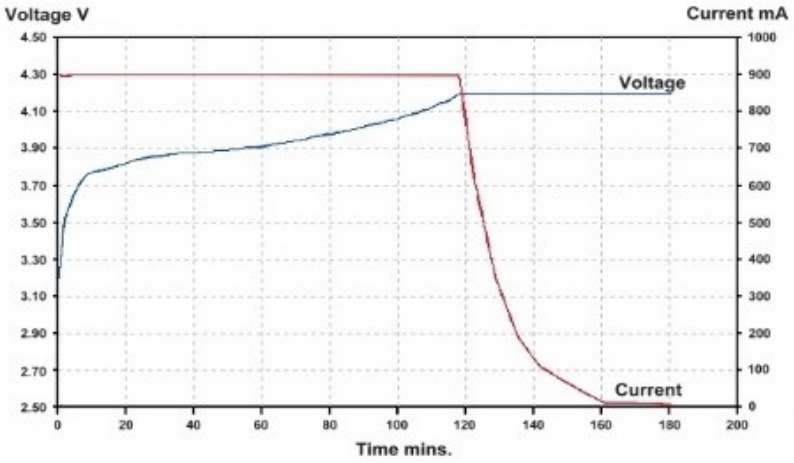


Figura 3.3: Andamento della tensione e della corrente quando è applicato un controllo corrente-costante seguito da uno a tensione costante (CC-CV)

Esistono tecniche di controllo di ricarica miste in cui sono presenti entrambe le tipologie appena descritte. In letteratura, oltre a quelli citati, sono presenti anche altri tipi di controllo, ad esempio quello ad impulsi di correte in cui la batteria viene caricata mediante impulsi che permettono un rilassamento temporaneo dopo ciascun picco, migliorando così la vita della batteria. Impulsi troppo elevati però potrebbero causare l'effetto opposto e gravare sulle prestazioni della batteria. Per questo motivo è stata sviluppata la tecnica basata sull'onda di corrente Reflex [27], dove gli impulsi non variano tra 0 e il valore massimo ma è un'onda a gradini.
Per quanto riguarda le batterie al litio la tecnica più utilizzata è quella mista in cui, la prima parte della ricarica avviene a corrente costante, mentre la seconda mantiene costante tensione [38]. Questa tecnica permette di ridurre al minimo il tempo di ricarica garantendo la completa carica della batteria.
Considerando le curve tensione-stato di carica, relative a ricariche avvenute con correnti costanti differenti, quello che si nota è che la tensione limite ai morsetti della batteria viene raggiunta in corrispondenza di soc differenti. [42]

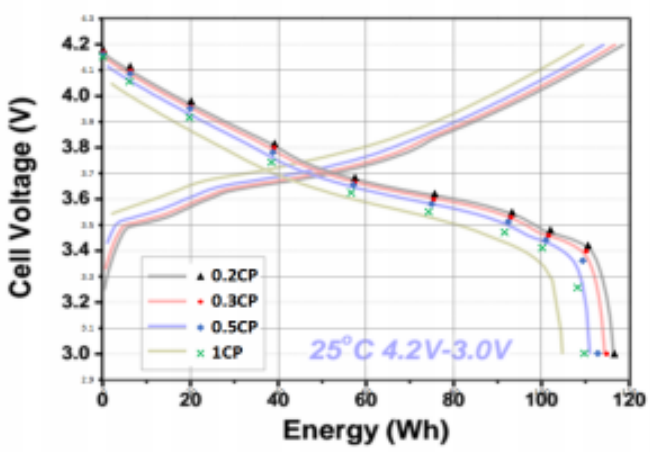


Figura 3.4: Carica e scarica della batteria a diversi valori di corrente [48]

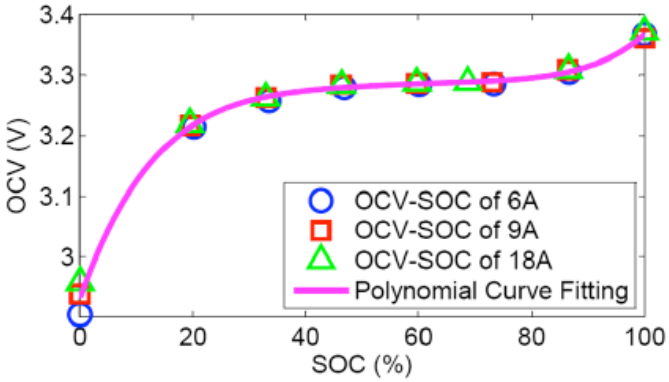


Figura 3.5: Relazione tensione a vuoto (OVC) e SOC [48]

Nel grafico della tensione a vuoto della batteria (open circuit voltage OCV),indicata in seguito come Voc,però, si nota una contrapposizione con quanto descritto. Si osserva infatti è che, indipendentemente dalla corrente di carica, la tensione limite viene raggiunta quando il soc è al 100%. Questo fatto è dovuto alla presenza dei paramenti parassiti come la resistenza interna che provocano una traslazione della curva Voc, dal grafico 3.5 si deduce quindi che la tensione Voc risulta essere direttamente legato allo stato di carica. In prima approssimazione si può scrivere:

$$V_{cella} = V_{oc} - R * I_{cella} \tag{3.3}$$

Ne deriva quindi che, durante la fase di ricarica la tensione ai capi della cella risulta essere maggiore della tensione a vuoto, mentre è minore durante la fase della scarica. in particolare, come si evince dal grafico 3.4, una corrente elevata producendo una magiore caduta di tensione sui componenti parassiti, fa si che si la tensione ai capi della cella raggiunga prima il valore della tensione limite che nel caso di basse correnti.

3.3 Infrastrutture di ricarica

La Commissione Europea ha individuato la necessità della presenza di una standardizzazione per quanto riguarda i veicoli elettrici, in modo che venga garantita la possibilità di effettuare le ricariche in ogni parte d'Europa. Come accade per le stazioni di servizio anche i punti di ricarica elettrica devono poter essere utilizzati da tutti i conducenti in ogni momento. Affinché le infrastrutture di ricarica possono essere un vantaggio per la gestione delle reti di distribuzione e non gravino sulla disponibilità di rete, è necessario sviluppare le infrastrutture secondo una logica Smart, capaci di comunicare con il centro di controllo in modo da ottimizzare l'uso dell'energia e minimizzare l'incidenza sulle linee evitando il formarsi di congestioni.
In Italia lo sviluppo della rete pubblica è definita nel Piano nazionale Infrastrutturale per la ricarica dei Veicoli (PNire)[18] alimentati ad energia elettrica che mira a realizzare, entro il 2020, una diffusione su larga scala dei veicoli elettrici. In particolare i target prevedono di installare sulla rete pubblica:

- 90.000 entro il 2020
- 110.000 entro il 2025
- 130.000 entro il 2030

In particolare il PNire individua due fasi di sviluppo della mobilità elettrica:

- Fase 1: dal 2013-2016. È detta fase di definizione e sviluppo è una fase preparatoria in cui si ha l'installazione di un numero limitato di punti di ricarica. Tale fase ha come obiettivi la definizione degli standard tecnologici del processo di ricarica (prese, modi di ricarica, protocolli di comunicazione), individuazione dei modelli di riferimento sui quali basare la diffusione delle infrastrutture di ricarica. Nella fase 1 si sviluppano progetti pilota necessari per acquisire il Know how per emanare leggi comuni e individuare le giuste politiche di incentivazione
- Fase 2: dal 2017-2020. È detta fase di consolidamento in cui vengono emanate norme Europee comuni a tutti gli stati membri, si avrà un consolidamento sia degli standard comunitari sia della rete di ricarica pubblica e l'installazione di numerosi punti di ricarica.

Per quanto riguarda lo sviluppo delle infrastrutture di ricarica, il Piano Nazionale suddivide i punti di ricarica in base alla capacità di erogazione di potenza:

- Ricarica lenta: ricarica monofase fino a 7 kW in AC
- Ricarica accelerata: superiore a 7 kW e fino a 22 kW in AC
- Ricarica veloce: superiore a 22 kW, tale soluzione comprende le ricariche a 43 kW in AC e 50 kW o superiori in CC

La direttiva Europea 2014/94/UE [14] effettua una classificazione più semplice dei punti di ricarica, in particolare definisce:

- Punto di ricarica di potenza standard: punto di ricarica che consente il trasferimento di elettricità ad un veicolo elettrico di potenza pari o inferiore a 22 kW, esclusi i dispositivi di potenza pari o inferiore a 3.7 kW, che sono installati in abitazioni private o il cui scopo principale non è ricaricare veicoli elettrici e che non sono accessibili al pubblico.

- Punto di ricarica di potenza elevata: punto di ricarica che consente il trasferimento di elettricità a un veicolo elettrico di potenza superiore a 22 kW.

Oggi la normativa di riferimento per quanto riguarda i sistemi di ricarica conduttiva dei veicoli elettrici, è la norma IEC 61851 [28], che effettua diverse classificazioni delle Eelctric vehicle supply equipments ad esempio posso essere suddivise in base al luogo di installazione, al metodo di connessione, alle caratteristiche dell'alimentazione.Inoltre la normativa specifica i modi con cui è peresso ricaricare un veicolo:

- Modo 1:è la modalità più semplice di connessione dei veicoli ad una rete di alimentazione e permette una ricarica lenta. La connessione del veicolo elettrico alla rete avviene mediante una presa di corrente standard, il modo 1 permette la ricarica fino 16 A e 250 V AC in monofase e 16 A fino a 480 V in trifase. Gli apparecchi di alimentazione dei veicoli elettrici destinati alla carica di Modo 1 devono fornire un conduttore di protezione di terra dalla spina standard al connettore del veicolo. Solitamente usata per caricare piccoli veicoli elettrici, come scooter e bici. In molti paesi, come USA e Regno Unito, tale modalità di ricarica è vietata, in Italia è permessa ma non in ambienti pubblici.

- Modo 2: La ricarica del veicolo elettrico avviene grazie al collegamento con una presa di corrente standard alla rete AC. Le apparecchiature di alimentazione EV destinate alla carica di Modo 2 vengono fornite solitamente dalla casa costruttrice del mezzo e devono fornire un conduttore di terra di protezione dalla spina standard al connettore del veicolo. Rispetto al caso precedente sul cavo di collegamento rete veicolo è presente un dispositivo detto ICCB che permette la presenza di un circuito di pilotaggio e un sistema di protezione contro le scosse elettriche. Il modo 2 permette di ricaricare il veicolo fino a 32 A e 250 V AC in monofase e fino a 32 A e 480 V AC trifase

- Permette la connessione di un EV ad una struttura dedicata (EVSE) permanentemente connessa alla rete in AC. Le apparecchiature per la ricarica in modo 3 sono fornite dal costruttire e sono di tipo standardizzato, devono fornire un conduttore di protezione e un circuito di pilotaggio tra socket-outlet e connector.

- Permette la connessione tra un veicolo elettrico alimentato in corrente continua e un dispositivo perennemente collegato alla rete. In questa configurazione i sistemi di conversione AC/DC non sono installati all'interno della macchina ma sono installati a terra nell'ESVE. Le apparecchiature per la ricarica DC sono standardizzate e devono presentare conduttore di protezione e un conduttore per il circuito di pilotaggio.

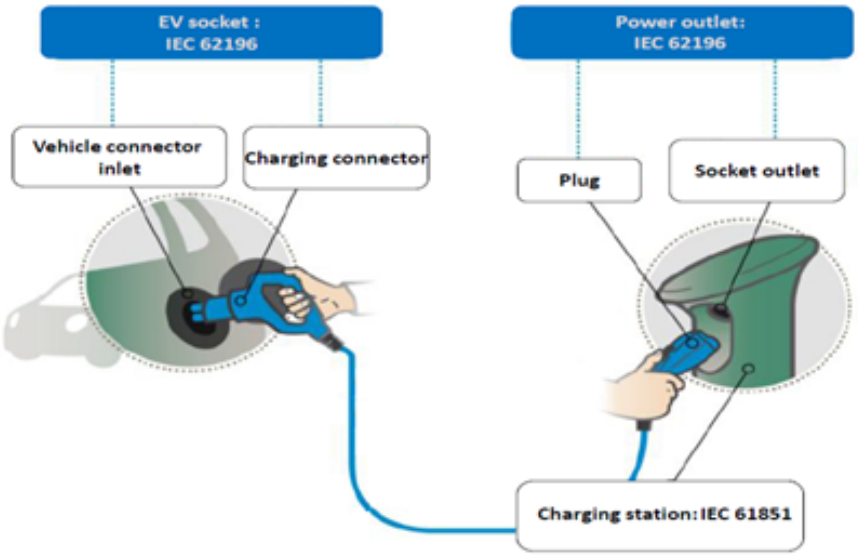


Figura 3.6: Struttura di collegamento veicolo colonnina

Gli elementi che permettono il collegamento tra veicolo e EVSE vengono specificati nella norma CEI 62192 [11].
I base alla configurazione dei sistemi di collegamento tra EV e rete, la norma IEC 61851[28] individua tre casi possibili: nel caso A il cavo di collegamento tra veicolo e rete è perennemente collegato al veicolo, si ha una configurazione cavo e Plug mobili, nel caso B il cavo di collegamento tra rete e veicolo non è solidale ne lato auto, ne lato rete, si hanno plug e charger connector mobili e nel caso C il cavo di collegamento tra veicolo e rete è perennemente collegato al EVSE.

3.3.1 Colonnine con tecnologia Enel

I prodotti sviluppati da Enel come possibili soluzioni di installazione per la ricarica elettrica, sono conformi alle specifiche riportate nella norma IEC 61851 [28]. Inoltre tutte le infrastrutture sono dotate sia di un contatore che permette l'acquisizione dei dati di ricarica, sia di un apparato di comunicazione che permette lo scambio dei dati tra infrastruttura e centro di controllo remotizzato. Le soluzioni sviluppate da Enel per la ricarica dei veicoli sono:

Wall-box soluzione detta anche box-station è la soluzione per la ricarica in ambienti chiusi come garage o parcheggi.
Le wall box possono essere suddivise in base alla potenza di allaccio:

- Box station 22 kW: Permette la ricarica trifase 400 V 50 Hz fino a 22 kW tramite una sola socket di tipo 2. Per l'acquisizione dei dati e il conteggio dell'energia fornita è installato un TA. La protezione dalle sovracorrenti, dalle dispersioni di correnti

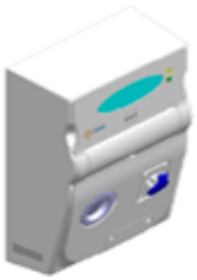


Figura 3.7: Box-station

e folgorazione è affidata ad un interruttore automatico con relè magneto-termica differenziale

- Box-station 3 [kW]: Permette una ricarica monofase 230 V 50 Hz AC fino 3,7 kW. Presenta due tipi di socket che sono gli standard usati oggi in Italia: socket di tipo 2 e socket di tipo 3a. All'interno è presente un unico contatore monofase che permette l'acquisizione dei dati, la protezione dalle sovracorrenti e dalla corrente di dispersione e folgorazione viene garantita dalla presenza l'interruttore automatico con relè magnetotermico differenziale. L'installazione di un solo contatore all'interno impedisce la ricarica contemporanea di più veicoli: le prese sono escludenti.

Lo sviluppo tecnologico e gli investimenti di e-distribuzione hanno permesso la realizzazione di diverse generazioni di wall-box le quali si differenziano per la diversa tecnologia del sistema di protezione chiamato antitamper, che impedisce manomissioni dell'infrastruttura ed eventuali frodi. Nelle wall-box 1G di prima generazione l'antitamper era di tipo meccanico ed era necessario l'intervento di un addetto per la sua richiusura. Nelle nuove generazioni l'antitamper può essere gestito a livello software da remoto poiché è di tipo elettrico. Altri cambiamenti tra le varie generazioni di box-station sono legati a cambiamenti hardware, ai sistemi di comunicazione con il centro e, soprattutto, alla riduzione del costo.

Pole station a 22 kW AC tri-fase è una delle possibili soluzioni in luoghi pubblici e all'aperto come luoghi di lavoro, strade, centri commerciali. La norma IEC 61851 [28] prescrive per tale tipi di installazione un grado di protezione minimo di IP44. Per rispondere alle esigenze di una più ampia clientela la colonnina è equipaggiata con entrambi gli socket presenti in Italia: una di tipo 3a e l'altra di tipo 2, permettendo la ricarica sia in monofase 230 V 50 Hz AC fino a 7 kW sia la ricarica tri fase 400 V 50 Hz fino a 22 kW. Come per la BOX-station anche per la pole sono state commercializzate diverse generazioni. Un cambiamento sostanziale è avvenuto dalla pole di 1G alla pole 2G. Nella pole 1G era presente un solo contatore e un solo interruttore automatico con relè di protezione magneto-termico differenziale. Tale configurazione presentava però diverse limitazioni, la prima era legata al fatto che garantiva la possibilità di effettuare una sola ricarica alla volta poiché non era possibile discriminare l'assorbimento di energia delle due prese. La

Figura 3.8: Pole

seconda era legata alla presenza di un solo interruttore automatico infatti, in caso di guasto, l'intervento della protezione portava la disalimentazione dell'elettronica e la colonnina ad essere completamente inutilizzabile. A partire dalla 2G invece, i circuiti di alimentazione delle due socket sono completamente separati, con contatore e blocco delle protezioni dedicato per la singola socket. Grazie alla presenza dei due contatori è permessa la ricarica contemporanea di due veicoli, in caso di guasto su una socket l'altra continua a funzionare e l'elettronica è continuamente alimentata. Questo ha permesso un notevole aumento dell'efficienza delle infrastrutture di ricarica.

Stazione di ricarica rapida 43 kW AC tri-fase e stazioni di ricarica rapida vengono installate lungo le autostrade o presso le stazioni di servizio, poiché permettono una ricarica in 20-40 minuti. Questo tipo di stazione è stato sviluppato in collaborazione con Renault ed è adatto principalmente alla ricarica della Renault ZOE che adotta un convertitore compatibile con queste elevate potenze. Il grado IP è 44 come richiesto dalla norma IEC 61851 [28] prescrive. In questa soluzione il cavo è perennemente attaccato alla colonnina (caso C) e è presente il connettore di tipo 2 che permette la ricarica tri fase 400 V 50 Hz fino a 43 kW.

Multistandard viene installata solitamente in luoghi pubblici come autostrade e stazioni di servizio, poiché permettono ricariche molto veloci. Grazie alla sua tecnologia interna è possibile effettuate la ricarica contemporanea di più veicoli e permette l'alimentazione sia di veicoli in AC sia di in DC; è presente quindi all'interno della stazione di ricarica un convertitore di grandi dimensioni poiché permette la conversione di elevate potenze. Le dimensioni, molto maggiori rispetto alle altre soluzioni, sono dovute alla presenza dei sistemi di conversione AC/DC. La Multistandard di prima generazione è detta EFRP1G-quartetto, sviluppata in collaborazione con una ditta esterna, grazie alla presenza di 3 contatori interni permette la ricarica contemporanea di tre veicoli 1 veicolo DC Chademo

Figura 3.9: Stazione di ricarica rapida 43 kW

o Combo 50 kW (120 A) e 2 veicoli in AC mediante ricarica a 43 kW (63 A) e 22 kW (32 A). La potenza di installazione richiesta per il funzionamento contemporaneo delle 3 macchine è 120 kW. La multistandard di seconda generazione, molto più leggera e meno ingombrante della precedente grazie alle migliorie tecniche apportate dalla tecnologia Enel come l'impiego di MOSFET al carburo di silicio e non IGBT nel convertitore. La presenza di soli due contatori all'interno limita il numero di ricariche contemporanee. Sono commercializzati due modelli il primo detto EFRP2G-trio 43 kW e il EFRP2G-trio 22 [kW] entrambi permettono la ricarica tramite Connector Chademo o Combo 50 [kW] (120A) ma si differenziano per quanto riguardala ricarica in AC, nel primo caso è possibile caricare fino a 43 kW (63 A) nel secondo caso tramite connector AC si carica solo fino a 22 kW.

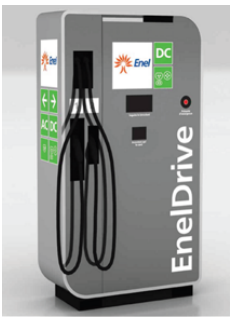


Figura 3.10: Stazione di ricarica Multistandard

All'interno delle colonnine di Enel sono presenti due sistemi che collaborano e scambiano informazioni tra di loro:

- CP:è un sistema di controllo, sviluppato dal costruttore delle colonnine, ha il compito di gestire l'elettronica all'interno del EVSE. Attraverso l'invio di segnali elettrici permette il monitoraggio e la diagnostica delle diverse parti: prese, interruttor, sensori; si occupa inoltre della comunicazione tra EVSE e il veicolo.

- CM: sistema elettronico che permette lo scambio dati dal campo al centro di controllo. Tutte le operazioni svolte dal CP vengono memorizzate e successivamente inviate all'operation center, le eventuali anomalie vengono convertite in allarmi più o meno gravi.

3.4 Connettori

Per permettere lo sviluppo delle auto elettriche, ed evitare ulteriori complicazioni alla diffusione di questo modello green di trasporto, lo sviluppo della standardizzazione dei connettori di ricarica è sicuramente uno dei punti nevralgici che deve essere affrontato.
La norma IEC 61851 [28] ammette la ricarica privata dei veicoli mediante una comune presa domestica come la Schuko o presa industriale da 16 A; tali prese però non permettono il trasferimento di elevate potenze e risultano poco idonee a carica grandi quantità di energia.
La necessità di poter ricaricare in stazioni pubbliche e ridurre i tempi di ricarica, ha spinto le case automobilistiche a realizzare connettori dedicati per la ricarica dei veicoli. Questi dispositivi permettono non solo di sopportare correnti maggiori, riducendo così i tempi di ricarica, ma di realizzare funzioni addizionali di regolazione e protezione richiesti dalle norme per i modi di ricarica modo 3 e modo 4.
Oggi gli standard per i connettori elettrici per i veicoli sono definiti dalla IEC 62196 [11] , che ammette la presenza di tre connettori in AC e 2 tipi di connettori per la ricarica in DC, complessivamente gli standard si dividono in:

- Tipo 1
- Tipo 2
- Tipo 3
- Tipo 4

Tipo 1: Yazaki (SAE J1772) Connettore sviluppato negli USA e in Giappone, è presente come soluzione per l'accoppiamento lato veicolo Vehicle connector-inlet. È stato proposto dalla Society of Automotive Engineers (SAE) nel 2009 come evoluzione di precedente connettore. Permette la ricarica solo monofase, la norma 62196 prescrive che per tale tipo di connettore non debbano essere superati i seguenti limiti di 32 [A] e 250 [V] e grado di protezione IPXXB. Presenta 5 pin:2 pin di potenza (fase e neutro) , 1 pin per il conduttore di trotezione e 2 pin ausiliari proxmity e circuito di pilotaggio.

Tipo 2: Mennekes Connettore mennekes, introdotto dalla omonima casa tedesca nel 2009, è uno degli standard Europei, sviluppato soprattutto in Germania. Viene installato sia per l'accoppiamento lato EVSE Plug and socket-outlet sia come soluzione per l'accoppiamento lato veicolo vehicle connector-inlet. Permette la ricarica sia trifase che monofase, in particolare la norma 62196-2 [11] prescrive che non vengano superati i 70 A e 250 V nel caso di ricarica monofase e i 63 A e 480 V per il caso trifas, grado di protezione IPXXB.

Presenta 7 pin: 4 pin di potenza (3 fasi e neutro),1 pin per il conduttore di protezione, 2 pin ausiliari proxmity e circuito di pilotaggio.

Tipo 3a: scame viene installato sia per l'accoppiamento lato EVSE Plug and socket-outlet, sia come soluzione per l'accoppiamento lato veicolo vehicle connector-inlet. Permette solo la ricarica monofase, la norma prescrive che non vengano superati i limiti di 16 A e 250 V e grado di protezione IPXXD sulla presa Presenta 4 pin:2 pin di potenza (fase e neutro), 1 pin per il conduttore di protezione e 1 pin ausiliario per il circuito di pilotaggio.

Tipo 3b Connettore non impiegato in Italia. Permette solo la ricarica monofase, la norma prescrive che non vengano superati i limiti di 32 A e 250 V. Presenta 5 pin:2 pin di potenza (fase e neutro) , 1 pin per il conduttore di trotezione e 2 pin ausiliari proxmity e circuito di pilotaggio.

Tipo 3C Connettore non impiegato in Italia, mentre è molto diffuso in Francia. Permette la ricarica monofase e trifase, la norma prescrive che non vengano superati i limiti di 63 A e 480 V. Grado di protezione IPXXD, poiché vi è la presenza di dispositivo shutter contro il contatto accidentale di parti in tensione. Presenta 7 pin: Presenta 7 pin: 4 pin di potenza (3 fasi e neutro),1 pin per il conduttore di protezione, 2 pin ausiliari proxmity e circuito di pilotaggio.

Tipo 4: ChadeMO System A Connettore per la ricarica veloce, sviluppato in Giappone nel 2009, è stata una delle prime soluzioni sul mercato a permettere la ricarica rapida in corrente continua. Nonostante l'elevata diffusione in tutto il modo, è stato riconosciuto come standard ufficiale per la ricarica rapida in corrente continua solo pochi anni fa. La configurazione per la ricarica in DC è sempre il caso C, dove il cavo e vehicle connector sono mobili. Per i connettori in modo 4, cioè DC, si fa riferimento alla norma 62196, la certificazione Chademo stabilisce i limiti massimi di 500 V e 200 A per le ricariche utra rapide, e 500 V e 80 A per le ricariche rapide. Presenta 10 pin:2 pin di potenza, 7 pin di connessione CAN-BUS per la comunicazione regolamentata dalla 61851 e 1 pin per il conduttore di protezione.

Tipo 4: Combo 1 Connettore per la ricarica veloce, detto anche connettore universale, è stato sviluppato dall SAE nel 2012, infatti è molto sviluppato nel USA. Montato come inlet sui veicoli permette sia la ricarica tramite connettore TIPO 1 sia la ricarica in DC. Presenta 7 pin: 2 pin per la ricarica DC, 2 pin per la ricarica AC,1 pin per il conduttore di protezione e 2 pin ausiliari proxmity e circuito di pilotaggio.

Tipo 4: Combo 2 System C Connettore per la ricarica veloce: sviluppato in Germania per l'alimentazione tramite modo 4, la configurazione scelta è sempre il caso C, dove il cavo e vehicle connector sono mobili. Soluzione impiegata per l'accoppiamento lato veicolo Vehicle connector-inlet. Va osservato che l'inlet presenta molti più pin rispetto al connector(non riportato in figura)poichè permettere al veicolo di caricarsi sia in AC che

in DC.
Infatti, la maggior parte dei veicoli alimentati in DC, utilizzano il convertitore bidirezionale della power train per ricaricare le batterie. Questa soluzione permette di risparmiare peso e spazio garantendo elevata flessibilità all'auto che può ricaricare su colonnine multistandard, infrastrutture domestiche o pole station.
Connector combo2 presenta 5 pin: 2 pin per la ricarica in DC, 1 pin per il conduttore di protezione e 2 pin ausiliari proxmity e circuito di pilotaggio.
Inlet combo2 presenta 9 pin: 2 per la ricarica in DC, 4 pin per la ricarica in AC (3 fasi e neutro), 1 pin per il conduttore di protezione e 2 pin ausiliari proxmity e circuito di pilotaggio.

Proximity Function

La proximity function, che viene svolta da dispositivi elettrici o meccanici, indica lo stato di inserzione del connettore nell'inlet del veicolo o del plug nella socket-outlet della stazione di ricarica EV.
Le diverse soluzioni standardizzate di accoppiamento lato veicolo e lato EVSE possono presentare essenzialmente due tipi di circuito proximity, a seconda che individuino o meno la portata del conduttore oltre allo stato di inserzione.
Se è in grado di fornire entrambe le informazioni, come il connettore tipo 2, una volta inserito correttamente vengono attivati appositi sistemi di bloccaggio che impediscono lo scollegamento esterno durante la carica. Solamente dopo la richiesta da parte dell'utente di fine ricarica, l'EVSE comanda l'apertura dei sistemi permettendo la rimozione del connettore. La determinazione della portata del cavo avviene mediante la lettura della resistenza posta tra il conduttore di protezione e il contatto di proximity (PP). Ad ogni valore di resistenza la norma IEC 61851 ([28]) associa un valore massimo di corrente. Se la corrente assorbita dalla macchina è maggiore della corrente massima sopportata dal cavo, EVSE deve staccare l'alimentazione del veicolo. Si riporta il circuito di pilotaggio completo mettendo in evidenza le diverse parti che permettono il collegamento EVSE-EV.

a	cavo di collegamento
b	accoppiamento lato veicolo
c	connettore veicolo
d	inlet veicolo
e	circuito elettrico veicolo
f	alimentazione AC veicolo
g	collegamento alla carcassa del veicolo
h	circuito di proximity
i	plug
j	socket-outlet
Rc	resistenza identificativa della portata del cavo riportata in A.4

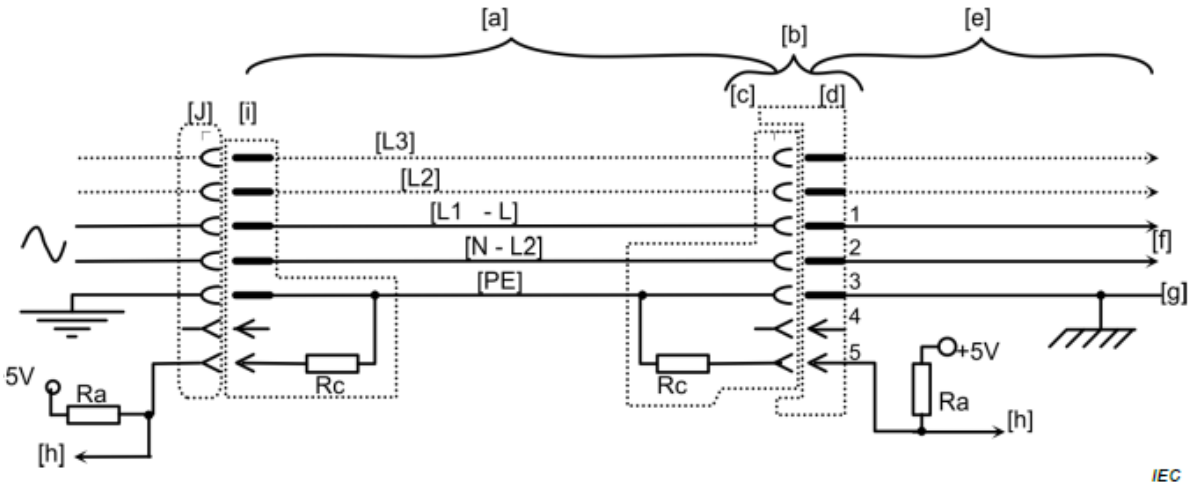


Figura 3.11: Schema del circuito equivalente per rilevazione di prossimità e codifica di corrente [28]

Circuito di pilotaggio

Durante la ricarica l'EVSE, attraverso specifiche funzioni di pilotaggio, ha il compito di verificare il corretto funzionamento delle operazioni. Le verifiche avvengono mediante l'invio del segnale pilota di controllo sul circuito che si estende dalla EVSE fino all'interno della macchina, detto circuito di pilotaggio. Le funzioni pilota sono:

- verifica del corretto collegamento tra EVSE-cavo-veicolo. L'accoppiamento si considera corretto, e quindi può essere attivata la ricarica, solo se vi è continuità nel circuito di pilotaggio

- monitoraggio della continuità elettrica del conduttore di protezione. Se la ricarica avviene con modo due è compito dell'ICCB effettuare il controllo, ma la continuità elettrica viene testata solo sul tratto tra ICCB e il veicolo, tralasciando eventuali anomalie a monte. Nel caso invece di modo di ricarica 3 e 4 il monitoraggio della continuità elettrica avviene su tutto il tratto di collegamento tra l'allaccio alla rete e il veicolo. Se non ci è continuità viene meno la sicurezza dell'utente e il sistema non risulta essere a norma, per questo L'EVSE è chiamato a staccare l'alimentazione del veicolo in 100 ms. In caso di corto-circuito tra conduttore di protezione e CP o quando non è possibile verificare la continuità del circuito di pilotaggio l'EVSE è chiamato a staccare l'alimentazione entro 3 s.

- creazione della comunicazione tra la colonnina e la macchina. Mediante apposito segnale di PWM viene inviato al veicolo il valore massimo di corrente che può essere prelevata senza che siano superati i vincoli di sovracorrente. Se questo valore viene superato l'EVSE può staccare l'alimentazione. La tolleranza complessiva indicata

nella norma, comprendente l'incertezza sul segnale di PWM e la tolleranza sulla misura di corrente assorbita dal veicolo, è del 15%.

Secondo la normativa, il generatore PWM montato sulla EVSE deve generare un segnale di tensione con valori ± 12 V e con una frequenza del segnale di 1 kHz. L'ampiezza relativa allo stato alto del segnale è proporzionale al valore massimo di corrente secondo quando riportato nella tabella. In base al tipo di veicolo sono possibili due tipi diversi di circuito di pilotaggio: semplificato e completo.

Circuito di pilotaggio completo Si trova ormai in quasi tutti i veicoli e si differenzia dal circuito precedente per la presenza di un interruttore comandato (S2) con logica interna che ha la funzione di segnalare eventuali anomalie interne alla macchina e il completamento del livello di carica. Grazie alla presenza dell'interruttore si viene a generare uno stadio intermedio a +9 V (stato B) tra lo stato A e o stato C. I veicoli che utilizzano un circuito di pilotaggio completo devono essere capaci di interpretare il segnale di pilotaggio secondo la tabella.
Il generatore di segnale interno all'EVSE genera, nel caso di corretto funzionamento, un valore di tensione ai suoi capi di +12 (Vg), detto stato A. Quando un veicolo viene collegato, il circuito di pilotaggio si chiude grazie al collegamento EVSE-cavo-macchina e la tensione Va cambia il suo valore passando da +12 V a +9 V, detto Stato B. Nel momento in cui la macchina comanda la chiusura dell'interruttore comandato, la resistenza complessiva lato veicolo diminuisce e la tensione Va passa da +9 V ad un valore di +6 V, detto stato C. Quando è presente lo stato C e il segnale di pilotaggio diventa un'onda quadra, l'EVSE abilita la chiusura dell'interruttore di alimentazione. Il veicolo è quindi agganciato alla rete e assorbe corrente, pure rispettando sempre il vincolo della corrente massima.
Quando la macchina è carica allora la corrente assorbita si riduce e l'interruttore S2 viene aperto. Questo produce il passaggio dallo stato C allo stato B. La colonnina apre dunque l'interruttore di rete, disalimentando il veicolo e permettendo lo scollegamento del connettore che ristabilirà lo stato A nel circuito di pilotaggio. Un caso particolare previsto dalla norma è il comando di stand-by momentaneo della macchina. In questo caso il PWM viene portato ad un valore di 100% e cioè il segnale diventa continuo a 6 V. La macchina entro un certo tempo deve adeguarsi riducendo a zero la corrente assorbita. Per quanto riguarda i tempi e avvenimenti particolari si riporta nell'allegato tutte le possibili configurazioni previste dalla norma IEC 61851 [28] A.2

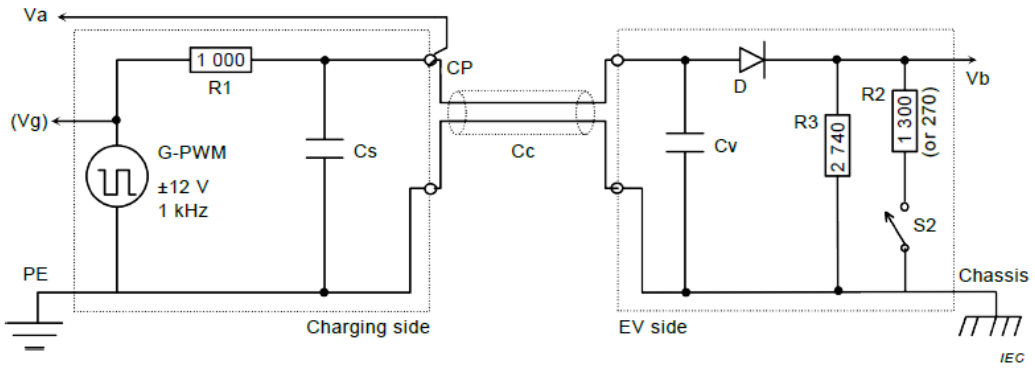


Figura 3.12: Schema equivalente del circuito pilota di controllo [28]

$G - PWM$	generatore del segnale PWM per le funzioni pilota
Va	tensione del circuito pilota in uscita dall'EVSE
Vg	tensione interna del generatore di segnale PWM
R1	resistenza interna definita nella Tabella A.1
Cs	capacità interna alla colonnina definita nella Tabella A.1
R2	resistenza in serie a S2 definita in Tabella A.2
R3	resistenza lato veicolo definita in Tabella A.2
Cv	condensatore lato veicolo definito in Tabella A.2
Vb	misurazione del veicolo di tensione, frequenza e duty cycle plug
CP	contato pilota di controllo
Chassis	connessione allo Chassis del veicolo
S2	interruttore di comando del veicolo

Circuito di pilotaggio semplificato Si trova principalmente sui veicoli di piccola dimensione, mentre è sconsigliato nei veicoli di potenza elevata. In alcuni paesi, come gli Stati Uniti tale soluzione è vietata a causa dell'assenza del conduttore di terra. Una vettura che utilizza questo circuito assorbe una corrente massima di 10 A in monofase senza essere in grado di interpretare alcun valore di PWM.
Questi veicoli elettrici non presentano nessun dispositivo che permetta la comunicazione con la colonnina, questo fa sì che vengano visti dalla rete come semplici carichi. Il generatore di segnale all'interno dell'EVSE, se non rileva anomalie interne, genera un segnale costante di tensione di +12 V (Vg), detto stato A. Quando viene collegata la macchina all'EVSE la tensione Va passa a +6 V, detto stato C. L'interruttore di alimentazione viene chiuso solo quando sono presenti sia il segnale PWM sia lo stato C.
Quando il veicolo è completamente carico, la corrente assorbita si annulla, seppur rimanendo collegato alla rete. Quando si interrompe la ricarica e viene disinserito il connettore lato veicolo, la tensione Va torna allo stato A. Per comandare lo stand-by momentaneo della macchina, a causa della mancanza di interpretazione del circuito di pilotaggio del

veicolo, viene aperto sotto carico l'interruttore di alimentazione. Questa operazione provoca un degrado del dispositivo. È quindi preferibile adottare il circuito pilota completo che risulta essere più sicuro.

Detrminazione della corrente massima La determinazione della corrente massima è un'operazione importante poiché eventuali correnti di sovraccarico potrebbero surriscaldare troppo gli elementi.
La logica interna alla colonnina (CP), unico attore di questa operazione, per poter comandare il giusto valore di PWM effettua un confronto scegliendo il minino tra i valori massimi:

- Massima corrente supportata dal cavo
- Massima corrente fornita dal centro di controllo
- Massima corrente della protezione magnetotermica. Tale valore di corrente cambia in base alla temperatura percepita dai sensori interni alla colonnina
- Corrente massima di configurazione. Questo valore tiene conto dell'eventuale riduzione di corrente nel caso in cui l'allaccio alla rete sia di potenza limitata rispetto al valore nominale della colonnina.
- Corrente nominale della socket-outlet

L'EVSE trasforma il valore scelto in un segnale di PWM secondo la tabella A.3 . Tutti passaggi di stato prima descritti e le eventuali operazioni svolte dalla logica della colonnina vengono memorizzate e inviate al centro di controllo che gestisce l'intera infrastruttura di ricarica.

Capitolo 4

La visione della mobilità elettrica in Enel

Nel 2010 l'AEEGSI ha promosso e finanziato progetti pilota necessari per sviluppare e individuare la migliore strategia per sviluppo di una rete infrastrutturale di ricarica dei veicoli elettrici sul territorio nazionale. Fin da allora E-Distribuzione ha deciso di investire nell'elettrificazione dei trasporti vedendo nella mobilità elettrica una reale soluzione per innovare la gestione della rete di distribuzione e promuovere uno sviluppo green.
In particolare, negli ultimi anni e sempre di più oggi, Enel desidera implementare un'infrastruttura avanzata in grado di massimizzare la qualità del servizio di ricarica cooperando direttamente con la rete di distribuzione. Parallelamente intende sviluppare un modello di business efficace e sostenibile nel mercato e-mobility, creando opportunità di guadagno sia per gli utenti che per i gestori. Così facendo la mobilità elettrica risulterà essere un mercato vincente in grado di sostenersi autonomamente.
Il modello di business sviluppato e promosso da E-Distribuzione nei diversi progetti intrapresi, in particolare E-Mobility e PlanGridEV, si basa sul modello DSO dove, le infrastrutture di ricarica sono completamente integrate nella rete di distribuzione e si garantisce libero accesso ai clienti e ai fornitori di energia.
Questa flessibilità del servizio avviene grazie alla presenza in ogni colonnina dello Smart Meter. Ovvero quel dispositivo capace di acquisire i dati e di metterli a diposizione degli operatori di rete in tempo reale e in remoto, trasmettendoli attraverso i canali standardizzati di comunicazione. La trasmissione dei dati può avvenire mediante la sovrapposizione di segnali ad alta frequenza sulle linee di potenza (PLC) oppure attraverso un sistema di comunicazione wireless o radio come GPRS, sistema 3G o LTE. Gli Smart Meter hanno un valore aggiunto, rispetto ai vecchi contatori elettro-meccanici, sia per il gestore della rete sia per il cliente, il quale può monitorare i consumi energetici, accedere ai servizi di tariffazione oraria e al prezzo di real-time dell'energia elettrica.
Grazie a questo un sistema completamente integrato e gestito da remoto, è possibile monitorare le ricariche e far percepire le bollette direttamente ai clienti.
Sono disponibili, al momento, tre interfacce di comunicazione per i punti di ricarica pubblici e privati. La prima permette la comunicazione sia con il cliente che con il veicolo.

Il suo ruolo è quello di identificare il cliente permettendogli di avviare, arrestare e monitorare l'intero processo di ricarica. La seconda interfaccia consente il monitoraggio in tempo reale della ricarica, fornisce l'autorizzazione ad effettuare l'operazione e trasmette i registri delle operazioni di ricarica dal campo al Clearing-House, ovvero all'Operation Center. Attraverso il Radio Frequency Identification (RFID), cioè una carta identificativa del cliente basata sulla lettura in radio frequenza, viene identificato l'utente e il contratto a lui associato. Queste informazioni possono essere utilizzate per determinare il miglior profilo di carica (in termini di potenza e tempo) tenendo conto delle tariffe contrattuali e delle condizioni della rete. La terza e ultima interfaccia tra la colonnina e il DSO si basa sulla rete Advanced Automated Meter Managemant (AAMM) e viene utilizzata per recuperare i registri di misura cumulativi dell'energia per l'addebito dell'importo.
La sinergia tra l'Cperation Center e lo Smart Meter permette di effettuare una diversificazione dei clienti ed inviare ad ogni fornitore di energia i dati delle operazioni effettuate dai propri consumatori per la ricezione delle bollette.

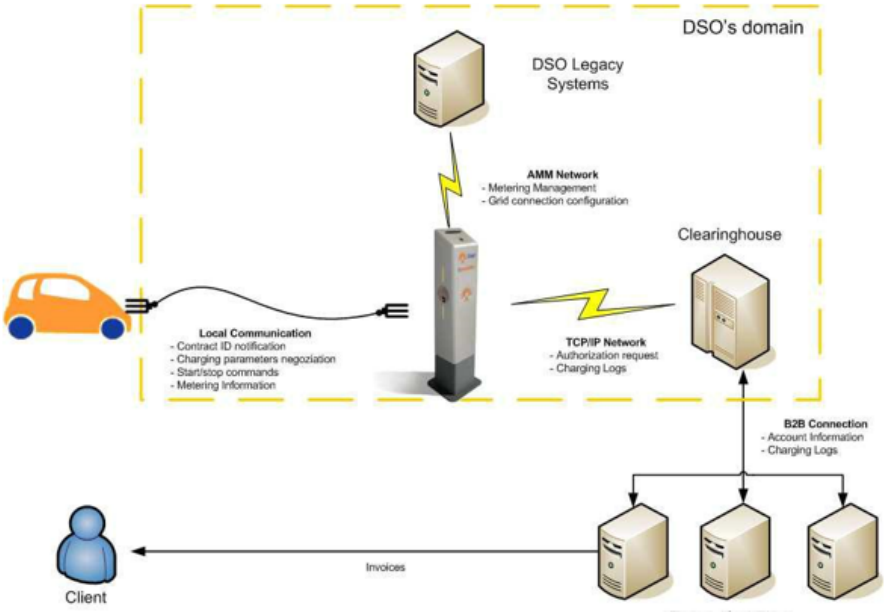


Figura 4.1: Tre sistemi di interfaccia delle colonnine Enel [46]

Questa soluzione multivendor, in cui i diversi clienti possono ricaricare liberamente su ogni colonnina scegliendo il loro fornitore, è in linea con la politica dell'AEEGSI che punta a promuove il mercato libero. Inoltre, l'infrastruttura di ricarica totalmente integrata nella rete di distribuzione è un valore aggiunto allo sviluppo delle Smart Grids. Adeguatamente gestiti, i punti di ricarica permettono infatti di minimizzare i costi di adeguamento delle reti di distribuzione e massimizzare il dispacciamento dell'energia prodotta dalla generazione distribuita.
Il modello DSO permette lo sviluppo dell'infrastruttura di ricarica, partendo dalle esigenze

della collettività e tenendo conto delle caratteristiche della rete, in modo da installare il corretto numero di stazioni per ciascun'area geografica. Altri possibili fornitori di infrastrutture di ricarica potrebbero essere: Altri possibili fornitori di infrastrutture di ricariche potrebbero essere: case automobilistiche, per la promozione e incentivazione del proprio brand ma, ad oggi solo pochi produttori, come ad esempio Tesla, hanno scelto questa strada, oppure i service prover come gestori di parcheggi, centri commerciali, distributori petroliferi che, fornendo questo servizio riuscirebbero a sodisfare un numero maggiore di clienti. Una gestione di questo tipo presenterebbe diverse problematiche in quanto lascerebbe libera scelta ai diversi SP sulla localizzazione delle nuove installazioni con il conseguente rischio di cattiva dislocazione sul territorio. Inoltre le Charge Units sarebbero disponibili solamente ai clienti che hanno stipulato un contratto con il singolo service provider. Questo modello prevede infatti che ciascuna stazione di ricarica sia installata post contatore con un allaccio alla rete intestato ad un determinato service provider senza alcuna possibilità da parte del DSO di riconoscere l'utente allacciato. Tale caratteristica, oltre a rendere impossibile lo switch tra venditori, vincola la potenza massima erogabile dalla stazione di ricarica al valore della potenza contrattuale associata all'allaccio e non consente di sfruttare a pieno i vantaggi di una gestione smart della rete.
Nonostante la politica di libera concorrenza promossa, i DSO di fatto sono i maggiori investitori di nuovi punti di ricarica e, in particolare, il progetto di E-Distribuzione, che prevede una capillare diffusione su tutto il suolo nazionale delle infrastrutture di ricarica, è la prima vera risposta alle esigenze degli utenti proprietari di auto elettriche. Un ulteriore vantaggio per i clienti deriva dalla competitività del prezzo delle ricariche rispetto ai costi degli approvvigionamenti dei carburanti tradizionali. Mentre il costo delle infrastrutture di ricarica non viene addebitato ai soli possessori di auto elettriche, ma a tutti gli utenti con contratto elettrico, riducendo così il costo percepito. Il modello DSO sviluppato da Enel prevede inoltre la possibilità di dare in gestione a terzi le infrastrutture di ricarica, che possono essere inserite come ulteriore benefit per i clienti delle società di servizio.

4.1 Progetti

Enel nell'ultimo decennio è stata sia ideatrice che collaboratrice di progetti in ambito europeo e nazionale sul tema dei veicoli elettrici, divenendo uno dei massimi colossi nel settore.
Uno dei primi grandi progetti di mobilità elettrica è stato nel 2008 E-Mobility Italy. Portato avanti in collaborazione con Daimler-Smart, ha permesso di effettuare test di verifica su 100 veicoli Smart Fortwo Electric Drive consegnati a 100 utenti campione. Il progetto prevedeva inoltre la realizzazione di oltre 400 punti di ricarica sia privati (box station) che pubblici (pole station) in tre importanti città italiane: Roma, Milano e Pisa.
Nel 2009 è partito un nuovo progetto chiamato Grid For Vehicles (G4V) che ha visto coinvolti i principali operatori della distribuzione europea (EDF, EDP, Endesa, Rwe e Vatterfall) oltre ai maggiori atenei europei. Il progetto ha testato oltre 200 reti con differenti strategie di ricarica e differenti livelli di penetrazione dei veicoli elettrici permettendo di modellizzare strumenti analitici in grado di guidare lo sviluppo tecnologico, ottimizzare

le infrastrutture di rete e sfruttare i potenziali che le auto elettriche posso offrire alle Smart Grids. Il progetto si è concluso a Bruxelles il 30 giugno 2011 con la presentazione di una Roadmap tecnologica per il 2020.
Nel 2011 la Commissione Europea si fa promotrice del progetto Green Emotion che mira a cercare di uniformare gli standard e le realtà presenti nei vari stati e ad offrire ai decision markers modelli di riferimento per la mobilità elettrica in Europa. E- distribuzione grazie alle competenze acquisite è stata chiamata a collaborare ai lavori tecnici di ricerca, ad occuparsi della progettazione e dello sviluppo dell'infrastruttura di ricarica italiana e a coordinare i progetti sperimentali sul territorio nazionale.
Sempre nel 2011 prende avvio Il progetto P.R.I.M.E. (Progetto di Ricarica Intelligente per la Mobilità Elettrica) di concerto con il Ministero dell'Ambiente e in collaborazione con le Università di Pisa e del Salento. Il progetto, utilizzando la piattaforma sviluppata per E-Mobility Italy, ha lo scopo di valutare i benefici ambientali, energetici e ed economici dell'utilizzo dei veicoli elettrici, monitorando i consumi di energia elettrica e individuando delle best practices amministrative e regolamentari.
Mobincity è un'altra sperimentazione che prende avvio nel 2012 a cui ha partecipato E-Distribuzione con altri 4 paesi europei: Spagna, Francia, Croazia e Slovenia. Scopo del progetto è stato quello di rivedere la struttura organizzativa del trasporto pubblico, responsabile di un quarto delle emissioni di CO_2 nel settore dei trasporti, con l'impiego di FEV (Fully Electric Vehicles), veicoli completamente elettrici. Analizzando i dati delle caratteristiche e dell'utilizzo dei veicoli e delle infrastrutture di rete, si sono sviluppati algoritmi evoluti per la ricarica intelligente necessaria a minimizzare gli impatti sulla rete e a sfruttare appieno l'integrazione delle rinnovabili. In questo progetto Enel si è avvalsa della collaborazione dell'Università di Roma Sapienza, in particolare della Start Up Ares2T.
Nel settembre 2013 E-Distribuzione aderisce al programma Freemoby che si prefigge di implementare l'uso di veicoli privati e commerciali a basso costo e alte prestazioni. Nello stesso anno partecipa a PlanGridEV, un progetto europeo sostenuto da un consorzio di case automobilistiche, operatori energetici ed istituti di ricerca di 9 paesi. Grazie alla collaborazione di questi 12 partner, per la prima volta si è utilizzato un algoritmo di Smart Charging per la modulazione della ricarica delle macchine. L'Advanced Distribution Management System (ADMS), mediante un'analisi dei flussi di potenza della rete, forniva una possibile curva di carico che le colonnine dovevano seguire per ridurre al minimo le sollecitazioni della rete. Questo progetto è stato uno tra i primi in cui le macchine contribuivano attivamente alla stabilità della rete. Nel gennaio 2017 prende avvio il progetto EVA+ (Electric Vehicles Arteries in Italy and Austria) che durerà fino al 2020, una sperimentazione che permetterà agli automobilisti di veicoli elettrici di effettuare viaggi anche su tratte autostradali austro-italiane. Il progetto prevede l'installazione di 200 colonnine di ricarica veloce "multistandard" lungo l'asse autostradale tra l'Italia e l'Austria, 180 in territorio italiano e 20 su quello austriaco. Le colonnine su suolo italiano sono del tipo Fast Recharge plus e permetto una ricarica simultanea di 2 veicoli in 20 minuti. Nel progetto, co-finanziato dalla Comunità Europea, sono coinvolte le principali case automobilistiche produttrici di auto.

Figura 4.2: Struttura Advanced Management System

4.1.1 Accordi con altri distributori ed enti locali

Nel 2011 Enel, grazie all'accordo con Hera e Iren, ha realizzato il primo progetto Europeo in cui il caso studio preso in esame riguardava un'intera regione. Nelle principali città e lungo i crocevia dell'Emilia-Romagna sono state installate 125 infrastrutture di ricarica. Mediante l'adozione della medesima tecnologia e l'impiego di un unico Operation Certer, l'Electric Mobility Management System (EMM), ha permesso a tutti i cittadini di poter ricaricare i loro veicoli indipendentemente se la colonnina fosse di ENEL, Hera o Iren. Questo progetto è stato il primo a mostrare che, mediante l'adozione di uno standard unico, è possibile realizzare effettivamente una rete unificata in cui operano più stakeholder. Nel 2012 è stato siglato con Acea un accordo che ha previsto l'installazione di 200 colonnine nel comune di Roma e nella cintura metropolitana della capitale gestite nuovamente con più stakeholder su un'unica rete.
Nell'ottobre 2013 è stato siglato un accordo tra E-Distribuzione, l'azienda distributrice locale ASM Terni, il Comune di Terni e la Regione Umbria che ha permesso la realizzazione di un'infrastruttura di 50 colonnine, dislocate in 15 comuni limitrofi, interoperabili tra di loro. I Comuni hanno promosso importanti strategie per incentivare lo sviluppo del progetto e dell'auto elettrica, come il permesso gratuito per accedere alle zone ZLT, il car sharing, le navette elettriche per i tour turistici e i parcheggi gratuiti per le autovetture elettriche.
Nello stesso anno è stato siglato un accordo tra Enel e la Regione Liguria che prevede di dotare 16 Comuni liguri di infrastrutture di ricarica per auto elettriche. Il progetto che vede il coinvolgimento dell'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT), è il primo in Italia ad

utilizzare infrastrutture di ricarica V2G.
La citta di Firenze è stata dotata di 4 Fast Charge ad uso del parco taxi della città, il processo di ricarica verrà gestito tramite EMM. La città di Siena ha installato nel capoluogo e in comuni limitrofi infrastrutture di ricarica su modello DSO per salvaguardare il patrimonio artistico oltre che per il benessere dei suoi cittadini e dei numerosi turisti che vi soggiornano.
Sul territorio dell'Aquila è presente un progetto "l'Aquila smart City" finanziato dal comune tramite fondi assegnati dal CIPE per la ricostruzione dopo il sisma del 2009. La collaborazione tra ENEL, comune e ufficio speciale per la ricostruzione ha portato alla implementazione della rete in ottica smart grid e la realizzazione di 39 infrastrutture di ricarica.
Enel ha firmato nel 2013 un protocollo di cooperazione col comune di Lecce che prevede l'installazione di punti di ricarica nelle zone strategiche della città integrato anche da progetti di car sharing, e car rental elettrici, navette elettriche per turisti, consegna merci a basso impatto ambientale nel centro storico. Analogo provvedimento è stato attuato anche nel comune di Brindisi.
Le brevi distanze tra i comuni salentini ha favorito il progetto rendendo possibili gli spostamenti anche con l'aeroporto e la città di Bari, il primo polo a dotarsi di infrastrutture di ricarica nel Mezzogiorno.

4.1.2 Accordi con le aziende

Sempre nell'ottica di progetti di mobilità sostenibile e innovativa Enel ha firmato un protocollo d'intesa con Poste Italiane; il progetto, sperimentato dapprima a Pisa, é stato esteso alle sedi di molti comuni italiani con l'installazione di 400 infrastrutture a doppia presa e un parco macchine di circa 1000 veicoli.
Enel ha stipulato anche un accordo con IKEA che prevede la presenza nei parcheggi delle città dove la rete elettrica è gestita da e-distribuzione, di due colonnine per la ricarica simultanea di 4 automezzi.
Lungo le aree di servizio ENI, poste su strade extra-urbane e/o superstrade, sono state posizionate stazioni FAST Charge, che permettono tempi di ricarica molto più brevi rispetto alle colonnine convenzionali. Il 4 febbraio 2015 è stata installata la prima stazione fast charge nell'Eni-station a Roma.
Il progetto è stato esteso anche al Comune di Pomezia che è divenuto il primo "ponte elettrico" con la Capitale, riducendo le distanze dei punti di ricarica; si è provveduto all'installazione di 4 colonnine in punti strategici che tenessero conto dell'intenso traffico dovuto al polo industriale e agli spostamenti verso le località marine adiacenti.
Sempre nell'ottica di una più incisiva e capillare introduzione della mobilità elettrica sono stati stipulati accordi con le società di autonoleggio Herz e Maggiore; la prima mette a disposizione nelle stazioni di Roma Tiburtina e di Roma Ostiense, il noleggio di autovetture Smart completamente elettriche; la seconda prevede il noleggio di e-car nelle stazioni di Roma termini e di Milano centrale. In entrambi i casi Enel gestisce le stazioni di ricarica.

4.1.3 Accordi con le case automobilistiche

A partire dal 2008 Enel si è adoperata per mettere a punto accordi con le diverse case automobilistiche: BMW, Citroen, Mercedes Deinler, Nissan, Opel, Toyota, Renault oltre alla Piaggio per gli scooter.
Gli accordi sono volti a garantire l'approvvigionamento di energia proveniente al 100% da fonti rinnovabili e la contabilità tecnologica delle autovetture elettriche con le infrastruttura di ricarica Enel, ad implementare nuovi servizi come la localizzazione e la prenotazione direttamente a bordo del veicolo grazie al sistema di gestione della mobilità elettrica EMM, sviluppato da Enel.

4.1.4 Estero

In Danimarca la collaborazione Enel, Nissan e Nuvve, società della California che si dedica alla gestione dei flussi bidirezionali dei veicoli, ha portato alla realizzazione del primo impianto "V2G" in ambito commerciale nel mondo, con l'installazione di 10 colonnine di ricarica presso la società Frederiksberg Forsyning. La nuova tecnologia che fa sì che le macchine non siano solo dei veicoli per il trasporto, ma possano anche essere considerate delle "batterie mobili" o "batterie su ruote", che consentono, quando allacciate alla rete di distribuzione, di comportarsi come delle batterie garantendo efficacia e stabilità alla rete stessa e permettendo inoltre agli utenti di ricavarne degli utili. Il progetto è stato poi esteso anche in Germania e nel Regno Unito.
In Francia, dove la vendita autoveicoli elettrici è aumentata tra il 2015 e il 2016 del 42%, è stato avviato un nuovo progetto , Gridmotion, inteso a promuovere test di verifica sull'efficienza del sistema V2G.
In Spagna la collaborazione con Endesa e con altri partner 17 nel progetto europeo Unplugged Enel, si è dedicata alla realizzazione di un'infrastruttura efficiente che permetta sia la ricarica tradizionale conduttiva (tramite cavi) sia la ricarica wireless senza fili. A Saragoza, grazie a questo progetto, è stata realizzata la stazione di ricarica wireless più veloce al mondo. Questa innovativa modalità di ricarica si basa sull'accoppiamento induttivo tra due avvolgimenti uno posto a terra, nella piattaforma su cui andrà posizionato il veicolo, e l'altro integrato nel mezzo. La stazione di ricarica permette sia la ricarica lenta a 3,7 [kW] ma anche ricariche fast a 50 [kW], il sistema consente di ricaricare l'80% della carica il 15 minuti.

4.1.5 Progetti futuri

Ad oggi Enel ha installato sul territorio italiano circa 2000 colonnine sia pubbliche che private, nell'ultimo periodo ha sviluppato nuovi metodi di pagamento basati su carte di credito e prepagate e, grazie allo sviluppo di un applicativo, ha reso il servizio di ricarica user-friendly. Grazie a questo nuovo servizio anche i clienti che non hanno stipulato un contratto con uno fornitore possono ricaricare i veicoli. In una nazione la cui economia

si basa sul turismo ciò risulta essere un valore aggiunto per clienti stranieri. Nei obiettivi futuri dell'azienda vi è l'impegno di installare 20000 colonnine entro il 2020, questo ambizioso traguardo si basa su una strategia a più fasi:

- Installare un quantitativo di 3000 punti di ricarica pubblici su tutto il territorio italiano tra il 2016 e il 2017 con modello DSO.
- Promuovere in parallelo una contrattazione con AEEGSI, supportata da risultati positivi ottenuti, per il riconoscimento del modello DSO come reale soluzione per lo sviluppo dell'infrastruttura di ricarica.

Nel caso in cui AEEGSI sia concorde con il modello promosso da Enel, gli investimenti potrebbero essere recuperati mediante il RAB e l'infrastruttura di ricarica entrerebbe a far parte del servizio pubblico regolamentato dall'Autorità. Nel caso contrario, in cui si optasse per un altro modello di business perché più vicino al modello di libero mercato, le colonnine installate potrebbero essere convertite e riconfigurando lo smart meter passare da una soluzione multi-vendor a una mono-vendor gestite da un'altra società in ambito del gruppo Enel.
Per la scelta dei punti di installazione sono stati individuati come punti strategici:

- Aree metropolitane: soprattutto capoluoghi di regione e citta industrializzate. La presenza di colonnine di ricarica contribuisce sicuramente all'impiego di auto elettriche, le quali garantiscono sia prestazioni ottimali nelle città sia vantaggi legati alla mobilità come accesso alle zone ZTL e parcheggi gratuiti. Inoltre le auto elettriche di piccola dimensione attualmente disponibili incontrano perfettamente le necessità dei pendolari che hanno bisogno di un prodotto piccolo e agile che per percorrere un limitato numero di chilometri.
- Aree turistiche: per rispondere alle necessità dei turisti stranieri che sempre più utilizzano come soluzione, per piccoli spostamenti, le auto elettriche
- Autostrade e strade extra-urbane: le grandi strade di collegamento nord-sud e le dorsali est-ovest interessano un ampio bacino di utenti; si rende necessario, per garantire un'ampia fruizione con un margine adeguato in termini di autonomia, ipotizzare una stazione di ricarica ogni 60 [km] di tipo Fast Charge.

4.2 Electrical Mobility Management System

L'Electric Managemet System è il sistema centrale di telecontrollo, impiegato da Enel, che consente il controllo e la gestione delle infrastrutture di ricarica; grazie alla presenza del sistema di comunicazione installato in ogni colonnina è possibile la supervisione su tutto il territorio. La sua funzione di clearing permette inoltre di fornire sia i dati semi lavorati delle ricariche sia le informazione relative ai servizi ad esse associati (autorizzazioni, eventuale attivazione del servizio smart charging,..) ai sistemi esterni che gestiscono la rete e ai sistemi dei clienti interessati alla rendicontazione e all'emissione delle fatture. Operation Center è caratterizzato da un'interfaccia WEB-based utilizzabile sia dagli utenti sia dagli

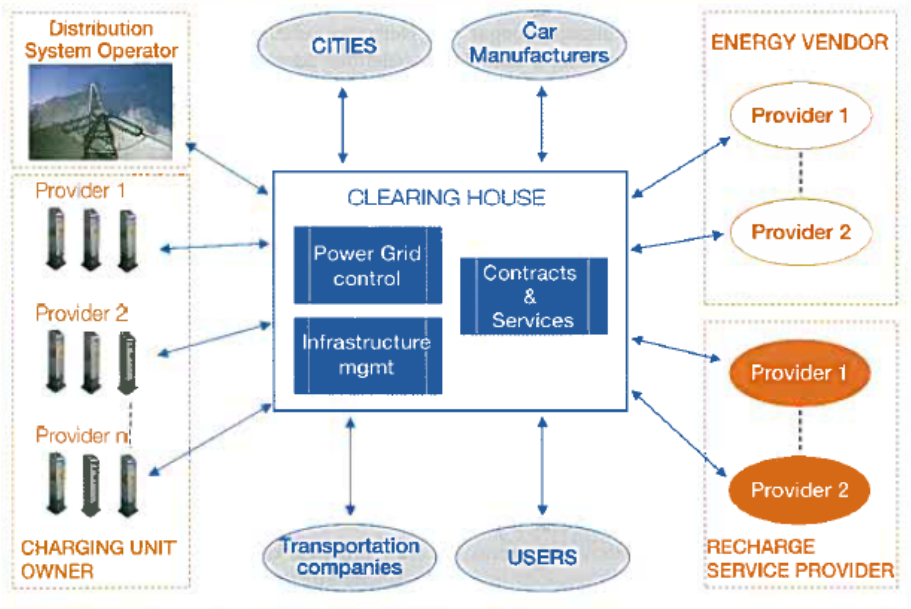


Figura 4.3: EMM business model [21]

operatori che si occupano della gestione dell'infrastruttura di ricarica.
Il sistema è composto da tre moduli principali:

- Power Grid Control: tale modulo permette all'operation center di comunicare con il sistema di controllo della rete di distribuzione (SCADA o ADMS), sistema centralizzato che riceve i dati dai diversi sensori installati sulla rete e permette di effettuare un'analisi dei flussi in tempo reale. Questo processo di scambio di informazioni è stato testato durante un progetto pilota a L'Aquila. La curva fornita dall'ADMS rappresentava l'andamento che la flotta di auto allacciate alla rete doveva rispettare per non violare i vincoli. Questo modulo sarà essenziale quando si avrà una forte penetrazione dei veicoli elettrici e i veicoli potranno scambiare con la rete energia in entrambe le direzioni.

- Infrastructure Management System: tale modulo permette la completa gestione delle colonnine, con la possibilità sia di operare sia su quelle già esistenti e installate sia di configurarne delle nuove. Spesso, per facilitare il controllo, le colonnine vengono raggruppate in aggregati detti LOAD AREA. La suddivisione può avvenire per ragioni economiche oppure in base alla posizione geografica. In questo modo la gestione delle 2000 colonnine di Enel sul territorio risulta essere più snella.
  Grazie ad uno dei web-service di questo sistema, il cliente che intende ricercare una colonnina di ricarica, attraverso un applicativo dedicato, può individuare il punto di ricarica più vicino, le caratteristiche tecniche e la disponibilità della colonnina. Una pagina web permette agli operatori che gestiscono le infrastrutture di ricarica di individuare le colonnine tramite geo-localizzazione o con il numero seriale,

codice alfanumerico che contiene le principali informazioni della colonnina e la identifica univocamente, garantendo così pronta assistenza al cliente. Ogni colonnina, sia pubblica che privata, presenta una pagina dedicata in cui sono riassunte tutte le informazioni principali: tecnologia, asset provider, potenza di allaccio alla rete e potenza prelevabile dalla singola colonnina. Sulla pagina web vengono visualizzate automaticamente le informazioni sulla diagnostica della colonnina e la presenza di eventuali allarmi legati a malfunzionamenti, manomissioni sia fisiche che informatiche. Inoltre permette di accedere ai dati relativi alle ricariche in corso e a quelle già terminate. Gli operatori, grazie al sistema di telecontrollo, possono intervenire da remoto attraverso comandi di blocco/sblocco presa, riavvio della colonnina e messa fuori servizio/in servizio. Eventualmente possono fermare una ricarica e aggiornare il software della colonnina. Per quanto riguarda la gestione della ricarica è stato sviluppato un protocollo di comunicazione tra il clearing house e le colonnine in modo da acquisire e rispondere in real time alle richieste. Quando viene accostata l'RFID alla colonnina inizia il processo di autorizzazione alla ricarica che comprende l'identificazione del cliente e del contratto associato.
L'autorizzazione abilita lo sblocco presa e l'utente può collegare la macchina. Inizia così il processo di ricarica individuata univocamente tramite il "Session ID"; contemporaneamente si avvia un servizio di letture contatore "meter data request" che periodicamente richiede i dati del contatore alla colonnina. Questi dati vengono memorizzati e resi disponibili per la consultazione degli operatori del sistema.

- Contract Management Module: è il modulo di gestione dei contratti, contiene tutti i dati relativi all'aspetto commerciale. Permette di inserire sia i nuovi contratti stipulati tra gli energy vendor e gli utenti che la creazione di nuove RFID ad essi associati. Offre inoltre la possibilità di bloccare carte RFID smarrite, tenere sotto controllo eventuali eventuali contratti in scadenza ed eliminare quelli rescissi. Il modulo contratti è essenziale per l'abilitazione alla ricarica, deve essere verificato che RFID utilizzato sia valido ed autorizzato alla ricarica su quella colonnina.

L'intero processo di ricarica è dipendente dalla comunicazione con il centro di controllo; in assenza di comunicazione non è infatti possibile effettuare l'autorizzazione e quindi far partire il processo. Esistono però situazioni di installazione dove il segnale UMTS non arriva o è debole. In questi casi l'operation center ha sviluppato due possibili soluzioni. La prima, utilizzata in ambienti privati, prevede di configurare la colonnina come stand alone, non vi è comunicazione con il centro e lo sbocco presa avviene passando una qualsiasi tessera RFID. La seconda soluzione, utilizzata in ambienti pubblici dove il segnale è debole, prevede la memorizzazione sulla colonnina dell'insieme delle Rfid che sono abilitate alla ricarica anche in assenza di comunicazione con il centro; quando invece il segnale è presente l'avvio della ricarica avviene in modo tradizionale.
Nuovi servizi sono stati introdotti per garantire una maggiore interoperabilità di EMM:

- Comunicazione tra diversi operation certer. Per garantire una totale flessibilità dell'infrastruttura di ricarica è necessario sviluppare l'interazione tra i diversi gestori delle colonnine; questo permetterà ai clienti di poter ricaricare su qualsiasi colonnina

presente sul territorio. I diversi Operation center dovranno richiedere l'autorizzazione incrociata alla ricarica e scambiarsi i dettagli delle ricariche effettuate, realizzando così uno scenario di libera concorrenza sul mercato con piena disponibilità del servizio.

- Comunicazione con piattaforme esterne che permettono un'ottimizzazione della gestione delle colonnine presenti in una LOAD AREA.
- Un nuovo servizio, sviluppato dall'E-car, è la possibilità di richiedere l'autorizzazione alla ricarica da remoto. I clienti, attraverso una app, hanno la possibilità non solo di individuare la posizione delle colonnine sul territorio ma di richiedere l'abilitazione all'avvio ricarica; tale web-service insieme allo sviluppo dell'interoperabilità con le piattaforme di pagamento diretto, ha permesso lo sviluppo del nuovo applicativo e-go.

Capitolo 5

Smart Charging

Lo sviluppo delle macchine elettriche e il loro impatto sul sistema elettrico è stato sicuramente al centro di molti studi. Le ricerche hanno mostrato che i veicoli possono essere un valore aggiunto nella gestione della rete se adeguatamente integrate nell'infrastruttura elettrica.

5.1 Impatto sulla rete dei veicoli elettrici

Indagini condotte hanno dimostrato che mediamente le autovetture e in particolar modo le auto elettriche, proprio per le loro caratteristiche di ricarica e di autonomia, vengono utilizzate per le attività proprie di spostamento e trasporto per un tempo ridottissimo mentre rimangono inutilizzate in parcheggi per il rimanente. Da questa analisi è nata l'idea di un impiego full time dei veicoli elettrici e di utilizzarli oltre che per le tradizionali attività anche come accumulatori di energia cioè come delle vere "batterie a ruote", in grado di fornire corrente elettrica in caso di necessità. Nel processo di gestione dell'energia, il ruolo giocato dai sistemi di accumulo è certamente complementare alla generazione rinnovabile e contribuisce a donare stabilità alla rete sia come risposta pronta alle esigenze richieste sia come riduzione delle fluttuazioni di potenza legate alla generazione rinnovabile prodotta da altre fonti quali il fotovoltaico e l'eolico. Queste ultime infatti, essendo dipendenti da fattori climatici e quindi non programmabili, non riescono a fornire soluzioni ottimali e immediate ad improvvise richieste delle rete, per cui un efficiente sistema di accumulo è indispensabile a gestire le discrepanze tra produzione e utilizzo. Sfruttando le batterie cariche delle auto elettriche collegate alla rete si ha una potenzialità in grado di offrire in un lasso di tempo molto breve, circa 10 minuti, una risposta adeguata ad un picco di richiesta improvvisa. Se da un lato lo sviluppo dell macchine elettriche a batteria potrebbe contribuire alla stabilità della rete regolando la frequenza ([41]) e riducendo le fluttuazioni di potenza legate alla generazione rinnovabile ([33]), dall'altra però la crescita incontrollata delle auto elettriche, non adeguatamente supportata da un potenziamento della rete di distribuzione, potrebbe produrre un effetto contrario rispetto a quello sperato.
Studi hanno mostrato che l'infrastruttura di rete attuale ha le potenzialità di supportare una bassa penetrazione EV ([35]), in particolare considerando l'andamento del carico nel

settore terziario, l'effetto dei veicoli elettrici risulta essere poco gravoso poiché le richieste di ricarica si concentrano alla mattina non sommandosi al tipico picco pomeridiano.
In ambito residenziale, invece, l'effetto dei veicoli elettrici potrebbe grava maggiormente sulla rete, poiché le ricariche si concentrano soprattutto la sera producendo cosi picchi maggiori ([43]).
L'elevato carico comporta picchi corrente con cadute di tensione maggiori e conseguenti

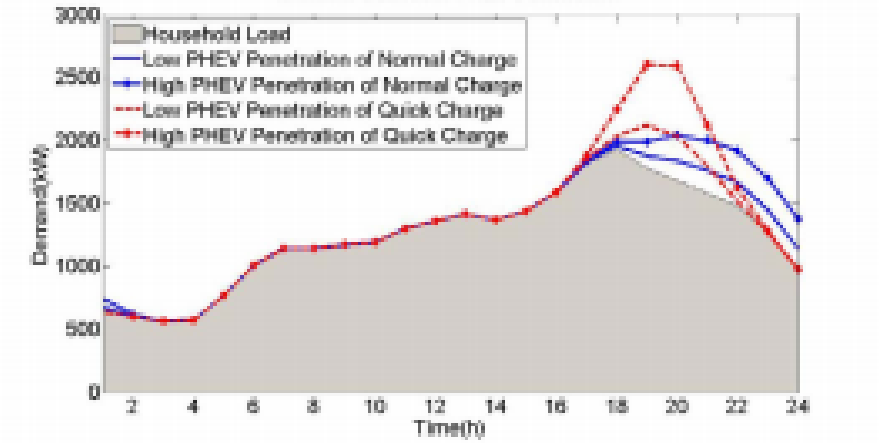


Figura 5.1: Previsione di assorbimento residenziale con diversi tipi di ricarica ([43])

fluttuazioni elevate della tensione nominale ([12]). Mantenere i picchi di assorbimento limitati non è l'unica soluzione per ridurre le perdite sulla rete; un sistema intelligente di regolazione dei flussi di potenza ([30]) potrebbe evitare nuove congestioni e sovraccarichi ([44]).
Elevate dissipazioni di potenza portano la rete a surriscaldarsi ed essere meno efficiente,

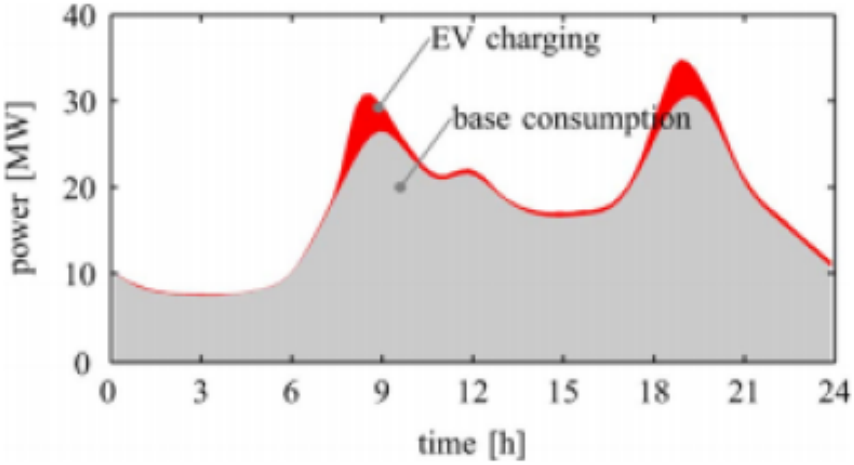


Figura 5.2: Assorbimento maggiore di potenza sulla rete dovuto ai veicoli ([44])

con conseguente aumento dei costi di gestione per i clienti. Si può quindi dedurre che se non adeguatamente controllate le ricariche potrebbero rappresentare un reale problema per la rete ([40]) e produrre svantaggi per i clienti.
Nel lungo periodo, si prevedono interventi di potenziamento, soprattutto sulle reti di distribuzione, per permettere un adeguamento dell'infrastruttura elettrica, mentre per limitare gli effetti dannosi nel breve e medio periodo si stanno sviluppando nuove strategie di modulazione del carico.

5.2 Algoritmi di Smart Charging

Molti studi hanno dimostrato che strategie di modulazione dei carichi, implementate attraverso algoritmi di programmazione intelligente delle ricariche, potrebbero non solo ridurre i costi di investimento degli impianti di distribuzione ma essere un vantaggioso anche per i clienti, realizzando così un business auto-sostenibile. Affinché il contributo verso la rete dei veicoli sia significativo è necessario che un certo numero di veicoli collabori tra di loro. Nasce così la necessità di creare una nuova figura all'interno del mercato elettrico, l'aggregatore EVSE, chiamato da E-distribuzioe 'EVSE operator'; questi si dedica alla gestione delle auto mettendo a disposizione del DSO della rete e/o dei mercati elettrici ([5]) le loro potenzialità. L'aggregatore può controllare più veicoli dispersi su tutta la rete di distribuzione oppure localizzati in un'unica area come ad esempio la flotta di una società; il suo ruolo può essere svolto da produttori di veicoli, compagnie di cellulari e da tutti coloro che vedono nella gestione intelligente delle macchine una potenzialità di business.
Gli algoritmi di smart charging possono essere sostanzialmente di due tipologie ([50]):

- Centralizzati: in cui è l'Operator EVSE a prendere tutte le decisioni; le auto elettriche in questo caso rappresentano "semplici batterie con le ruote". La programmazione delle ricariche dei veicoli tiene conto dei carichi già presenti sulla rete e mira all'integrazione delle stesse cercando di soddisfare una certa funzione obiettivo a seconda dello scenario in cui si trova (casa, quartiere, industria, ...), per cui l'auto elettrica diventa un potenziale carico. Un esempio di funzione obiettivo può essere la minimizzazione del picco massimo, dove sono state messe in evidenza due possibilità: concentrare le ricariche dei veicoli nella zona centrale della giornata quando il carico elettrico è minore e il contributo della produzione fotovoltaica è elevato, oppure durante le ore della notte ([50]). Un altro esempio applicativo, integrato nell' Home Energy Management System (HEMS), è un algoritmo di smart charging che minimizza il costo dell'energia sfruttando la tariffa bioraria, migliorando così il fattore di carico.[29]

- Decentralizzati: è l'utente a scegliere quando e per quanto tempo caricare la macchina. L' EVSE operator può avere un comportamento solo passivo sul controllo delle ricariche, infatti non può agire direttamente né sull'inizio e fine ricarica, né sul profilo della ricarica. Attraverso segnali di prezzo può promuovere le ricariche nelle ore di carico minore ma lascia all'utente piena libertà sull'andamento della ricarica [25].

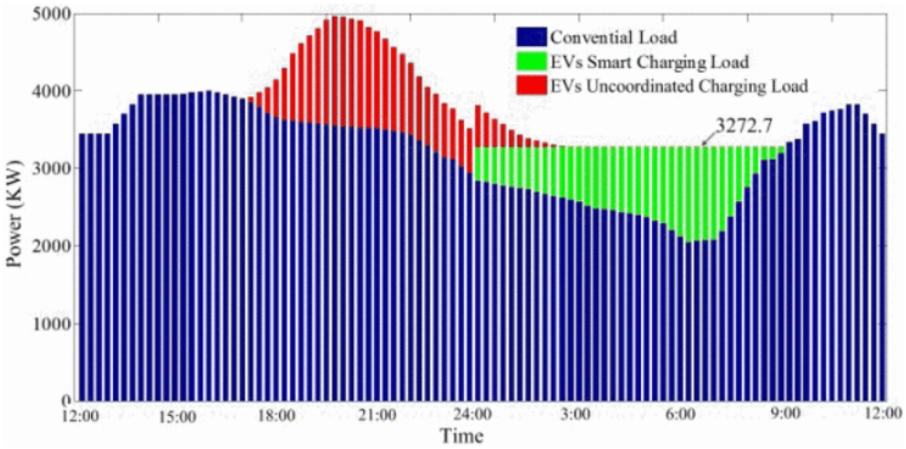


Figura 5.3: Confronto tra ricarica incontrollata e ricarica intelligente ([50])

Questo tipo di gestione è efficacemente applicato su quegli utenti che non hanno problemi di tempo e che puntano a ricaricare la macchina alle tariffe più convenienti, mentre, per quegli utenti che richiedono ricariche immediate e veloci, il problema di sovraccarico continuerebbe a presentarsi ([36]).
Gli algoritmi decentralizzati hanno avuto un successo maggiore perché gli utenti, solitamente possessori delle auto, attraverso lo smart charging riescono ad ottenere un risparmio economico. Per avere una coordinazione dei veicoli in modo da prendere in considerazione anche i requisiti della rete sarebbe necessaria una complessa comunicazione V2V, molto difficile da realizzare; anche se tale metodo è quello in auge, l'ottimizzazione del singolo non garantisce che venga raggiunta l'ottimizzazione globale.

La regolazione delle ricariche rappresenta sicuramente una potenzialità da poter sfruttare per la rete, è necessario però che questo sia vantaggioso anche per i clienti ([43]). Infatti, è stato osservato che una adeguata incentivazione dei prezzi, utilizzando un metodo decentralizzato, pò produrre gli stessi effetti del metodo centralizzato ([47]). Va osservato inoltre che maggiore sarà il numero di veicoli allacciati alla rete maggiori potranno essere i benefici sia per l'aggregatore, come nel caso del V2G, che potrà vendere sul mercato dell'energia una maggiore potenza di regolazione, sia per i clienti. Dall'altra però, con un aumento progressivo del numero di clienti il risparmio percepito non diminuirà proporzionalmente ma ad un certo punto il sistema sarà saturo e un aumento dei veicoli non porterà più nessun beneficio aggiuntivo ai clienti ([37]).
Molti algoritmi effettuano il calcolo di ottimizzazione basandosi sulle indicazioni caricate il giorno prima dagli utenti cercando di raggiungere la funzione in base alla previsione di carico. Questo sistema però non permette di effettuare variazioni in tempo reale ed adattare il carico alla reale curva di assorbimento.
Di particolare rilevanza è il paper ([50]) in cui si introduce oltre alla funzione obiettivo, di minimizzazione del picco di carico, anche la priorità di carica; in base all'energia che

deve essere ancora caricata e al tempo che la macchina rimane allacciata alla rete, viene valutato il grado di priorità di ogni veicolo. Ad ogni intervallo di tempo viene valutata la disponibilità di potenza della rete rispetto alla richiesta di carica degli utenti; se quest'ultima supera la disponibilità della rete verranno caricati prima i veicoli con priorità di carica maggiore.
Per realizzare un sistema ancora più flessibile e dinamico è possibile sfruttare i sistemi di comunicazione ICT (Information and Communications Technolog), che permettono di scambiare informazioni in tempo reale; in tal modo gli algoritmi di modulazione possono essere più reattivi e rispondere meglio ad eventuali cambiamenti degli scenari da gestire: arrivo di nuovi clienti, cambiamenti del prezzo dell'energia e nuovi vincoli della rete messi in evidenza dai sistemi di power flow.
Utilizzando le informazioni in tempo reale è possibile sviluppare algoritmi di tipo event-driven i quali permettono il calcolo di ottimizzazione ad ogni evento importante come l'arrivo di un nuovo cliente o il cambio dei limiti della rete. Questi algoritmi però non permettono elevate prestazioni poiché l'aggiornamento dipende dagli eventi e in caso siano assenti la soluzione calcolata nel lungo periodo potrebbe non essere ottimale. Esistono invece modelli di tipo time-driven dove il ricalcolo del profilo ottimizzato avviene a scadenze regolari.

5.3 Struttura di Smart Charging Mobincity

Lo sviluppo della soluzione proposta da E-distribuzione sfrutta l'interoperabilità di EMM e si prefigge di realizzare un servizio che si adatti completamente alle esigenze del cliente ed allo stesso tempo permetta di avere un completo controllo sulla potenza assorbita dalle colonnine di ricarica.
Nel progetto mobincity si è sviluppata una strutttura che permette di modulare i profili di ricarica dei veicoli in maniera automatica. In particolare EMM si avvale di una piattaforma esterna ChargeAdvaisor, sulla quale è implementato un algoritmo di Smart Charging. Il sistema di gestione con modulazione intelligente si presta ad essere applicato su gruppi di colonnine raggruppati in una stessa zona detta 'load area'.
Le potenzialità del gestore EMM non solo permettono di controllare la potenza globale assorbita dall'aggregato delle colonnine ma anche di controllare il profilo di ogni singolo veicolo. Questa caratteristica permette di comandare separatamente due veicoli che ricaricano sulla stessa colonnina poiché ogni ricarica è individuata univocamente con il 'Session ID'.
Affinché vi sia un corretto funzionamento del sistema di ricarica con smart charging, le due piattaforme devono poter comunicare tra loro e lavorare in corretta sinergia. Lo scambio di informazioni avviene attraverso web-services dedicati come il servizio di 'Notification' o servizio di' Scheduling'. Inoltre, i due sistemi devono essere sincronizzati tra loro poiché l'algoritmo sviluppato è di tipo time-event, cioè l'ottimizzazione viene effettuata ad intervalli regolari e la corretta sincronizzazione avviene mediate server NTP.
Per garantire un sistema dinamico e un aggiornamento frequentemente, poiché il quarto

d'ora è spesso utilizzato come unità base dei sistemi finanziari e dei sistemi elettrici, l'algoritmo lavora con intervalli di 5 minuti. Per garantire quindi letture in tempo reale EMM rileva le misure ogni minuto e non ogni 15 come avviene in condizioni di ricarica normale; questo permette all'operatore di avere una migliore visione dell'andamento delle ricariche ed effettuare un'analisi più accurata dati raccolti.
Compito dell'algoritmo è sviluppare una soluzione che rispettati sia i vincoli forniti dalle utenze, legati al tempo di ricarica e all'energia richiesta, sia della rete, definiti mediante una curva limite di potenza detta threshold; in particolare la soluzione di ottimizzazione permetterà ai veicoli di seguire una certa curva di riferimento chiamata target.
Questo profilo di potenza pò essere fornito dal DSO, per rispondere ad un servizio di "Demand responde" (DR), oppure, in un'ottica di V2B ([37]), in cui si cerca massimizzare l'auto-consumo ricaricando le batterie delle macchine con l'energia prodotta da pannelli fotovoltaici privati, la curva potrebbe derivare da una previsione di generazione fotovoltaica.
Il 'demand response' consiste in un insieme di azioni promosse dall'utente come lo stacco momentaneo di alcuni carichi o la traslazione orizzontale della curva di assorbimento in risposta alla variazione del prezzo dell'elettricità o per problemi presenti sulla rete (presenza momentanea di guasti o produzione variabile del rinnovabile). Tali azioni avvengono in modo automatico per essere applicate in tempo reale e possono essere attuate o dal gestore della rete o dall'utente finale stesso in base alle sue priorità.
Oggi questo tipo di strategia viene applicato sia a livello residenziale, ne è un esempio la tariffa tri-oraria, sia a livello industriale, in applicazione dalla delibera n.289/2006 AEEGSI; nulla impedisce di applicarla anche a flotte di veicoli elettrici che rappresentano sempre più, un importante cliente per la rete.
Affinché il sistema con regolazione intelligente della potenza possa essere impiegato è necessario definire: sia la load area, specificando le colonnine che devono essere gestite (questa operazione viene effettuata dal gestore delle colonnine) sia le due curve di potenza, la target e la threshold.
Quando un utente effettua la richiesta di ricarica con smart charging è invitato ad indicare le sue preferenze e alcuni dati relativi al veicolo da ricaricare. I campi che l'utente deve completare sono:

- Stato iniziale di carica SOC_{in}
- Stato finale di carica SOC_{fin}
- Capacità della batteria del veicolo BC
- Tempo di partenza
- Tempo di inizio ricarica
- Presa sulla quale ricaricare
- Potenza massima P_{max}
- Potenza minima di ricarica P_{min}

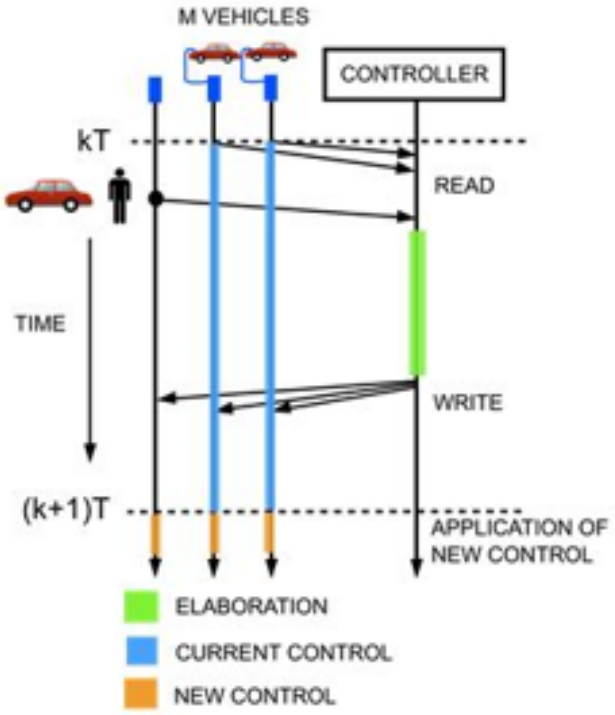


Figure 12. Charging request

Figura 5.4: Sequenza degli eventi

Il sistema EMM si dedica all'abilitazione della ricarica e contemporaneamente, invia, tramite il servizio di 'Notificantion', le informazioni relative al nuovo utente alla piattaforma ChargeAdvaisor. Il nuovo veicolo entrerà a far parte della flotta con carico modulato al prossimo time-stamp utile. Infatti i set point di potenza vengono applicati dal gestore delle colonnine ad intervalli regolari di ampiezza T.

Attraverso il servizio di 'meter reading', l'EMM invia i dati, relativi a potenza ed energia, acquisiti negli ultimi 5 minuti, alla piattaforma esterna. Tali valori vengono memorizzati e adeguatamente elaborati per determinare la stima dello stato di carica del veicolo. I valori reali permettono una maggiore accuratezza sulla stima del valore del SOC_{reale}.
Successivamente il sistema determina i veicoli che dovranno essere ancora caricati durante il prossimo periodo di tempo T. In particolare, usando il valore del SOC_{reale} viene effettuata una stima sul valore dello stato di carica che verrà assunto dai diversi veicoli al termine dell'attuale periodo base. Nel caso in cui lo stato di carica stimato sia minore del valore scelto dall'utente allora, il veicolo farà parte di quelli che devono essere ancora caricati; in caso contrario invece, il veicolo si reputa caricato completamente e non verrà

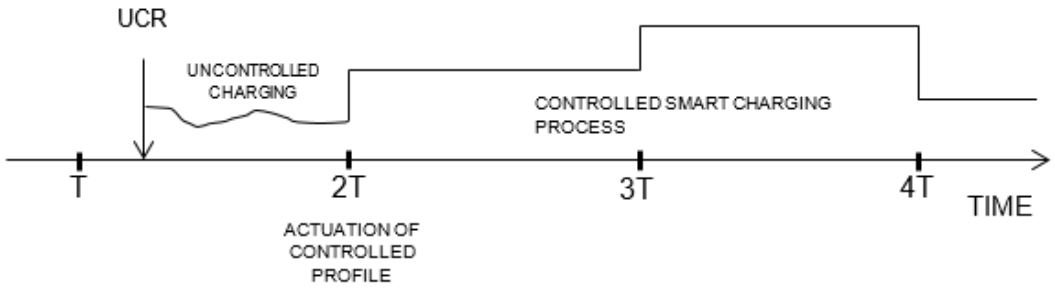


Figura 5.5: Richiesta di ricarica utente e fase incontrollata di ricarica

più alimentato. Sulla base di questa valutazione viene determinato il numero di veicoli che dovranno essere presi in considerazione per il nuovo calcolo di ottimizzazione.
In seguito il sistema EMM attraverso il web-service di 'scheduling' richiede alla piattaforma un nuovo calcolo, inizia così il processo di ottimizzazione, il quale restituisce per ogni veicolo un vettore contenente l'intero profilo di ricarica che porterà il veicolo a fine ricarica. Ogni elemento del vettore riporta il set point di potenza che deve essere applicato alla macchina e l'ora a cui essere settato. Questa programmazione nel futuro permette, in caso di perdita di comunicazione tra le due piattaforme, di poter continuare a gestire le ricariche attive. Alla prossima richiesta di schedulazione i nuovi risultati prederanno il posto dell'ottimizzazione calcolata precedentemente.

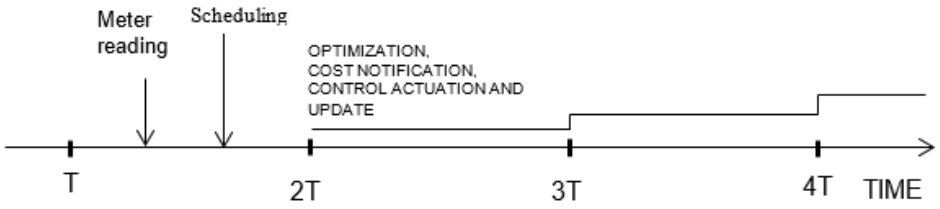


Figura 5.6: Sequenza del servizio di 'meter reading' e 'scheduling'

Il profilo così ottenuto viene applicato dal operation center al primo time-stamp utile cioè in corrispondenza dei multipli di T.
Sulla base delle considerazioni fatte in precedenza, l'algoritmo sviluppato e proposto è un modello ibrido in quanto da un lato pesenta cratteristiche dei modelli centralizzati poichè l'aggregatore può agire direttamente sui veicoli, decidendo liberamente il profilo di carica, dall'altro presenta anche caratteristiche degli algoritmi decentralizzati poiché è l'utente a scegliere il tempo di ricarica.
Il problema di ottimizzazione che è chiamato a risolvere l'algoritmo ad ogni iterazione si

compone di una funzione obiettivo che consiste nella combinazione di due termini:

$$J = \mu_1 J_{cost} + \mu_2 J_{Tr} \tag{5.1}$$

dove mu_1 e mu_2 sono due coefficienti di peso delle due funzioni. J_{cost} : funzione da minimizzare, associata al costo totale per ricaricare i veicoli presenti nella load area. La formulazione di J_{cost}:

$$J_{cost} = \sum_{m \epsilon M} \sum_{k=I}^{E_m - 1} \Delta P_m TC\,[k]\, U_m\,[k] \tag{5.2}$$

dove M rappresenta l'insieme dei veicoli collegati alla rete $m \epsilon M$ il generico veicolo, I rappresenta l'istante iniziale in cui avviene l'ottimizzazione, k rappresenta il generico istante appartenente all'intervallo

$$k \epsilon [I + 1; E_m - 1]$$

Ogni veicolo m è caratterizzato da un tempo di partenza E_m, T step di discretizzazione del problema di ottimizzazione (5 minuti). ΔP_m rappresenta la massima potenza che può essere trasmassa al veicolo, $C\,[k]$ rappresenta il prezzo dell'energia elettrica al generico istante k-esimo. $U_m\,[k]$ rappresnta una variabile di controllo ed è definita come il rapporto tra la potenza che fluisce dalla rete alla macchina al tempo k e la Potenza massima ΔP_m. J_{Tr}: funzione da minimizzare, è legata all'errore tra la potenza aggregata dell'intera load area e la potenza di riferimento (target). Vi è un certo grado di libertà nella scelta della norma con la quale viene misurato l'errore. Una prima versione dell'algoritmo utilizzava la norma infinito, ma questo portava ad un profilo di ricarica errato; successivamente è stata introdotta la norma euclideina per risolvere il problema della saturazione.
L'espressione di J_{Tr}:

$$J_{Tr} = (P - P^{ref})^T \Lambda (P - P^{ref}) \tag{5.3}$$

dove P è un vettore composto k elementi, il k-esimo elemento rappresenta la potenza aggregata dell'intera load area.

$$P[k] = P^{s}\,[k] + \sum_{m \epsilon M_k} \Delta P_m U_m[k] \tag{5.4}$$

Dove $P^{s}\,[k]$ rappresenta la potenza dei veicoli presenti nella laod area non flessibili che non possono essere modulati. Il secondo termine invece rappresenta la potenza aggregata dei veicoli flessibili.

$$M^K = \{m \epsilon M : I \leq K \leq E_m - 1\} \tag{5.5}$$

Rappresentano l'insieme dei veicoli flessibili al k-esimo istante. P^{ref} è un vettore contenente la curva di target che deve essere seguita dalla load area. $\bigwedge$ è una matrice diagonale che contiene i coefficienti di errore che devono essere assunti lungo il periodo di tempo. L'errore al generico intervallo k diventa sempre più elevato ma mano che ci si sposta dal tempo corrente I. Nel breve periodo l'errore deve essre limitato, quasi nullo, mentre il generico elemento sulla diagonole è scelto come monotonico decrescente; cosi facendo il controllore può esplorare l'andamento nel tempo della curva di costo mentre segue bene la curva di

riferimento nel breve periodo. Per la stima dello stato di carica e per calcolare l'evoluzione dello stato di carica della batteria nell'algoritmo basato su modello di controllo predittivo (MPC) verrà utilizato il modello lineare della batteria; questo perchè è necessario un modello semplice e preciso senza sovraccaricare il problema di ottimizzazione:

$$X_m[k+1] = X_m[k] + \Delta P_m T(U_m[K] - \zeta_m |U_m[k]|) \tag{5.6}$$

$$X_m[I] = X_m^0 \tag{5.7}$$

Dove $X_m[0]$ rappresenta lo stato di carica iniziale del veicolo al veicolo al momento dell'ottimizzazione, alla prima ottimizzazione tale valore corrisponde a quello caricato dall'utente, ai passi successive corrisponde a quello calcolato con I valori provenienti dal campo, $X_m[K]$ rappresenta lo stato di carica al generico intervallo K e ζ_m è il complementare del rendimeno:

$$\begin{aligned} \zeta_m &= |1-\eta| \\ \eta &= \eta_{DC}\eta_{AC}\eta_{batt} \end{aligned}$$

Il rendimento tiene conto del rendimento del carica batteria e del rendimento della batteria. I limiti fisici del sistema come potenza massima, potenza minima, energia massima, energia minimadelle batterie e quelli della rete vengono formalizzati come vincoli.

Limiti di potenza massima e minima Limiti legati alla potenza massima e minima che può essere caricata e scaricata dai veicoli sono conformi alla norma IEC 61851 [28]. Va osservato che nello sviluppo del nuovo algoritmo è permessa una suddivisione dei veicoli in base alla potenza massima. Per i veicoli che caricano fino a 3 kW non avviene nessuna modulazione possono assumere solo due stati o accesso o spento. I veicoli invece che caricano fino a 22 kW vengono modulati. Grazie all'introduzione della variabile $U_m[k]$ tali limiti possono essere scritti come:

$$\begin{cases} [-1, -\alpha_m] \cup \{0\} \cup [\alpha_m, 1] & \text{se } P_m^{max} = 22[kW] \\ \{0,1\} & \text{se } P_m^{max} = 3[kW]. \end{cases}, 0 < \alpha_m < 1 \, \forall k \, \epsilon [I, E_m] \tag{5.8}$$

Il valore $-\alpha_m * \Delta P_m$ rappresenta il minimo valore di scarica e $\alpha_m * \Delta P_m$ rappresenta il minimo valore di carica.

Limiti di rete Limite introdotto per evitare che vengano superati i vincoli della rete (threshold); tale curva può essere variata dal DSO in base alle condizioni di stress sulla rete. In qualunque istante il sistema deve far si che non vengano mai superati i limiti della rete:

$$P^s[k] + \sum_{m \epsilon M_k} \Delta P_m U_m[K] \leq P^{thre}[k], \, \forall k \, \epsilon [I, E] \tag{5.9}$$

dove $P^{thre}[k]$ rappresenta il valore limite di Potenza dell threshold al generico istante k-esimo, mentre E rappresenta

$$[E = max E_m] \tag{5.10}$$

Limiti dello stato della batteria Lo stato di carica della batteria non può assumere valori negativi e non superare la capacità nominale della batteia:

$$X_m^{min} \leq X_m[k+1] \leq X_m^{max}, \forall m \, \epsilon M, \forall k \, \epsilon [I, E-1] \tag{5.11}$$

dove X_m^{max} valore massimo di carica e X_m^{min} è la quantità di scarica ammessa del m-esimo veicolo.
Il parametro X_m^{min} può essere scelto dipendente dal tempo, per esempio monotono crescente in modo da garantire un certo livello di ricarica in ogni intervallo di tempo. Questo è importante perche è possibile che un'autista decida di terminare il processo di ricarica prima del tempo stabilito senza dare nessun preavviso la Sistema. Il Sistema cerca di garantire un cerlo livello di SOC prima che la sessione di ricarica finisca.

$$X_m^{ref} \leq X_m[E_m] \leq X_m^{max}, \forall m \, \epsilon M, \tag{5.12}$$

Limite di costo Esiste un limite di costo per ogni ricarica che è legato al quello stimato alla prima iterazione più una variable che dipende dal tipo di contratto stipulato dall'utente. Ad ogni nuova iterazione l'algoritmo drovà verificare che la somma del costo accumulato fino all'ottimizzazione attuale più il costo previsto fino alla fine della ricarica risulti essere minore della stima di costo effettuata alla prima iterazione. Questo garantisce allo user che per la sua ricarica andrà a spendere meno o uguale alla cifra fornita all'inizio ricarica:

$$c_m[I] + \sum_{E_m - 1}^{k=1} \Delta P_m TC[k] U_m[k] \leq (1+\varepsilon) C_m^0, \forall m \, \epsilon M \tag{5.13}$$

ε dipende dal tipo di contratto stipulato.
Ad oggi non essendo la tariffazione in real time la funzione di costo non viene presa in considerazione per la modulazione del carico.

5.4 Metodologia α

Sfruttando l'architettura sviluppata durante il progetto Mobincity si sono voluti effettuare dei test di smart charging su due diversi veicoli veicolo A e veicolo B, e studiare il comportamento dell'intero sistema quando viene limitata la potenza di assorbimento. Tali prove hanno lo scopo di valutare l'andamento di ricarica del veicolo e confrontarlo con il comportamento stimato dall'algoritmo.
Per effettuare i test si è definita la load area che si intende controllare; l'area presa in esame è composta da una pole station di seconda generazione che presenta due socket di tipo 2. Dalla configurazione su EMM si ricava la massima potenza prelevabile dalla colonnina, poiché il valore è 44 kW entrambe le prese possono caricare alla potenza massima senza limitazioni.
Per quanto riguarda la definizione delle due curve limite caratteristiche dell'algoritmo di Smart Charging, la threshold e la target, queste sono settate manualmente. Il valore delle curva threshold, per tutti i test svolti è settata pari alla potenza massima prelevabile dalla

colonnina, mentre per quanto riguarda la target ha assunto valori variabili in modo da simulare tutti i possibili scenari, cambi repentini di potenza, variazioni della generazione fotovoltaica ma anche andamenti costanti con livelli di potenza diversi. I valori della target e della threshold sono stati impostati prima di ogni prova sulla piattaforma ChargeAdvaisor mediante un'apposita pagina web.
Per ogni sessione di ricarica la piattaforma ChargeAdvaisor salva l'insieme dei valori che vengono settati al veicolo rendendoli disponibili su un foglio di calcolo. Tali dati sono presi come riferimento per l'analisi delle ricariche.
Il calcolo di ottimizzazione dall'algoritmo restituisce per ogni veicolo un vettore contenente i set point di potenza $P_{computed}$, i veicoli però, non sono capaci di interpretare direttamente i riferimenti di potenza. Il sistema deve adeguatamente trasformare tali valori in segnali interpretabili dal mezzo.
L'EMM, che riceve i dati di potenza in seguito alla richiesta di 'scheduling', converte il valore di potenza in valore di corrente usando la formula:

$$I = \frac{P_{computed}}{380 * 0.998 * \sqrt{3}} \tag{5.14}$$

Tale valore di corrente viene successivamente trasformato in un valore di PWM secondo la tabella (A.3) della normativa IEC 61851 [28]. Nel caso in cui il termine ottenuto presenti cifre decimali queste vengono troncate, generando così un valore di PWM intero, che viene inviato dal centro alla colonnina tramite il comunication module (CM).
All'interno della colonnina il segnale di PWM, viene ritrasformato in un valore di corrente e successivamente viene sottratta una quantità pari a 0.01 A.
Il valore di corrente così ottenuto è impiegato dal CP (comunication protocol) per la determinazione del minimo dei massimi di corrente (3.4); una volta stabilito il minimo questo viene convertito in un segnale PWM sul circuito di pilotaggio.
La sottrazione del valore 0.01 A non incide sull'ampiezza del duty cicle del segnale inviato alla macchina poiché tale grandezza risulta essere trascurabile. La sottrazione del valore ha però ripercussioni sul PWM che compare nei registri dei dati di EMM. Infatti quando il centro di controllo richiede i dati dal campo, il CP deve restituire un valore di PWM intero; la logica della colonnina tronca il valore di PWM, generando così una discrepanza di 1 punto percentuale tra il valore di PWM realmente presente sul circuito di pilotaggio e quello riportato nei registri dei dati di EMM.
Questa valutazione è essenziale per poter interpretare correttamente i valori forniti dai registri dei dati di EMM. Per valutare il corretto comportamento dei veicoli sono stati analizzati, per le diverse prove, i registri del CP dai quali si ricava la corrente reale settata al veicolo I_{cp}.
I veicoli presi in esame possono essere caricati alla potenza di 22 kW mediate apposito conduttore fornito dalla casa automobilistica con portata 32 A e presa di tipo 2. I cavi di alimentazione sono di tipo 5G6+1X0.5 mm^2 con lunghezza di 7 m, dalla normativa CEI-20 [1] e la portata nominale del cavo risulta essere di 54 A alla temperatura di 20 °C, e resistenza caratteristica $r = 3.3\ ohm/km$, la resistenza conduttore risulta:

$$R_{conduttore} = rL = 0.0231[ohm] \tag{5.15}$$

Considerando la condizione più gravosa le perdite sul conduttore risultano essere:

$$P_{conduttore} = 3R_{conduttore}I_{max}^2 = 71[W] \tag{5.16}$$

Si suppongono trascurabili le perdite sul conduttore poiché molto più piccole rispetto alle potenze in gioco.
Entrambe le macchine presentano batterie agli ioni di litio, i datasheet dei veicoli forniscono la capacità della batteria in [kWh] ma non forniscono altre indicazioni relative alle batterie impiegate sui veicoli. Per questi motivi la stima dello stato di carica verrà effettuata mediante il modello lineare della batteria3.2. Inoltre la capacità della batteria si considera pari a quella nominale, per il veicolo A 22 kWh mentre per il veicolo B 17.6 kWh.
Si trascura l'effetto della temperatura sulle batterie dei veicoli poichè non rilevabile con i mezzi a disposizione.
Inoltre non viene preso in considerazione lo stato di degrado delle batterie in quanto non vengono forniti dati a riguardo e perchè i test effettuati hanno una trascurabile incidenza sull'usura delle batterie. Infatti durata delle batterie ha una vita media di circa 1000 cicli carica/scarica mentre i test effettuati si discostano ampiamente da tale numero.
Prima di ogni prova la batteria dei veicoli è stata scaricata, il valore dello stato di carica iniziale SOC_{in} viene letto direttamente sul veicolo, per la vettura A è indicato in maniera digitale mentre per il veicolo B è espresso da un indicatore analogico. L'incertezza legata a questi valori non è documentabile poiché non riportata nelle caratteristiche dei veicoli.
I dati relativi alle ricariche vengono acquisisti direttamente dal sistema EMM mediante lo smart meter e riportati su un foglio di calcolo.
Lo strumento di misura utilizzato è un contatore ad inserzione diretta con tensione nominale 230/400 V, corrente minima rilevata $I_{tr} = 0.5$ A A.5 e portata massima di corrente ammissibile $I_{max} = 63$ A A.6 .
Suposto che il funzionamento del sistema sia quello considerato dalla norma [9] se ne deduce che il contatore risulta essere di classe B A.7 con un errore sull'energia attiva del 1%. Bisogna inoltre considerare l'effetto della temperatura sul contatore; considerando un range di funzionamento tra 5 °C e 30 °C dalla tabella A.8 della norma CEI EN 50470 [9] si ricava una maggiorazione dell'incertezza pari a 1,3%.
Non conoscendo il fattore di potenza assunto dai veicoli si è scelto un valore maggiorato pari al 3% come consigiato dal costruttore interpellato telefonicamente.
Il processore all'interno del contatore presenta 6 ingressi analogici, 3 per i segnali di corrente e 3 per i segnali di tensione; l'ampiezza massima per ogni porta di ingresso del segnale è 0.5 V. Il segnale di ingresso mediante amplificatore operazionale (PGA) viene adeguatamente trasformato per essere compatibile con gli ingressi del convertitore analogico digitale, il quale presenta una frequenza di campionamento di 10 MHz.
Mendiante un filtro passa alto (HPF) viene eliminata la componente continua di corrente, questo però introduce un ritardo tra la corrente e la corrispondente tensione di fase. Per tale motivo è introdotto sul circuito digitale delle tensioni, un blocco di compensazione.
I segnali così ottenuti possono essere impiegati per il calcolo dei valori rms di tensione e corrente e per il calcolo della potenza attiva.
Le misure di corrente e tensione vengono acquisite come valori istantanei rms con un'incer-

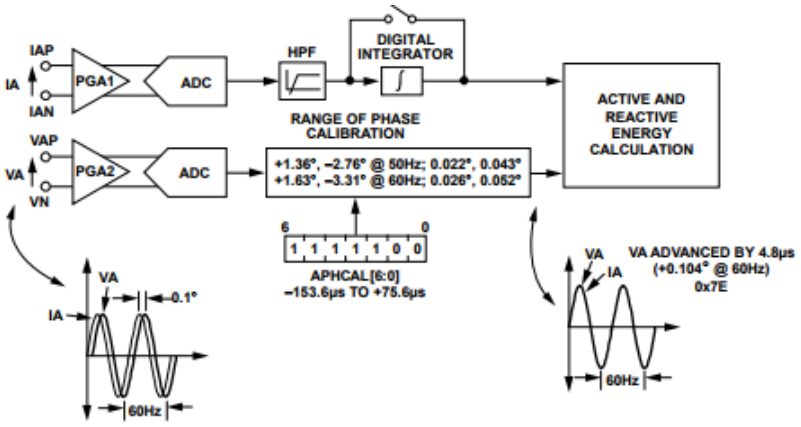


Figura 5.7: Struttura del circuito di acquisizione dati di tensione e corrente

tezza 1% e con accuratezza del decimo di [A]. Questo determina che per correnti superiori a 10 A risulta essere il più significativo l'errore percentuale, mentre quando la corrente scende sotto a tale valore diventa più importante l'errore sull'approssimazione.

$$\varepsilon_{i\%} = \frac{0.1}{I_{min}} 100 = 1.66\% \tag{5.17}$$

Le potenze attive sulle tre fasi vengono sommate e la potenza attiva complessiva viene impiegata per il calcolo dell'energia attiva. Poiché il valore dell'energia attiva viene determinato dal processore tramite un calcolo di integrazione nel tempo è possibile considerare un errore sulla potenza attiva paria a quello dell'energia.
Si analizzano le voci più significative per il lavoro da illustrare dei dati aquisiti dal centro di controllo, messi a disposizione tramite foglio di calcolo:

- Data e ora del meter sulla colonnina
- Potenza attuale erogata [kW]
- Valori dell'energia assorbita nelle tre fasce [kWh]
- Il valore del PWM settato [%]
- I valori delle 3 tensioni di fase di ogni linea [V]
- I tre valori delle 3 correnti assorbite [mA]

L'energia assorbita dal veicolo durante il processo di ricarica viene determinata dalla lettura delle tre fasce.
Per effettuare la richiesta di ricarica con smart charging è necessario collegandosi al server da computer, i dati ingresso vengono caricati mediante una pagina web: I diversi campi riportano: sesseion ID, è il numero identificativo della ricarica, load area , la prese sulla quale si vuole caricare, il tasto che abilita l'inizio o la fine della ricarica,l'ora di inizio della

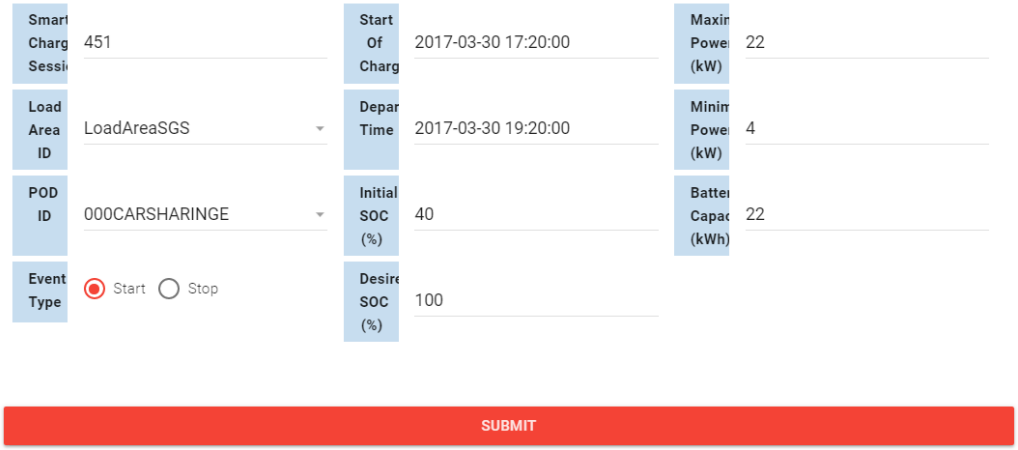


Figura 5.8: Start remote charge con smart chraging

ricarica, l'ora di fine ricarica, lo stato iniziale della ricarica SOC_{in}, lo stato finale SOC_{fin} della ricarica , la capacità della batteria BC e il tipo di ricarica.
La norma IEC 61851 [28] prescrive che è possibile comandare alla macchina un valore minimo di PWM pari a 10, che corrisponde ad una corrente di 6 A A.3. Considerando la tensione nominale di rete 400 V e fattore di potenza unitario la potenza minima comandabile è 4 kW, mentre la potenza massima corrisponde alla massima potenza che la macchina può assorbire, nei casi studiati è 22 kW. Questi limiti sono comuni ad entrambe le macchine e verranno utilizzati in tutte le prove effettuate.
La ricarica viene fermata appena ChargeAdvaisor applica l'ultimo valore non nullo di potenza, tale richiesta avviene manualmente direttamente dalla pagine web in cui vengono caricati i dati relativi alla ricarica. La richiesta di fine ricarica fa si che termini il servizio di richiesta dei dati dal centro.
Per l'analisi dei dati si è creato un modello di batterie che ha permesso la valutazione dello stato di carica al progredire della ricarica, in particolare si è voluto confrontare il $SOC_{teorico}$ che prende in considerazione la potenza teorica settata al veicolo $P_{computed}$ e il SOC_ca che considera invece i dati reali di energia dal campo; quest'ultimo simula il calcolo della piattaforma CA per la valutazione del SOC del veicolo. L'andamento del $SOC_{teorico}$ è stato stimato mediante il modello lineare 3.2:

$$SOC_{teorico} = SOC_{in} + \eta(\sum_{k=1} P_{computed_k})\frac{100}{BC60} \tag{5.18}$$

dove SOC_{in} è il valore dello stato di carica iniziale della macchia, k rappresenta k-esimo l'intervallo di tempo in cui la target rimane costante, $P_{computed_k}$ kW rappresenta la potenza della computata dall'algoritmo nel k-esimo intervallo intesa come valor medio, mentre η è il rendimento globale pari al rendimento preso in considerazione nell'algoritmo di ottimizzazione: tale valore è pari a 0.8.

Mentre il SOC_{ca}

$$SOC_{ca} = SOC_{in} + \eta(\sum_{k=1} \frac{E_k}{BC}) \tag{5.19}$$

dobe E_k rappresnta l'enrgia assorbita nel k-esimo intervallo dal veicolo. Eventuali scostamenti tra la potenza assorbita dalla macchina e la $P_{computed}$ incideranno sulla differenza tra $SOC_{teorico}$ e il SOC_{ca} che simula quello calcolato dall'algoritmo .
Per la valutazione dell'andamento del SOC_{reale}, non essendo rilevabile durante la ricarica in quanto il veicolo risulta spento, si è utilizzata la formulazione:

$$SOC_{reale} = SOC_{in} + \eta_{ricarica}(\sum_{k=1} \frac{E_k}{BC}) \tag{5.20}$$

dove $\eta_{ricarica}$ viene valutato alla fine di ogni prova, calcolato come rapporto tra:

$$\eta_{ricarica} = (\frac{E_{reale}}{E_{teorica}}) \tag{5.21}$$

dove E_{reale} rappresenta l'energia totale assorbita dalla macchina durante l'intero processo di ricarica mentre il valore di $E_{teorica}$ viene ricavato mediante l'espressione:

$$E_{teorica} = (SOC_{fin} - SOCin)BC \tag{5.22}$$

La presenza di eventuali errori sulla lettura e sulla stima del $SOCin$ da parte del veicolo ed eventuali variazioni della reale capacità della batteria incideranno sulla valutazione del rendimento di ricarica.
Il valore del fattore di potenza è un dato che il contatore non fornisce, ma può essere ricavato tramite formule inverse. Nel caso in cui il veicolo sia un carico equilibrato, il fattore di potenza può essere determinato come:

$$Cos\varphi = \frac{P}{3 * V * I} \tag{5.23}$$

L'incertezza sul fattore di potenza [23] così calcolato può essere valuta mediante una stima dell'incertezza con modello probabilistico categoria B. Supponendo che l'incertezza dichiara dal costruttore abbia un elevato livello di fiducia pari al 90% e considerando una distribuzione normale, la stima dell'incertezza tipo risulta essere:

$$u = \frac{a}{K} = \frac{\varepsilon_{f\%}}{100K} f \tag{5.24}$$

dove K è il fattore legato al livello di fiducia dell'incertezza ed è ricavato dalla teoria della probabilità, nel caso considerato $K = 1.64$; mentre la variabile a rappresenta metà dell'intervallo dell'incertezza dichiarata.
Per il calcolo dell'incertezza del fattore di potenza, si è fatto riferimento alla teoria di propagazione dell'incertezza con modello probabilistico. Le grandezze di tensione potenza e corrente vengono considerate statisticamente indipendenti tra di loro. Questa però è una

forte semplificazione poichè dall'analisi del processore si è notato che la potenza attiva viene ricavata tramite le misure di tensione e di corrente. A conclusione di questa valutazione l'incertezza tipo del $Cos\varphi$, può essere calcolata tramite la formula:

$$u^2_{Cos\varphi} = ((\frac{\partial|Cos\varphi|}{\partial V})^2 u_v^2 + (\frac{\partial|Cos\varphi|}{\partial I})^2 u_I^2 + (\frac{\partial|Cos\varphi|}{\partial P})^2 u_P^2) = \tag{5.25}$$

Sostituendo nelle formule dell'incertezza tipo le incertezze relative dichiarate dai costruttori si ottiene:

$$u^2_{cosphi} = \frac{Cos\varphi}{100 * K}\sqrt{[(\varepsilon_{V\%})^2 + (\varepsilon_{I\%})^2 + (\varepsilon_{P\%})^2]} \tag{5.26}$$

$$\varepsilon_{Cos\varphi\%} = 4\% \tag{5.27}$$

5.5 Risultati ottenuti primi test

Si illustrano i risultati ottenuti dai test effettuati con la struttura di smart charging sviluppata durante Mobincity.

5.5.1 Veicolo A

Test 1 A Nella prima prova si è imposta alla load area una curva target costante pari a 10 kW; tale prova mira a simulare una disponibilità della rete limitata. Il veicolo presenta uno stato di carica iniziale pari a 55% e si è caricato fino al 100%. Il valore della curva threshold 44 kW risulta essere fuori scala rispetto alle altre potenze in gioco per questo non viene riportata nei grafici.
SI può osservare come il set point della $P_{computed}$ segua perfettamente la curva target

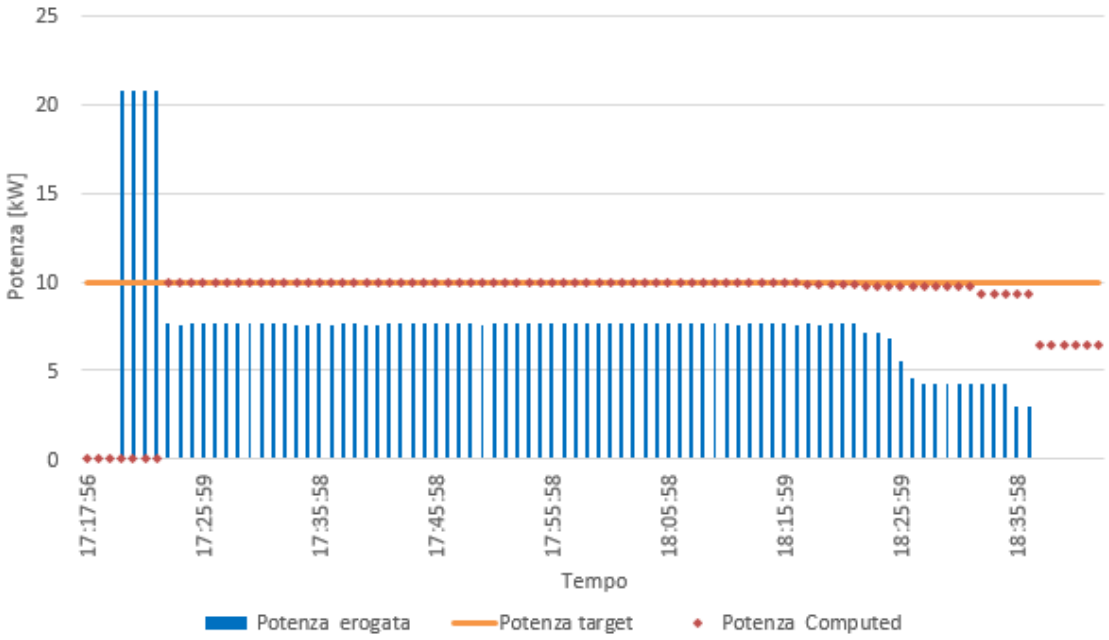


Figura 5.9: Andamento della curva target, $P_{cumputed}$ e $P_{erogata}$ test 1 A

questo mostra un'elevata precisione dell'algoritmo di smart charging.Si nota invece, che la potenza assorbita dal veicolo non segue il set point di riferimento ma si porti ad un valore più basso.
Inizialmente si ha un assorbimento di potenza molto elevato poiché il veicolo non è ancora considerato nella flotta di veicoli con carico modulato.
Dal report di EMM si osserva che i durante l'intero processo di ricarica le correnti assorbite sulle tre fasi dal veicolo sono uguali tra loro, ciò determina che questi risulti un carico equilibrato. Questo permette di avere un unico fattore di potenza legato a tutte e tre le fasi calcolato con la formula 5.23.
L'analisi dei registri del CP permette di ricavare i valori di corrente settati al veicolo. Il

confronto tra i valori di riferimento e la corrente media assorbita dalla macchina permette di ricavare 'Errore di corrente'. L'andamento dell'errore di corrente viene riportato inieme all'andamento del SOC_{reale}.

Si osserva che il veicolo assorbe una corrente minore rispetto al riferimento, in particolare,

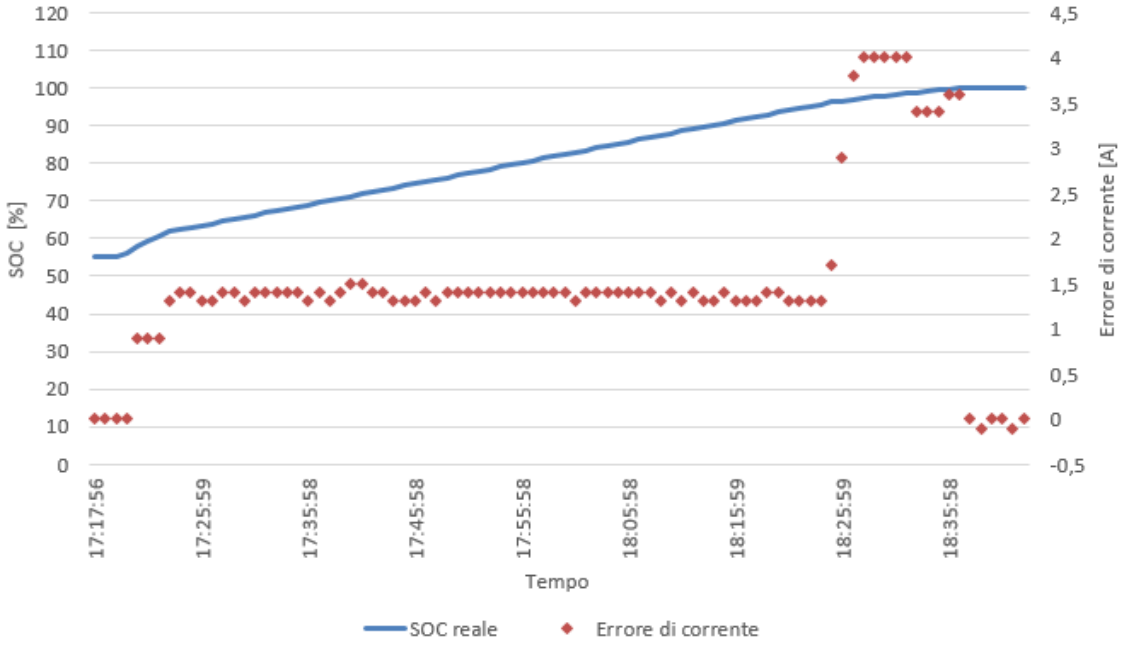


Figura 5.10: Andamento dell'errore di corrente e SOC_{reale} test 1 A

per bassi valori di SOC_{reale} ,l'errore di corrente si mantiene costante mentre in corrispondenza del fine ricarica, a circa il 90% del SOC_{reale}, l'errore aumenta. La caratteristica del fine ricarica risulta così diversa da quella attesa basata sulla teoria delle batterie 3.3 l'aumentare dello stato di carica la corrente viene ridotta progressivamente per poi mantenersi costante fino al termine della ricarica.

Attraverso l'analisi del fattore di potenza si è evidenziato che lo sfasamento tra tensione e corrente non risulta essere costante come atteso, ma varia durante processo di ricarica.

In particolare il grafico evidenzia che per elevati valori di PWM il $Cos\varphi$ risulta essere quasi unitario mentre decresce e si mantiene costante ad un valore di 0.8; va osservato inoltre che, in corrispondenza del fine ricarica, anche se il PWM è costante, il fattore di potenza diminuisce. In corrispondenza della fase finale di ricarica, quando viene imposto un PWM pari a 15 %, il fattore di potenza si annulla e il veicolo assume un comportamento completamente reattivo.

L'energia erogata nel processo di ricarica, riportata nel registri di EMM, è pari a 10.3 kWh e il rendimento complessivo di $\eta_{ricatrica}$=0.96. Tale valore risulta essere molto più elevato rispetto a quanto stimato da ChargeAdvaisor che considera un valore pari a 0.8.

Il confronto tra l'andamento del $SOC_{teorico}$ e l'andamento del SOC_{ca} mostra elevata discrepanza tra i due modelli questo perché la potenza assorbita dal veicolo risulta essere

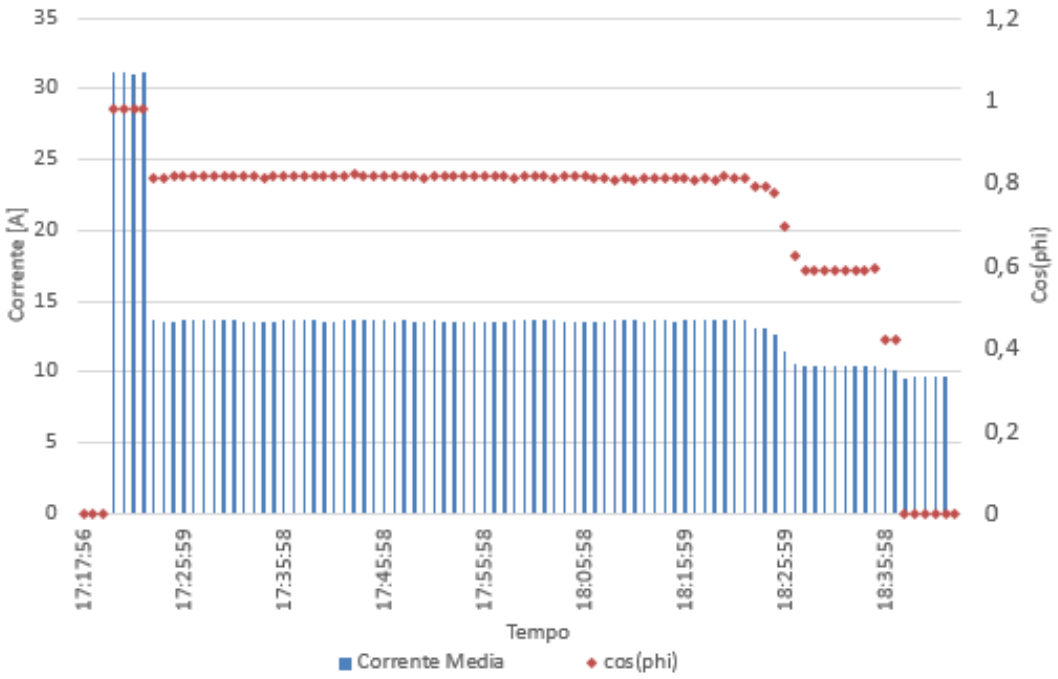


Figura 5.11: Assorbimento di corrente e $Cos\varphi$ test 1 A

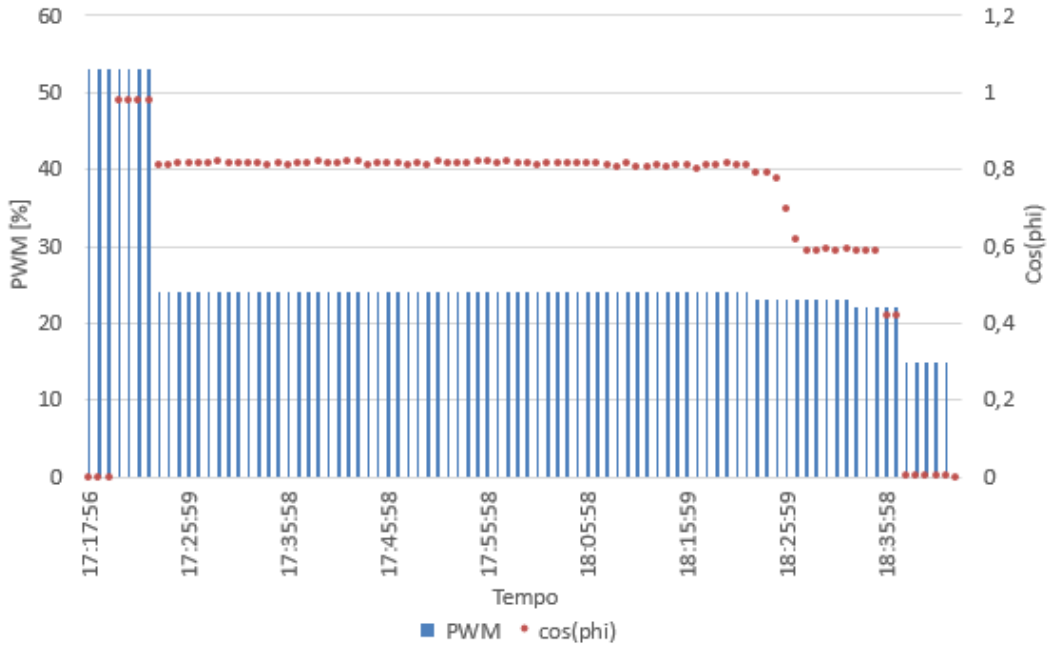


Figura 5.12: Andamento PWM e $Cos\varphi$ test 1 A

minore di quella attesa.

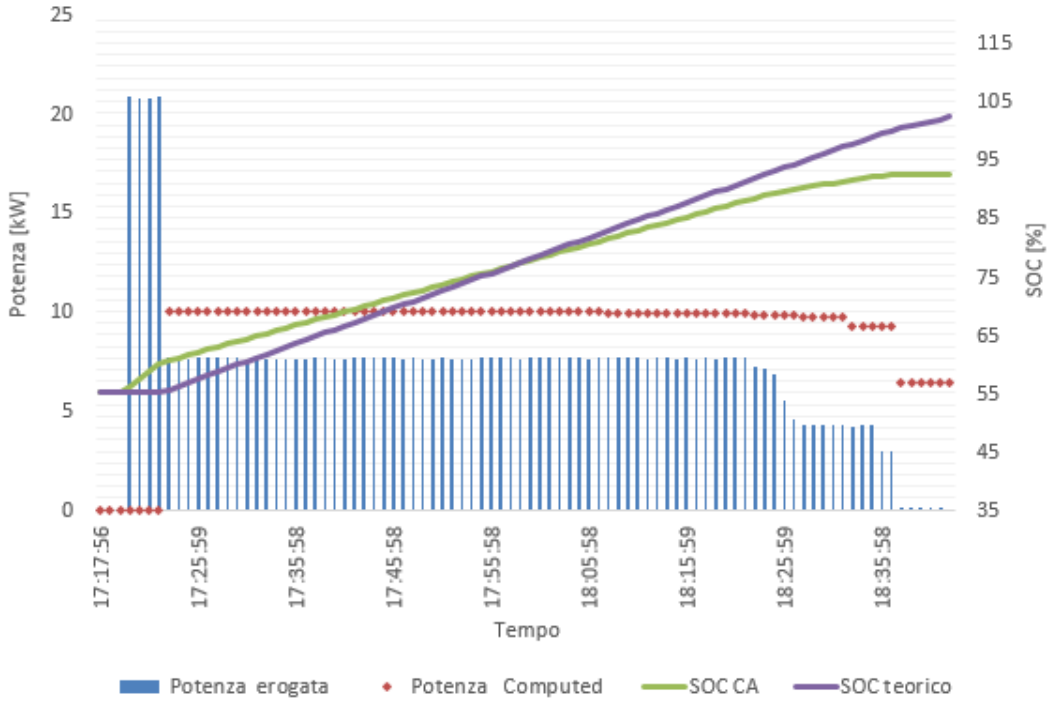


Figura 5.13: Andamento $SOC_{teorico}$ e SOC_{ca} test 1 A

Inoltre inaspettatamente, si è osservato che per ChargeAdvaisor la ricarica termina in corrispondenza del 100%del $SOC_{teorico}$. Se avesse utilizzato i dati reali, lo stato di carica in corrispondenza dell'ultimo set point avrebbe dovuto essere di circa il 95% (SOC_{ca}) e la ricarica avrebbe dovuto continuare poichè non arrivata al valore finale desiderato.
Va osservato come l'evoluzione del $SOC_{teorico}$ e quella del SOC_{reale} si discostino poco nonostante vi sia un elevata discrepanza tra il rendimento della ricarica (0.96) e il rendimento (0.8) considerato per il calcolo del $SOC_{teorico}$ 5.18. Questa compensazione è dovuta alla differenza tra la potenza relamente assorbita dal veicolo e la potenza $P_{computed}$.

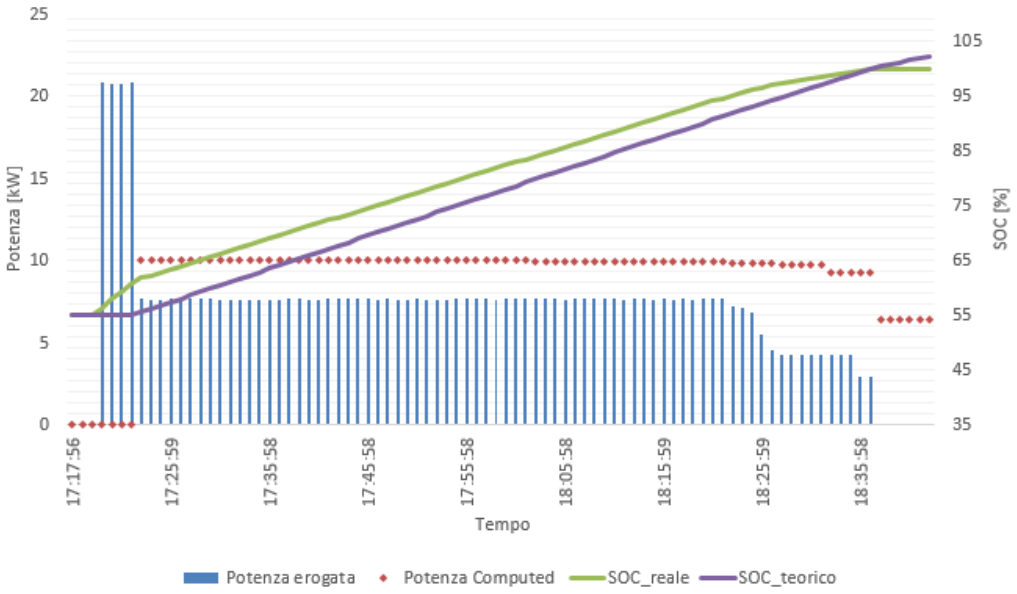


Figura 5.14: Andamento del SOC_{reale} e $SOC_{teorico}$ test 1 A

Test 2 A Nella seconda prova si è voluta applicare alla load area una curva target a rampa decrescente per simulare variazioni repentine della generazione fotovoltaica. Il veicolo presenta uno stato di carica pari al 40% e lo si vuole caricare fino al 100%.

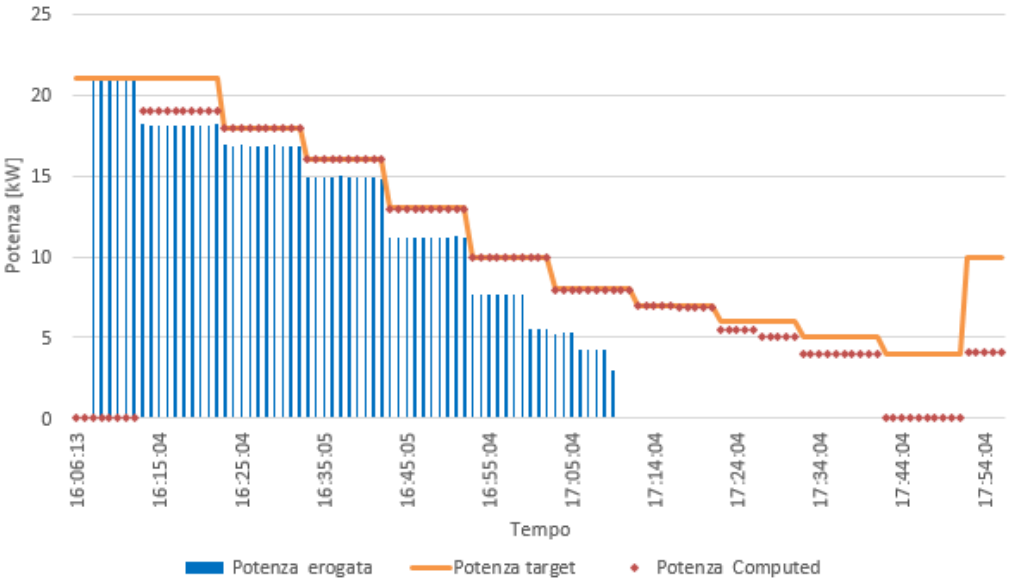


Figura 5.15: Andamento della curva target, $P_{cumputed}$ e $P_{erogata}$ test 2 A

Come evidenziato nel precedente test il veicolo assorbe una potenza minore rispetto a

quella di riferimento. In particolare più il set point decresce più lo scostamento di potenza aumenta. Considerando il valore di corrente di riferimento e la media delle tre correnti si osserva come anche in questo caso il veicolo assorbe una corrente minore rispetto a quella impostata. In questo caso si osserva un amento dell'errore di correte e poi l'errore si mantiene costante.

Per quanto riguarda il fattore di potenza anche in questo caso non risulta essere costante

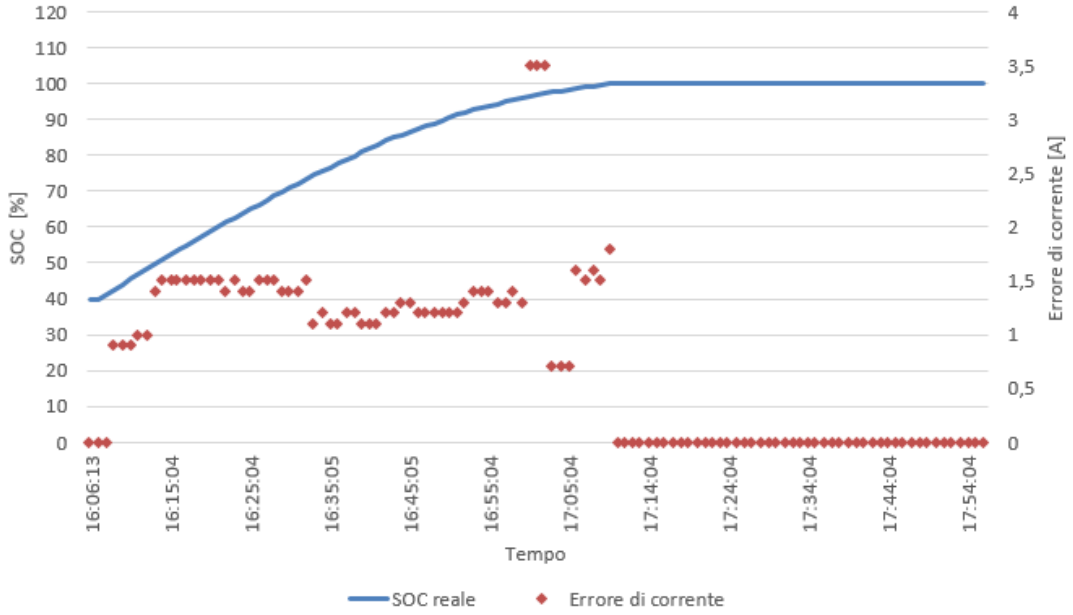


Figura 5.16: Andamento dell'errore di corrente e SOC_{reale} test 2 A

ma varia, in particolare l'andamento a rampa mette in evidenza che è possibile un legame tra PWM e il $Cos\varphi$del veicolo. Rispetto al caso precedente però non si nota il comportamento completamente reattivo che si è riscontrato in precedenza. l'errore si mantiene costante.

L'energia assorbita durante il processo 14.147 kWh e il rendimento complessivo risulta essere $\eta_{ricarica}$=0.93

Come evidenziato dal grafico la stima della ricarica di ChargeAdvaisor si protrae maggiormente nel tempo rispetto al termine reale.

Effettuando il confronto tra il $SOC_{teorico}$ e il SOC_{ca} si osserva che anche in questo caso a causa della discrepanza tra l'assorbimento reale di potenza e la potenza computata i due andamenti si discostano in particolare si nota come la ricarica per CA termi proprio in corrispondenza del $SOC_{teorico}$ a conferma di quello affermato in precedenza che CA utilizza i dati teorici e non reali per la stima dell'andamento di ricarica.

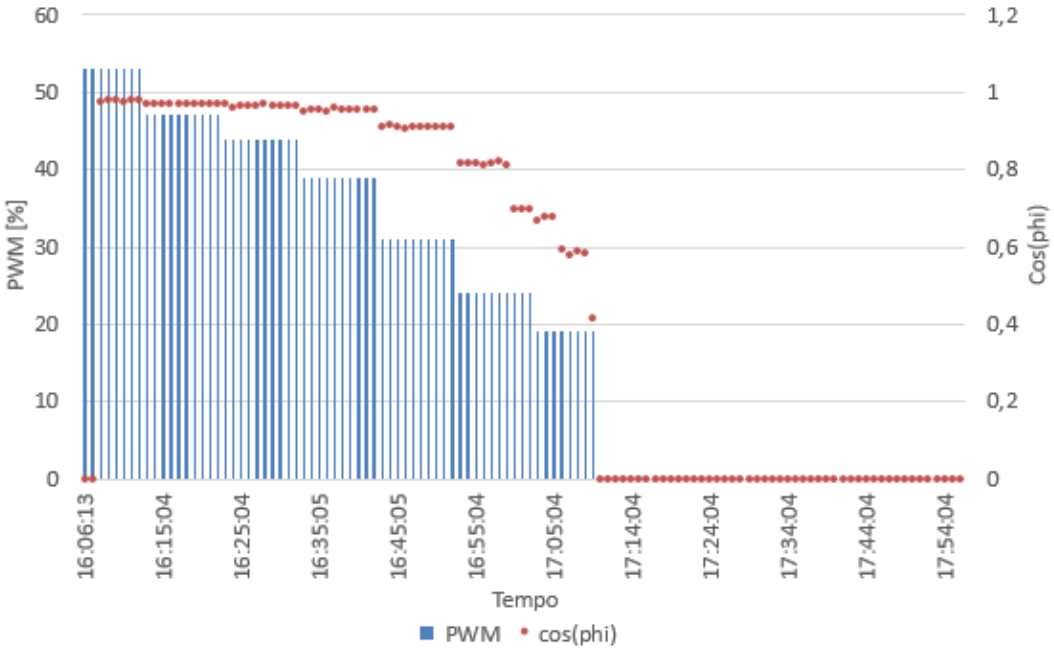


Figura 5.17: Andamento PWM e $Cos\varphi$ test 2 A

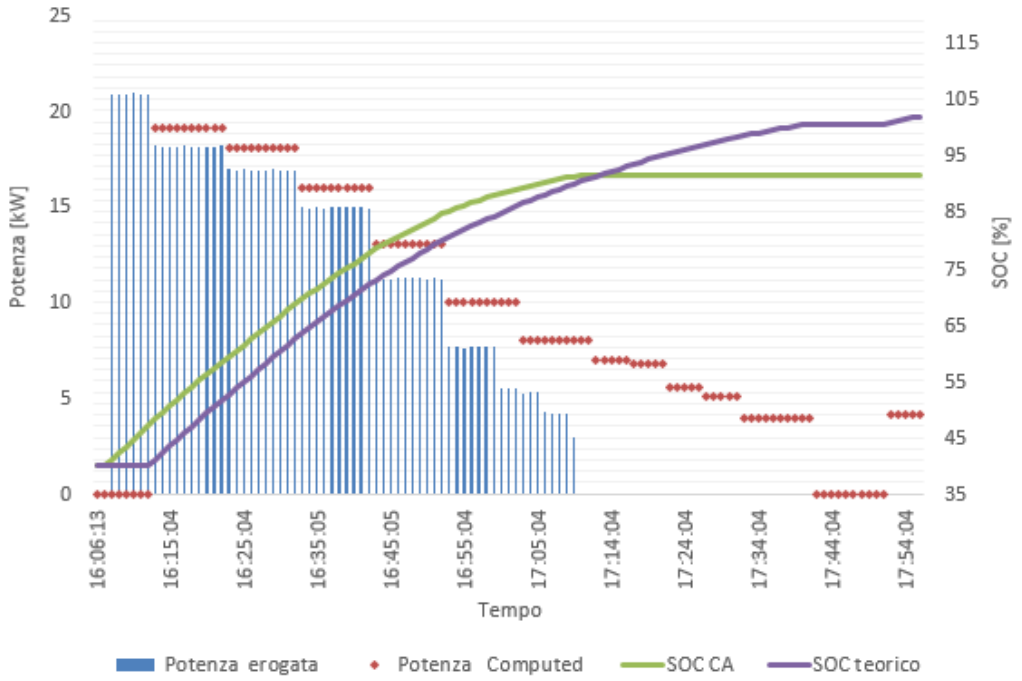


Figura 5.18: Andamento $SOC_{teorico}$ e SOC_{ca} test 2 A

5.5.2 Veicolo B

Test1B Nella prima prova si imposta una curva target pari a 10 kW costante nel tempo, il veicolo presenta uno stato di carica pari a zero ed è stato caricato fino al 100%.
Si osserva che il veicolo segue perfettamente il valore di riferimento della potenza, non si notano scostamenti come nel caso precedente.

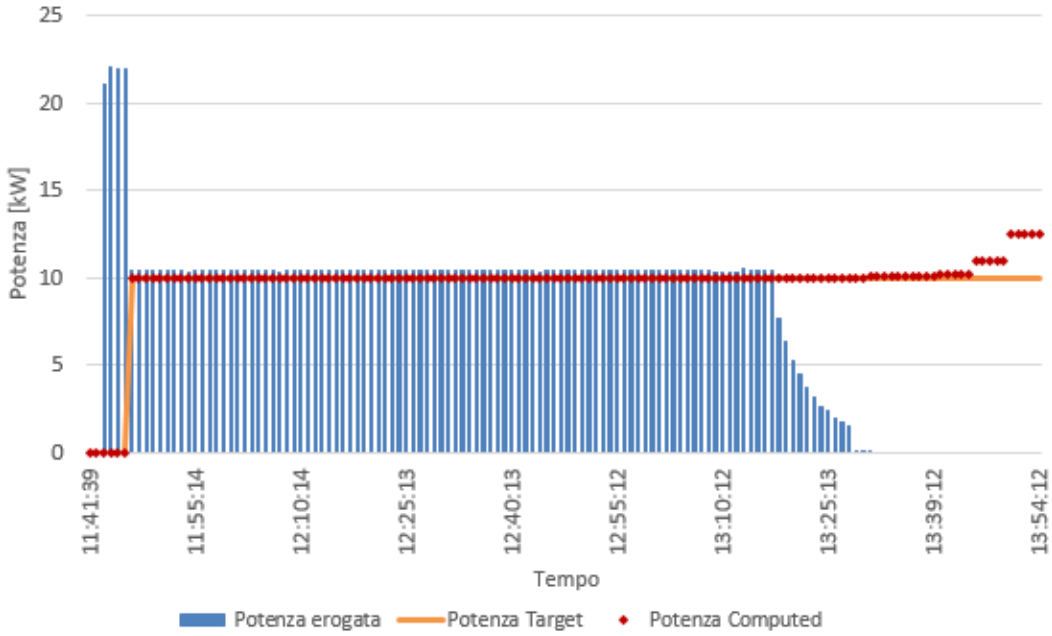


Figura 5.19: Andamento della curva target, $P_{cumputed}$ e $P_{erogata}$ test 1 B

Inoltre in corrispondenza del fine ricarica si può notare il tipico andamento della ricarica con controllo a tensione costante in cui la corrente viene ridotta progressivamente fino ad un valore minimo che termina la ricarica.
Analizzando i valori di corrente assorbiti dal veicolo questo può essere considerato come un carico equilibrato, infatti le correnti sulle tre fasi risultano essere uguali tra di loro.
Per quanto riguarda l'errore sul valore della corrente calcolato come differenza tra i valori impostati dal CP e il valor medio di Corrente anche in questo caso i due veicoli presentano un comportamento totalmente differente. Lo scostamento per quanto riguarda il veicolo B risulta essere praticamente assente fino a quando lo stato di carica raggiunge un valore del 93-94% e si nota un amento progressivo dell'errore legato alla riduzione della corrente rispetto al set point di riferimento costante. Quando il veicolo non assorbe più corrente non ha senso valutare l'errore di corrente. Attraverso l'analisi del fattore di potenza si osserva che il cosphi del veicolo si mantiene costante, pari a 1, per l'intero processo di ricarica.
L'energia assorbita durante il processo di ricarica è stata pari a 17.97 kWh con un rendimento $\eta - ricarica$=0.98. Va osservato però che il veicolo parte da uno stato di ricarica letto sul dispositivo analogico. Cosi come per il veicolo A Charge Advaisor sovrastima le

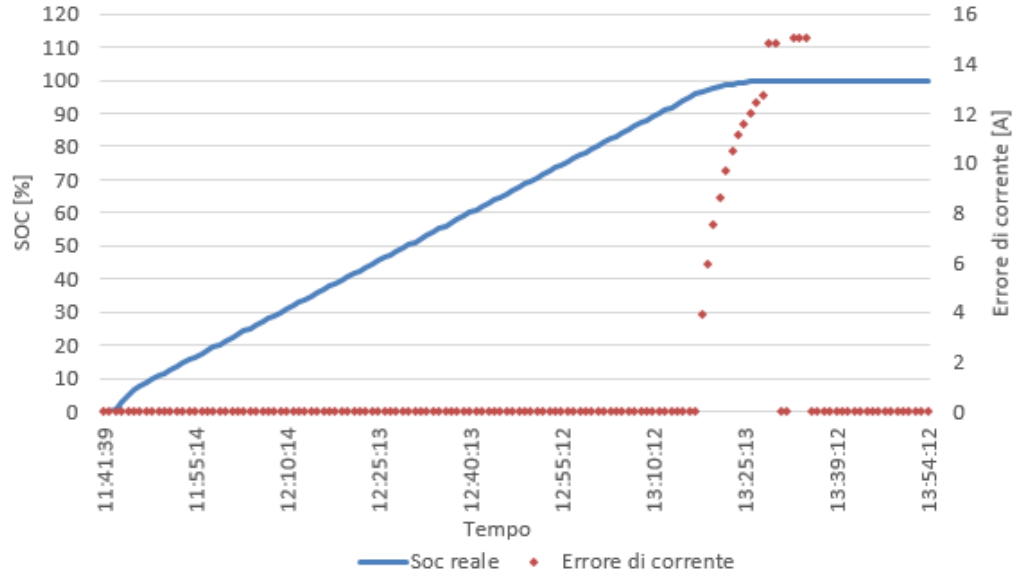


Figura 5.20: Andamento dell'errore di corrente e SOC_{reale} test 1B

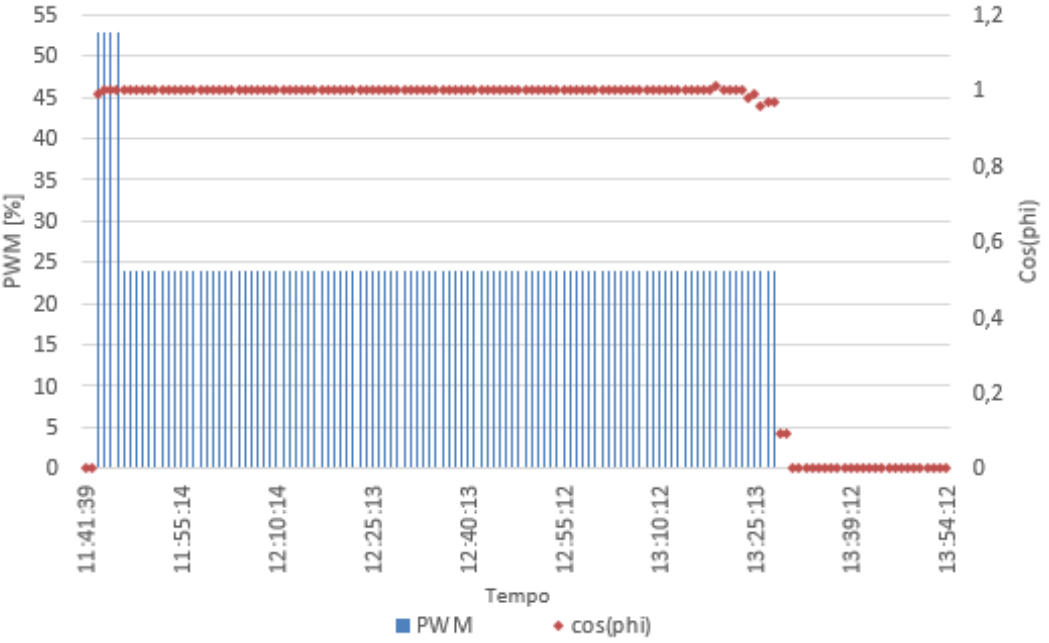


Figura 5.21: Andamento PWM e $Cos\varphi$ test 1 B

perdite.
Effettuando il confronto tra $SOC_{teorico}$ e SOC_{ca} quello che si nota è che è presente un certo errore tra i due, inoltre il $SOC_{teorico}$ arriva al 100% in corrispondenza dell'ultimo

valore di $P_{computed}$ non nulla di ChargeAdvaisor, cosi come è successo nei casi precedenti mentre il SOC_{ca} non raggiunge il 100% ma rimane fisso poiche il veicolo non assorbe più potenza. Per quanto riguarda il confronto tra SOC_{reale} e quello teorico si osserva che lo

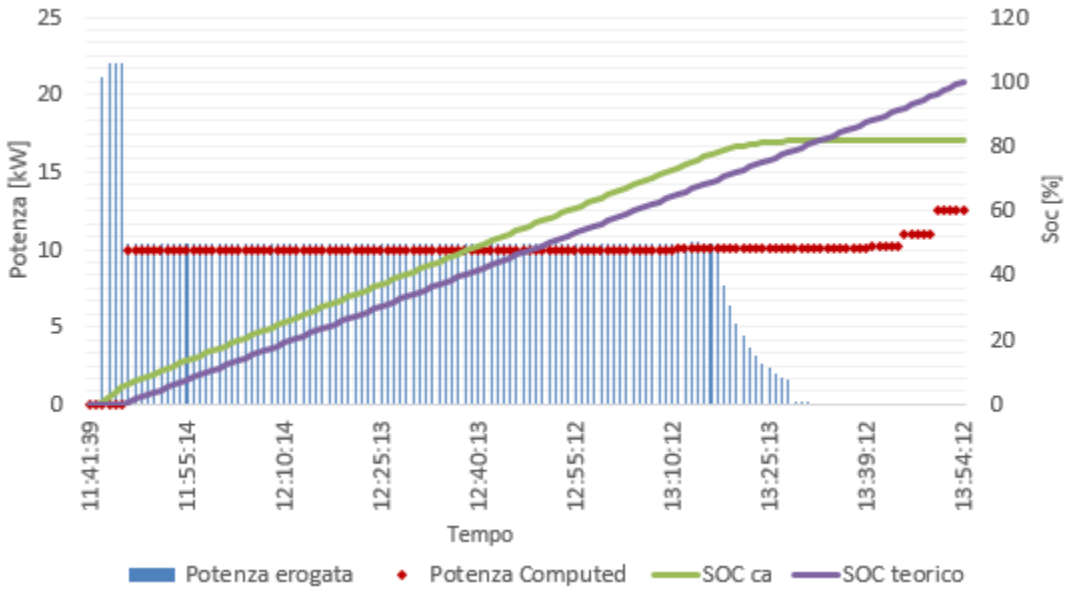


Figura 5.22: Andamento $SOC_{teorico}$ e SOC_{ca} test 1 B

stato di carica reale raggiunge il 100 % molto prima di quello teorico.

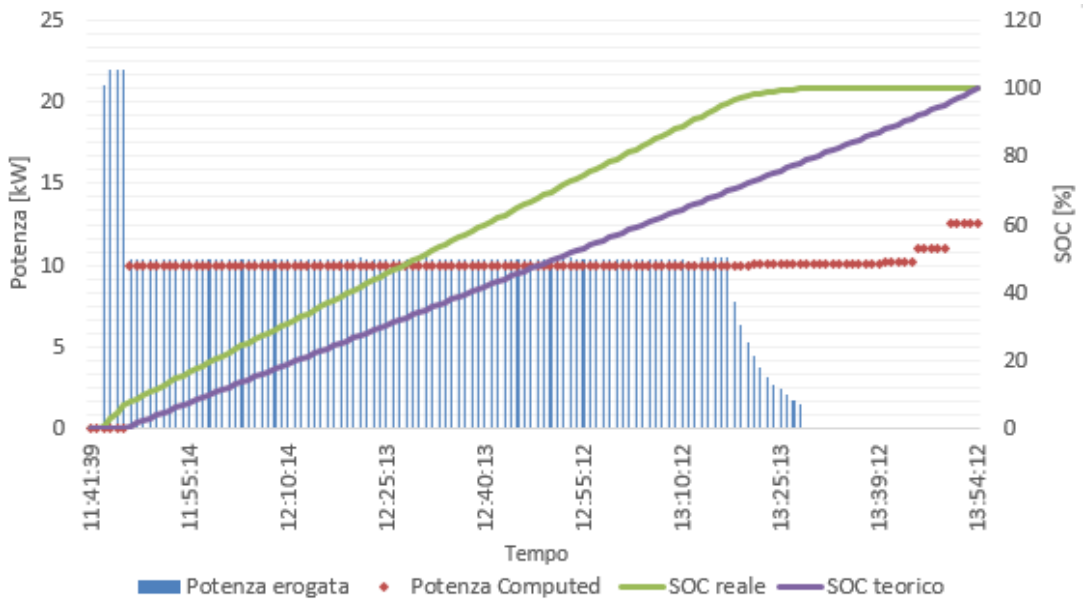


Figura 5.23: Andamento del SOC_{reale} e del $SOC_{teorico}$ test 1 B

Test2B Nella seconda prova si è applicata alla load area una curva target a rampa decrescente per simulare piccole variazioni della generazione fotovoltaica. Il veicolo nella prova presenta uno stato di carica pari al 10% e lo si è caricato fino al 100%.
Dall'andamento della potenza si nota come il veicolo assorbe una potenza superiore a quella di riferimento. Arrivati ad un certo punto come nel caso precedente si nota una riduzione della potenza assorbita.

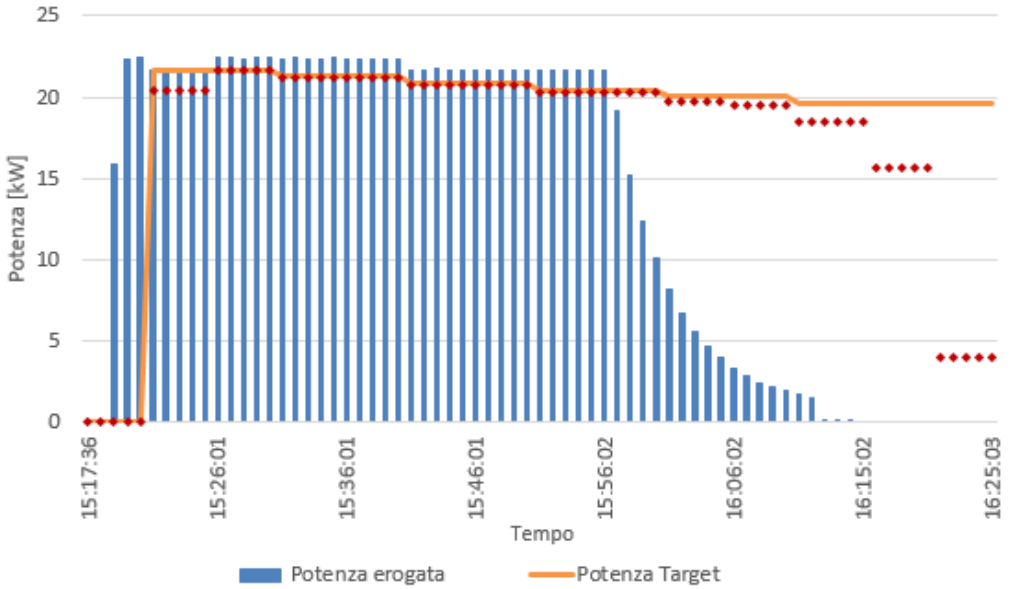


Figura 5.24: Andamento della curva target, $P_{cumputed}$ e $P_{erogata}$ test 2 B

Per quanto concerne l'errore sulla corrente quello che si nota un piccolo scostamento negativo, cioè la macchina assorbe un po' di più di quello imposto dal set point della colonnina, tale assorbimento è piccolo e quindi non intervengono i sistemi di protezione interni della colonnina. Successivamente si nota un amento progressivo dell'errore in corrispondenza di uno stato di carica pari a 85-90% legato alla limitazione del controllo di tensione. Anche in questo caso per tutto il periodo della ricarica il fattore di potenza rimane costante e pari all'unità.
L'energia assorbita durante il processo di ricarica è stata pari a 15.85 kWh con rendimento $\eta_{ricarica}$=0.99 anche in questo caso si verifica una sovrastima delle perdite di ChargeAdvaisor.
Analizzando l'andamento del $SOC_{teorico}$ e quello del SOC_{ca} si nota come i due andamenti si mantengano paralleli, tale andamento è legato al fatto che $SOC_{teorico}$ non considera la ricarica libera iniziale quando il veicolo non è ancora parte della flotta dei carichi modulati. Verso il fine ricarica però si osserva una differenza elevata tra i due andamenti.

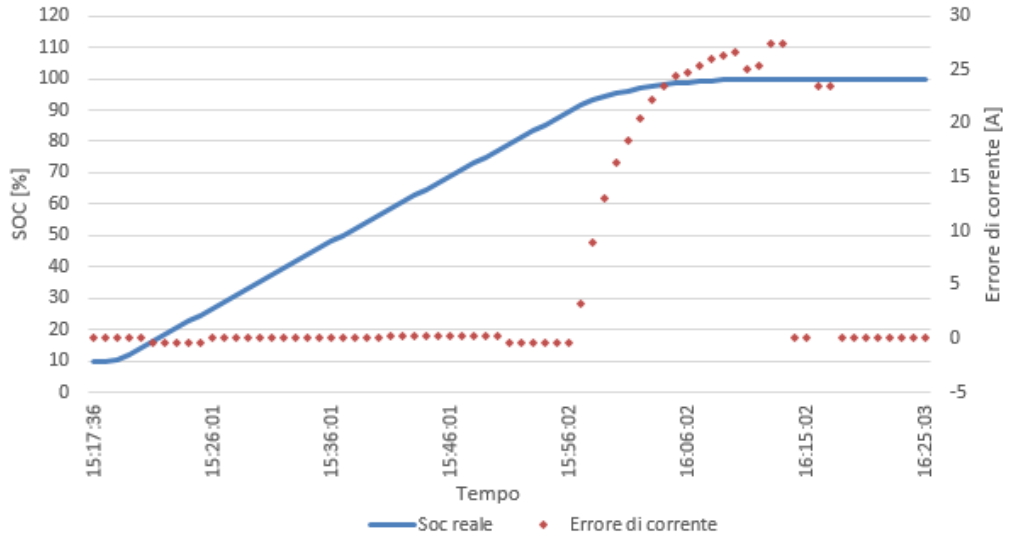


Figura 5.25: Andamento dell'errore di corrente e SOC_{reale} test 2 B

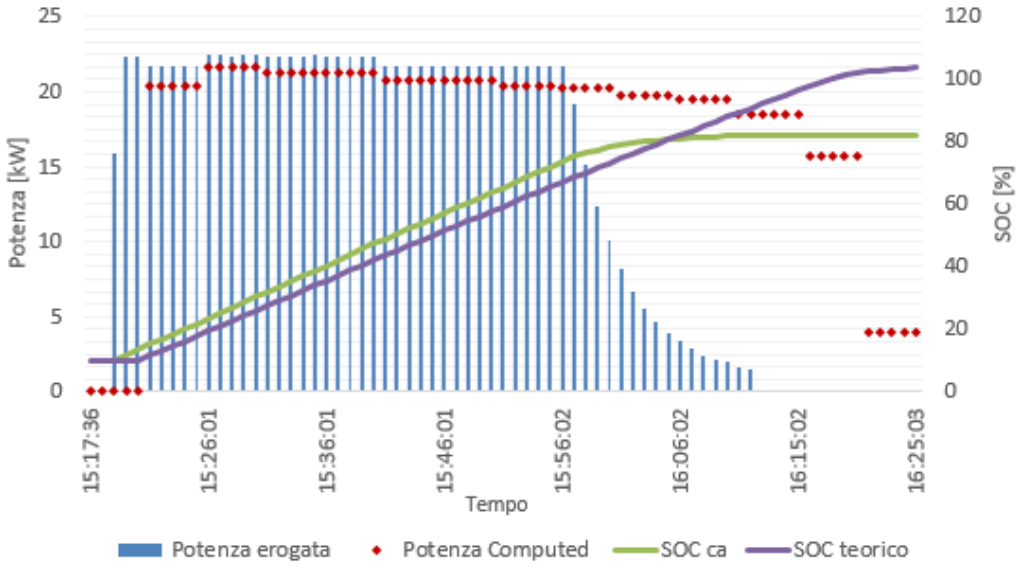


Figura 5.26: Andamento del $SOC_{teorico}$ e del SOC_{ca} test 2 B

Capitolo 6

La nuova generazione di ricariche "smart"

Nell'ottica di un risparmio di potenza ed energia, beni limitati nelle reti attuali occorre che i veicoli si adeguino a queste esigenze. Per cui se da un lato è necessario che il comportamento dei veicoli segua il più possibile la disponibilità di potenza fornita dal sistema di controllo grazie al calcolo dell'ottimizzazione, dall'altro è necessario che il sistema di controllo stesso sia capace di stimare correttamente il comportamento del veicolo. Si vuole pertanto proporre una possibile soluzione che vada a migliorare questi aspetti e che permetta di aumentare l'efficienza del sistema di smart charging sviluppato durante il progetto europeo di Mobincity.

6.1 Problematiche riscontrate

Dall'analisi dei test preliminari effettuati si nota che sono presenti alcune problematiche nella soluzione sviluppata.
In particolare come si evince dai grafici desritti (5.9) (5.19), l'ottimizzatore attribuisce ad ogni veicolo un numero di set point maggiore della quantità necessaria al completamento della ricarica; in altre parole è presente una stima sovrabbondante del comportamento del veicolo da parte dell'ottimizzatore, che mantiene in ricarica mezzi già saturi a scapito di altri ancora da caricare.
Inoltre i veicoli non seguono adeguatamente il set point, introducendo cosi un errore di potenza tra la $P_{computed}$ e la potenza reale assorbita che coincide con quella erogata (P_{reale})
.
Per avere una stima sull'efficienza del sistema si può calcolare il rapporto tra l'energia reale erogata dalla macchina e l'energia fittizia che ChargeAdvaisor attribuisce alla ricarica:

$$\eta_{Sistema} = \frac{\sum_{k=1} P_{reale_k}}{\sum_{k=1} P_{computed_k}} \tag{6.1}$$

Dove:

- k è il periodo di campionamento di EMM cioè pari ad un minuto
- $P_{computed_k}$ è il valore della potenza $P_{computed}$ al minuto k-esimo
- P_{reale_k} la potenza reale assorbita dal veicolo e che coincide con quella erogata dal sistema.

Bassi valori del rendimento del sistema mostreranno un comportamento di stima errato dell'algoritmo mentre valori prossimi all'unità metteranno in evidenza un'ottima capacità dell'algoritmo di allocare correttamente la potenza a disposizione.
Per quanto riguarda i test descritti nel capitolo precedente (5.5) si mostra che l'efficienza $\eta_{Sistema}$ risulta essere bassa:

- per il test 1 A $\eta_{Sistema}$= 0.7
- per il test 2 A $\eta_{Sistema}$= 0.71
- per il test 1 B $\eta_{Sistema}$= 0.77
- per il test 2 B $\eta_{Sistema}$= 0.73

I fattori che incidono sull'efficienza del sistema sono:

- Errore sulla stima del rendimento
- Errore sul comportamento al fine ricarica
- Errore di disallineamento della tensione di EMM e la rete
- Errore sul fattore di potenza non unitario
- Errore sulla corrente assorbita

6.1.1 Errore sulla stima del rendimento

Il rendimento rappresenta sicuramente uno dei parametri principali per una stma reale del comportamento del veicolo. Dalla formulazione (5.22) si evince che eventuali variazioni della reale capacità della batteria rispetto a quella nominale (usura) ,l'incertezza sul SOC_{in} fornito dal veicolo e l'errore sulla lettura contribuiscono ad una cattiva determinazione dell'energia teorica (5.22). Non è possibile inoltre scaricare completamente le batterie, per tale motivo l'indicazione di stato di carica zero in realtà è poco significativa, poiché all'interno delle batterie è presente una carica residua.
Tutti questi fattori, unitamente alle diverse caratteristiche tecnologiche delle batterie e dei dispositivi di ricarica interni al veicolo elettrico, contribuiscono ad una difficile previsione sul rendimento; considerare un unico rendimento comune a tutti i veicoli risulta essere troppo semplificativo.
Tuttavia una stima troppo elevata delle perdite provoca un errore tra SOC_{reale} e lo stato di

carica stimato SOC_{ca} e contribuisce ad avere una bassa efficienza del sistema con tempi di ricarica sempre maggiori. In particolare utilizzando i dati reali e non quelli ideali, con una stima trappo conservativa del rendimento, le ricariche tenderebbero a un tempo infinito perché per l'algoritmo non sarebbe mai raggiunto lo stato di carica desiderato dal cliente. D'altra parte, la sottostima delle perdite potrebbe provocare la non completa carica delle batterie, non rispettando così i vincoli imposti dal cliente.

6.1.2 Errore sul comportamento al fine ricarica

Nella fase finale di ricarica delle batterie il controllo di tensione impedisce che vengano superati i vincoli sulla tensione massima. In particolare considerando la formulazione (3.3) relativa ad un'unica cella, durante la fase a tensione costante risulta

$$V_{cella} = Voc + R * I_{cella} = cost \tag{6.2}$$

Più lo stato di carica aumenta, più aumenta Voc, poichè sono direttamente legati ([3]): affiché la tensione sia costante, la corrente I_{cella} deve essere ridotta. Questo comporta una limitazione sulla potenza massima che può essere assorbita durante la fase di ricarica con controllo di tensione costante.
Questa caratteristica ,tipica del comportamento delle batterie, però non viene presa in considerazione dall'algoritmo, che considera sempre la capacità di assorbimento massima della batteria.
In tal modo si introduce un elevato gap di potenza tra la $P_{computed}$ e la potenza reale assorbita (5.24), riducendo così l'efficienza del sistema; infatti l'energia non utilizzata per la ricarica avrebbe potuto essere impiegata per l'alimentazione di altri veicoli, permettendo loro di assorbire una corrente maggiore e quindi avere ricariche più veloci.

6.1.3 Errore di disallineamento della tensione di EMM e la rete

Il set point di corrente preso come riferimento viene determinato secondo le formule 5.14; l'utilizzo di tensione di 380 V e non 400 V porta a determinare una corrente maggiore e quindi il mezzo può assorbire una potenza più elevata rispetto alla $P_{computed}$.
Supponendo di considerare un veicolo in cui non si verifichino errori sulla corrente assorbita e che presenti un fattore di potenza unitario, è possibile determinare l'effetto delle trasformazioni introdotte dal centro di controllo EMM e dalla stazione di ricarica, che limita la corrente a 32 A trifase.Ciò determina che l'errore tra la $P_{computed}$ e la P_{reale} sia limitato in corrispondenza dei 22 kW, mentre aumenti in una fase successiva. Dal grafico si nota come l'effetto delle trasformazioni sia più accentuato per elevati valori di potenza.

6.1.4 Errore sul fattore di potenza non unitario

Il fattore di potenza non unitario rispetto alla problematica precedentemente analizzata, contribuisce a ridurre la potenza attiva assorbita. La piattaforma ChargeAdvaisor non prevede la presenza di veicoli con fattore di potenza diverso da 1 per questo motivo non è possibile compensare il suo effetto. La presenza di un fattore di potenza non unitario fa

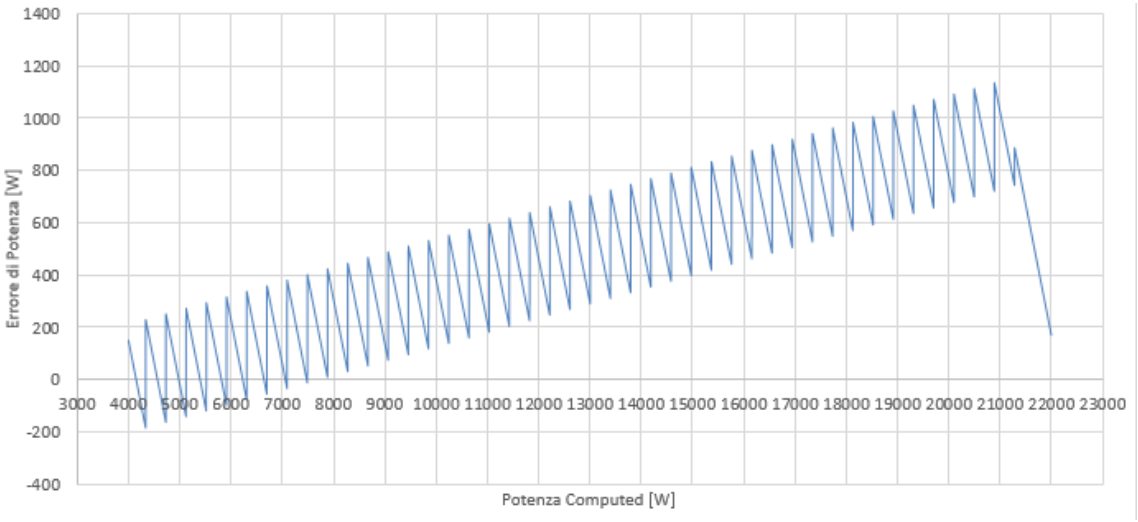


Figura 6.1: Andamento dell'errore di potenza introdotto dalle trasformazioni del centro e limitazione della colonnina

sì che la ricarica si prolunghi rischiando di superare i limiti imposti dal cliente.
Inoltre, nel caso di configurazione V2B, in cui si cerca di massimizzare la ricarica con la produzione fotovoltaica, questo produce un'efficienza minore poiché il veicolo carica ad una potenza minore rispetto a quella disponibile.

6.1.5 Errore sulla corrente assorbita

Nel caso in cui il veicolo assorba una corrente maggiore rispetto a quella settata, la norma IEC 61851 [28] prevede la possibilità di terminare la ricarica. In particolare il veicolo deve essere disalimentato immediatamente se la corrente supera la portata del conduttore mentre è permesso eccedere di una certa percentuale il valore di corrente imposto dal circuito di controllo PWM, qualora questo sia inferiore al valore nominale della stazione.
Per evitare di superare tali limiti è possibile che i costruttori settino il veicolo in modo tale che riduca di una certa quota il valore letto sul circuito pilota di controllo PWM, considerando che la norma non prescrive nulla sulla precisione di inseguimento del set point.
La minore corrente assorbita durante la ricarica provoca un aumento della durata della ricarica stessa; il sistema non può intervenire in nessun modo affinché la corrente si porti al valore desiderato. Un assorbimento di corrente minore però fa sì che il veicolo si carichi più lentamente di quanto atteso utilizzando l'ottimizzatore , con conseguente allungamento dei tempi di ricarica e minore efficienza del sistema. Tale percentuale di potenza inutilizzata sarebbe potuta servire alla ricarica di altri veicoli.

6.1.6 Errore sulla lettura dei dati

La lettura dei dati dal campo è un'informazione essenziale per il corretto funzionamento del sistema. Infatti, se si dovessero verificare problemi sulla rete come interruzione dell'alimentazione, fluttuazioni della tensione, riduzione improvvise di corrente, il veicolo verrebbe caricato a potenza minore o non caricato affatto, e l'algoritmo potrebbe tenerne adeguatamente conto.
La non corretta memorizzazione dei dati porta l'algoritmo di ottimizzazione ad utilizzare i valori teorici della $P_{computed}$ come valori per l'aggiornamento dello stato di carica. Eventuali scostamenti dal comportamento ideale contribuiscono ad una errata valutazione del SOC_{reale}, che può portare ad interrompere la ricarica di veicoli che necessitano ancora di essere caricati ma anche a considerare erroneamente veicoli completamente carichi nel calcolo di ottimizzazione. L'algoritmo di ottimizzazione risulta essere quindi solo parzialmente in real-time poiché è capace di riconoscere nuove sessioni di ricarica ed escludere le ricariche terminate, ma sul reale comportamento non ha nessuna informazione.
Va osservato ancora che l'impiego dei dati reali per la stima corretta dello stato di carica richiede una buona conoscenza del rendimento del veicolo;infatti, come visto dai test (5.18), se l'algoritmo usasse i dati reali le ricariche, in teoria, si protrarrebbero all'infinito. L'impiego dei dati teorici invece garantisce che vi sia sempre una conclusione della ricarica.

6.2 Possible soluzione

Una possibile soluzione per migliorare l'efficienza della struttura sviluppata in Mobincity è di realizzare un sistema che permetta di memorizzare le ricariche suddividendole in base al modello di veicolo; questa raccolta di dati permette di effettuare un'analisi puntuale sulle singole vetture, tracciandone un preciso profilo utile per l'ottimizzazione della ricarica.
Considerate le problematiche sopra illustrate, si propone una possibile soluzione che si sviluppi in più punti, ognuno dei quali mira ad eliminare delle problematiche specifiche.

6.2.1 Soluzione per l'errrore sul rendimento

Per eliminare la problematica legata al rendimento poiché questo dipende sia dal veicolo, sia dall'andamento della ricarica e sia dalla stima dello stato iniziale di carica, è necessaria un'analisi statistica per una valutazione corretta del rendimento da attribuire.

6.2.2 Per errore di potenza durante la durante la fase a corrente costante

Per eliminare le problematiche relative al fattore di potenza, alla minore corrente assorbita dal veicolo e alla discrepanza tra la tensione di rete ed il valore considerato da EMM, la soluzione proposta mira a realizzare un blocco di pre-distorsione. Attraverso un'adeguata modifica della $P_{computed}$ viene annullato il gap di potenza che si riscontra durante la fase di ricarica a corrente costante. In altre parole la pre-distorsione permetterà al veicolo di assorbire una potenza pari al set point computato dall'algoritmo.

Per realizzare il blocco di pre-distorsione è necessario ricavare il modello del veicolo durante la fase a corrente costante.
In particolare per ogni valore di corrente di riferimento I_{cp}, è necessario ricavare il valore del fattore di potenza $Cos\varphi_{Icp}$ e l'errore di corrente ΔI_{cp}. Grazie a questi verrà determinata la $P_{attesa_{Icp}}$:

$$P_{attesa_{Icp}} = \{(I_{cp} - (\Delta I_{Icp}))(Cos\varphi_{Icp})(V_{rete})(\sqrt{3})\} \tag{6.3}$$

dove:

- V_{rete}=400 [V] tensione nominale della rete
- corrente attiva

$$I_{attiva_{Icp}} = \{I_{cp} - (\Delta I_{Icp})(Cos\varphi_{Icp})\} \tag{6.4}$$

- I_{cp} corrente imèposta sul circuito di pilotaggio
- ΔI_{Icp} errore tra la corrente imposta e la corrente media assorbita
- $Cos\varphi_{Icp}$ è in fattore di potenza caratteristico di ogni valore di I_{cp}

Attraverso una funzione di minimizzazione dell'errore tra $P_{computed}$ e P_{attesa} viene scelto il valore di corrente che deve essere fornito al veicolo, in particolare per ogni possibile valore della $P_{computed}$ è assegnato il valore di I_{cp} che deve essere impostato affinchè l'errore sia minimo.
Poiché il blocco di pre-distorsione è sviluppato per essere il tramite tra la piattaforma di ChargeAdvaisor e il centro di controllo EMM, è necessario trasformare adeguatamente il set point di corrente in un'indicazione di potenza.
Per evitare che, nell'operazione di troncatura del valore del PWM, venga modificato il valore di corrente è necessario maggiorare il valore I_{cp}. In particolare poiché ogni valore di PWM vale uno step di corrente di 0.6 [A] (dalla tabella A.3 della norma IEC 61851 [28]), se si maggiora di un valore compreso tra 0.01 [A](5.14)(che è quello sottratto già in precedenza dalla colonnina), e 0.6 [A], si evita che il troncamento modifichi il valore di corrente.
La soluzione scelta risulta essere quella di maggiorare di 0.2 A il valore di I_{cp} ottenuto e moltiplicare tale valore per 380 V e $\sqrt{3}$ (5.14) poichè sono i valori per cui verrà diviso il valore di potenza fornito dalla piattaforma ChargeAdvaisor.

6.2.3 Soluzione per l'errore sulla potenza massima al fine ricarica

Per quanto riguarda la problematica relativa all'errore sul comportamento al fine ricarica, la soluzione proposta è di cercare di limitare l'effetto del controllo di tensione, cercando di prolungare la fase a corrente costante; questo permetterà cosi al veicolo di seguire il set point di potenza.
In particolare, considerando la teoria delle batterie, si osserva che, caricando una batteria alla corrente minima, l'intervento del controllo di tensione avviene in corrispondenza di uno stato di carica molto elevato, indicato come $SOC_{correnteminima}$. Caricare il veicolo alla corrente minima garantirebbe di ridurre l'effetto dell'intervento del controllo di tensione,

ma, prolungherebbe notevolmente i tempi di ricarica.
D'altra parte, quando si carica una batteria alla corrente massima, si osserva che l'intervento del controllo di tensione avviene ad uno stato di carica inferiore $SOC_{correntemassima}$ rispetto alla ricarica con corrente minima. Ne deriva quindi che, in base al valore della corrente di carica, ad uno stesso stato di carica, si può verificare o meno l'intervento del controllo di tensione. In particolare considerando la formulazione (3.3), essendo Voc

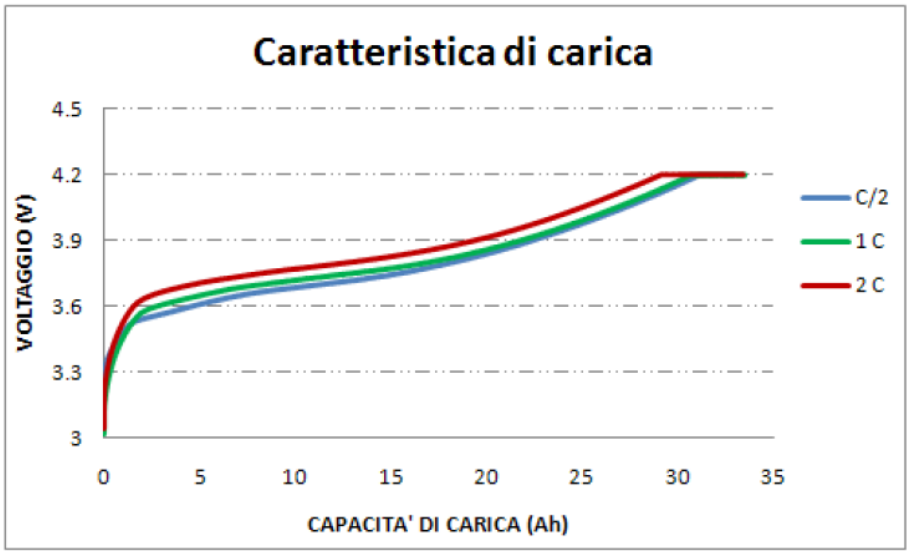


Figura 6.2: Profili di ricarica a diverse correnti ([38])

direttamente legato con lo stato di carica ([3]), se, arrivati ad un certo punto si cambia la corrente di ricarica, il sistema si porta a lavorare sulla curva relativa al nuovo valore di corrente impostato. Per evitare, quindi, l'intervento del controllo di tensione, oltre un certo SOC, si deve limitare la corrente assorbita dal veicolo, cosi che il sistema si porti ad un funzionamento su una curva più bassa e la tensione ai capi della cella rimanga sempre sotto il limite di tensione.
Una possibile soluzione per esempio è impostare il valore minino di corrente in corrispondenza del $SOC_{correntemassima}$, questo permette al sistema di portarsi sulla caratteristica a I minima e ritardare il controllo di tensione che si incontrerebbe in corrispondenza del $SOC_{correnteminima}$.
Per evitare che settando la corrente minima i tempi si allunghino eccessivamente per il cliente, si può impostare una corrente media che permetta sia di ritardare il controllo di tensione che garantire tempi di ricarica accettabili.
Queste considerazioni si traducono in una limitazione della potenza massima della batteria oltre un certo SOC; questo significa che i vincoli legati alla batteria su ChargeAdvaisor dovrebbero essere totalmente cambiati, introducendo una nuova variabile, lo stato di carica. Poiché questo comporta una modifica radicale dell'algoritmo è necessario testare questa soluzione sul campo.
In particolare verranno imposti alla target, in corrispondenza del fine ricarica, dei valori

limitati di potenza.

6.2.4 Soluzione per l'errore sulla lettura dei dati reali

Per quanto riguarda l'errore sulla lettura dei dati da parte di ChargeAdvaisor è necessaria un'implementazione sulla piattaforma, in modo tale che registri correttamente i valori provenienti dal campo e vengano rielaborati per la stima dello stato di carica.

Capitolo 7

Implementazione della soluzione

Le soluzioni precedentemente proposte vengono studiate mediante test. Attraverso prove sperimentali vengono raccoliti i valori caratteristici del veicolo. L'analisi di tali dati permette di determinare l'andamento del fattore di potenza, della corrente e del rendimento ottenendo così una caratterizzazione comportamentale del veicolo.

7.1 Metodologia β

Le prove sperimentali svolte hanno lo scopo di mettere in evidenza il comportamento del veicolo in corrispondenza dei diversi valori di corrente imposti dalla stazione di ricarica. Per tale motivo durante le prove sperimentali, la curva target di riferimento ha assunto valori ad hoc sia per applicare al veicolo tutti i valori di PWM che per ridurre il numero delle ricariche.
Prima dell'inizio di ogni prova è stato necessario effettuare una valutazione sull'evoluzione del SOC del veicolo attraverso la relazione seguente:

$$SOC_{previsto} = SOC_{in} + \eta(\sum_{k=1} P_{Target_k})\frac{100}{BC60} \tag{7.1}$$

dove:

- SOC_{in} stato di carica iniziale
- P_{target_k} è il valore della curva target al k-esimo intervallo
- BC capacità nominale della batteria

Grazie a tale relazione, è possibile prevedere l'andamento dei set point di potenza e di poter impostare in corrispondenza del fine ricarica i valori desiderati della target, valori di potenza di riferimento bassi in modo da valutare la soluzione proposta.
Eventuali errori tra la potenza target e la reale potenza assorbita producono scostamenti tra l'evoluzione del $SOC_{previsto}$ e il SOC_{reale}. Tale differenza è maggiormente evidente durante la fase iniziale del processo di ricarica, in cui non viene fissato alcun valore di

corrente, e quindi di potenza, da seguire (fase incontrollata).
Le prove vengono effettuate con la metodologia già descritta in precedenza (5.4).
Per la costruzione del modello è necessaria una valutazione più accurata sul valore dell'errore di corrente e sull'andamento del $Cos\varphi$ (5.23), prendendo in considerazione solo i risultati prima dell'intervento del controllo di tensione.
Dato che questo non può essere controllato direttamente, si rende necessario effettuare una prova ad hoc.
Dal comportamento teorico delle batterie si osserva che durante le ricariche a corrente costante elevata l'intervento del controllo di tensione avviene ad un valore di SOC minore rispetto alle ricariche con correnti costanti più basse.
Per tale motivo è stata necessaria una prova a corrente massima che metta in evidenza tale valore.
Per una corretta determinazione del modello è necessario inoltre ricavare eventuali relazioni tra errore di corrente e PWM, e tra quest'ultimo e il fattore di potenza $Cos\varphi$.
Per determinare la relazione tra PWM e $Cos\varphi$, si è proceduto con il riportare per ogni valore di PWM i valori di $Cos\varphi$ ricavati nelle diverse prove. Così facendo si può valutare il range all'interno del quale sono presenti i valori e se questi sono compatibili tra loro, cioè, se almeno un punto dell'intervallo di incertezza del valore è comune ad altri intervalli.
Se le misure risultano essere compatibili tra loro allora esiste una relazione tra il valore di PWM ed il valore del fattore di potenza.
Questa valutazione sul comportamento del veicolo permette di determinare il suo modello; in particolare i dati vengono riassunti in una tabella, nella quale ad ogni valore possibile di I_{cp} viene riportato, il PWM presente nel report di EMM, il fattore di potenza $Cos\varphi$, la corrente attiva (6.4) e la potenza attesa (6.3).

Dalla tabella di caratterizzazione del veicolo è possibile determinare la funzione di trasferimento del blocco di pre-distorsione.
In particolare è stato implementato un algortimo che permette di restituire il valore della corrente I_{cp} da comandare, in modo tale da ridurre l'errore tra la $P_{computed}$ e la P_{attesa} assorbita dal veicolo; tale sistema è basato su una funzione di minimizzazione dell'errore, calcolato come:

$$Errore_{potenza} = (P_{computed} - P_{attesa}) \tag{7.2}$$

Pertanto per ogni possibile valore di $P_{computed}$:

- Il sistema effettua il calcolo

  $$ModuloErrore_{potenza} = |P_{computed} - P_{attesa_{ICP}}| \tag{7.3}$$

  per tutti i possibili valori della P_{attesa}, salvando i risultati in una tabella.
- Attraverso la funzione 'minimo' viene restituito il valore del minimo di $Modulo_Errore_{potenza}$
- Vengono calcolati e salvati in una tabella i valori

  $$P_{computed_{sommma}} = (P_{computed} + ModuloErrore_{potenza}) \tag{7.4}$$

  e il valore

  $$P_{computed_{sottrazione}} = (P_{computed} - ModuloErrore_{potenza}) \tag{7.5}$$

- Facendo il confronto tra ognuno dei due dati e quelli presenti all'interno della tabella caratteristica, in automatico viene scartato uno dei due risultati, mentre l'altro permette di restituire il valore di I_{cp} che deve essere comandato.

Tale procedimento permette di associare così ad ogni valore di $P_{computed}$ il corrispondente valore di I_{cp} che deve essere settato per minimizzare l'errore.
Per realizzare il blocco di pre distorsione finale però è necessario trasformare adeguatamente il valore della I_{cp} così ottenuto in valori di potenza. Sulla base delle considerazioni effettuate (6.2.2) il valore della $P_{setpoint}$ viene quindi definito come:

$$P_{setpoint} = (I_{cp} + 0.2) * 0.998 * 380 \tag{7.6}$$

7.2 Veicolo A

I risultati della prova effettuata alla massima potenza hanno mostrato che il valore di stato di carica oltre il quale non conviene considerare le misure risulta essere il 90% del SOC_{reale}.
I test effettuati hanno permesso di indagare maggiormente sul fenomeno che si è riscontrato durante il primo test di base (5.9), nel quale si è osservato un comportamento completamente reattivo del veicolo.
In particolare, si evince che tale comportamento non è dovuto allo stato di carica ma è legato semplicemente al valore del PWM inviato dal centro EMM.
Dal grafico si osserva come, in corrispondenza di un assorbimento di corrente, il fattore di potenza sia nullo nonostante il veicolo sia rimasto sotto carica.

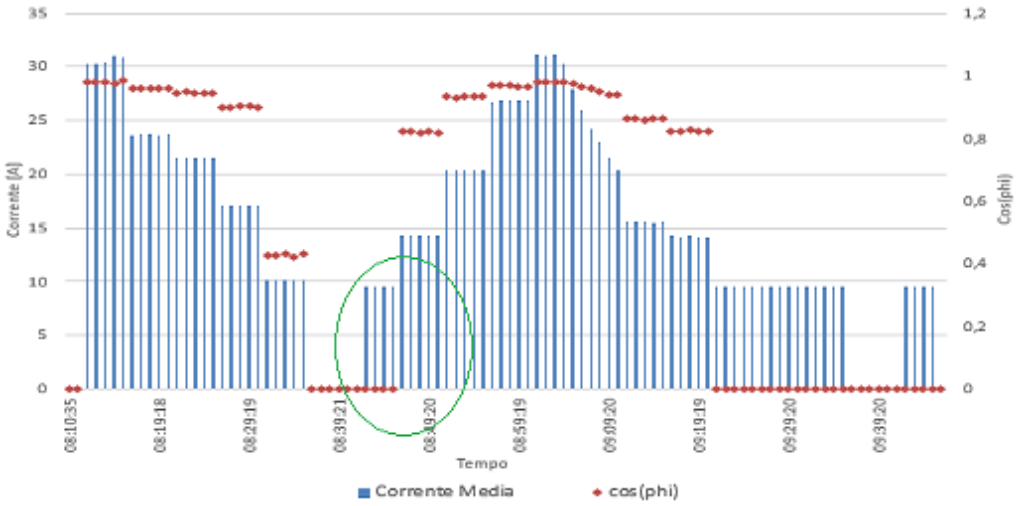


Figura 7.1: Profilo di ricarica con andamento reattivo veicolo A

Dalle prove è emerso che per valori di PWM superiori a 17 [%] il veicolo A non presenta più tale anomalia.
Questo è sicuramente uno degli aspetti da tenere in considerazione per la definizione delle caratteristiche del modello.
Si è riscontrato inoltre, che al variare dei set point di PWM di riferimento non si verifica una conseguente variazione sull'errore di corrente; se ne deduce quindi che non è presente una relazione diretta tra le due grandezze.

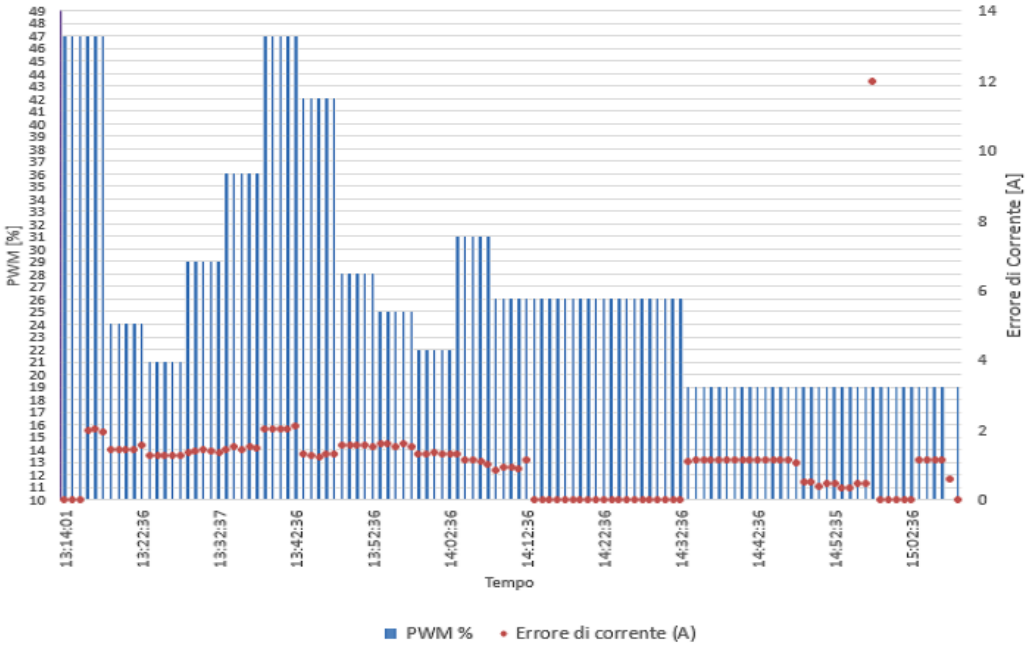


Figura 7.2: Andamento dell' errore di corrente e PWM

Per una corretta analisi sull'errore di corrente è necessaria una valutazione di tipo probabilistico che prenda in considerazione tutti i risultati ottenuti nelle diverse prove.
In particolare si è considerato il valore dell'errore e la sua numerosità nelle diverse prove. Per una migliore valutazione della potenza attesa l'errore di corrente non viene arrotondato, ma si considera anche la cifra decimale. Il valor medio dell'errore risuta essere 1.2 A con una deviazione standard pari a 0.55, visto l'elevato valore utilizzare il valor medio non è corretto. Per tener conto degli eventi si è calcolata la media pesata; il risultato ottenuto risulta essere 1.33 A che si arrotonda per eccesso a 1.4 A
I grafici ottenuti dall'analisi del fattore di potenza mostrano una distribuzione fitta dei valori di $Cos\varphi$.
Si riporta per esempio, quanto ottenuto settando il PWM pari a 24 %. In serendo in un grafico i valori di $Cos\varphi$ 7.4 si nota come l'intervallo di valori risulta essere limitato tra 0.807 e 0.82. Considerando un $Cos\varphi$ di 0.807 metà dell'intervallo di incertezza, con un incertezza calcolata del 4% 5.25, risulta essere 0,032; si nota come tutti i valori risultano essere compatibili tra loro.

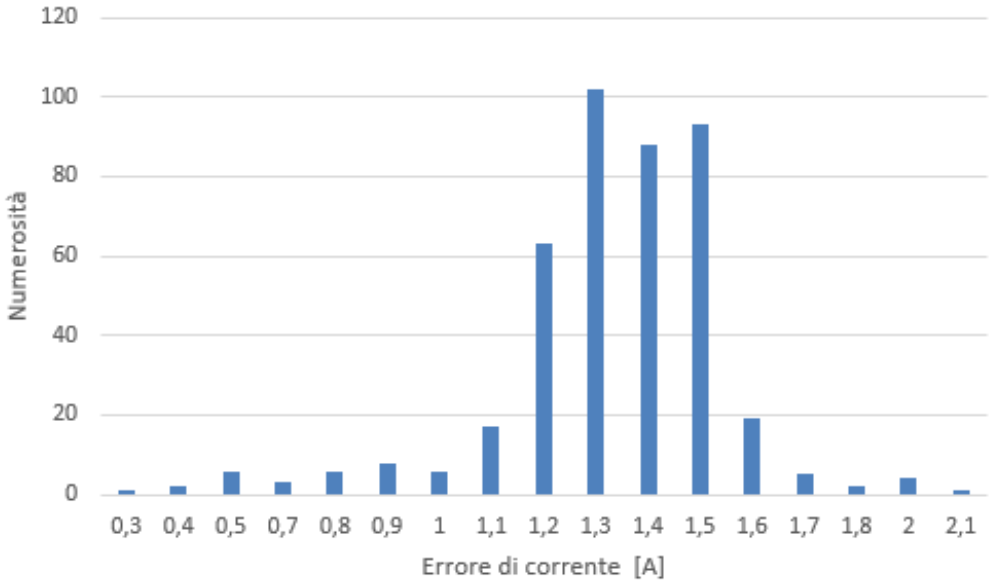


Figura 7.3: Distribuzione dell'errore di corrente

Poiché tutti i valori rientrano nell'intervallo di incertezza, tutti possono essere considerati lo stesso valore, si deduce quindi che effettivamente è presente una correlazione tra $Cos\varphi$ e PWM.

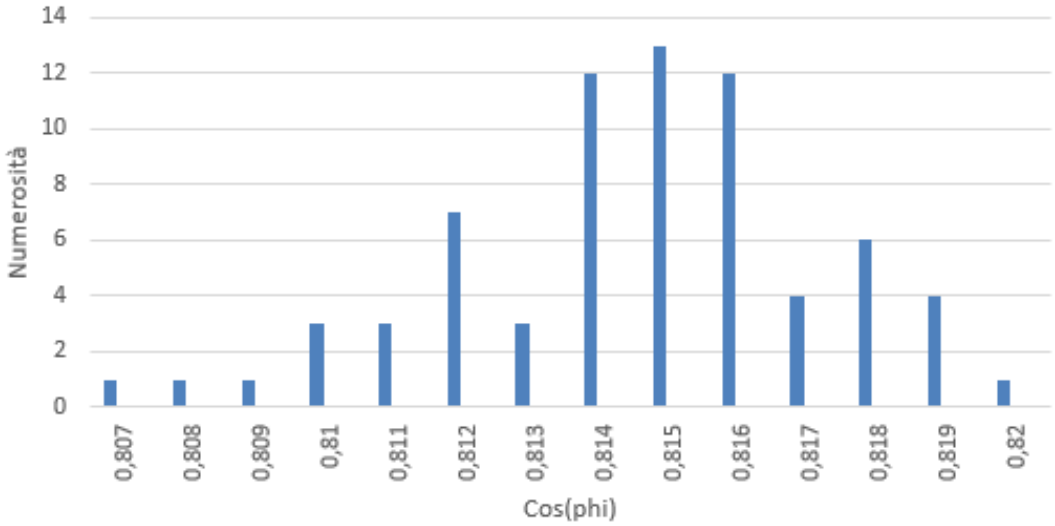


Figura 7.4: Distribuzione dei valori di $Cos\varphi$ per un PWM di 24%

Vista la bassa deviazione standard e varianza dei dati rispetto al valor medio, si è deciso di considerare quest'ultimo come valore caratteristico del corrispettivo PWM.

PWM	***Numerosità***	$Cos\varphi$	***Dev.Stand***	***Varianza***
18	5	0,427	0,0036	1,32E-05
19	45	0,609	0,0030	9,31E-06
20	10	0,696	0,0026	7,01E-06
21	10	0,727	0,0012	1,5E-06
22	5	0,762	0,0014	2,11E-06
23	8	0,785	0,0044	1,92E-05
24	72	0,814	0,0029	8,21E-06
25	5	0,820	0,0016	2,65E-06
26	5	0,856	0,0009	7,73E-07
27	3	0,871	0,0007	5,58E-07
28	10	0,876	0,0022	5,03E-06
29	5	0,883	0,0019	3,61E-06
30	5	0,900	0,0013	1,62E-06
31	10	0,910	0,0017	2,92E-06
32	5	0,918	0,0020	3,86E-06
33	5	0,915	0,0015	2,12E-06
35	10	0,930	0,0011	1,29E-06
37	5	0,946	0,0013	1,58E-06
38	10	0,948	0,0029	8,86E-06
39	15	0,953	0,0014	2,09E-06
40	1	0,953	0	0
41	5	0,958	0,0012	1,34E-06
42	5	0,958	0,0020	4,12E-06
43	5	0,964	0,0020	3,95E-06
44	10	0,965	0,0015	2,27E-06
46	5	0,968	0,0018	3,16E-06
47	15	0,971	0,0020	4,04E-06
50	55	0,977	0,0020	3,92E-06
51	13	0,978	0,0014	2,05E-06
53	36	0,979	0,0016	2,67E-06

Tabella 7.1: Tabella PWM A

Questa valutazione ha permesso di ricavare così l'andamento del fattore di potenza in funzione del PWM e ricavarne la linea di tendenza. La funzione della linea di tendenza risulta essere una funzione di sesto grado:

$$y = -4*10^{-8}x^6+5*10^{-6}x^5-2*10^{-4}x^4+3.8*10^{-3}x^3-4.1*10^{-2}x^2+0.2361x+0.2477 \quad (7.7)$$

ed R^2=0.9937

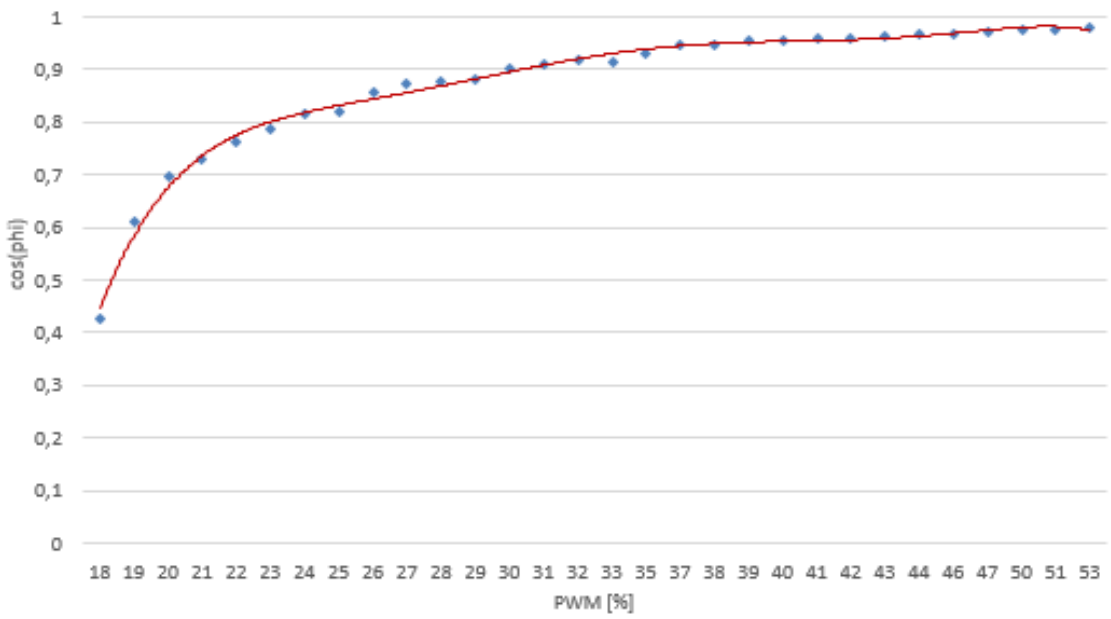


Figura 7.5: Andamento del valore di $Cos\varphi$ e linea di tendenza

7.2.1 Modello

Basandoci sull'analisi dell'errore di corrente e sul $Cos\varphi$ è possibile ricavare la tabella riassuntiva che descrive il comportamento del veicolo in corrispondenza dei diversi valori di corrente I_{cp} comandati.
Nella tabella si riportano rispettivamente il valore di I_{cp}, il PWM del report di EMM, il valore di $Cos\varphi$ e la P_{attesa} assorbita dal veicolo. Tale tabella rappresenta quindi la caratterizzazione del modello del veicolo A. I valori al di sotto di un PWM pari a 18 % presentano $Cos\varphi$ nullo e quindi anche la potenza attiva risulta essere nulla.

I_{cp}	***PWM***	$Cos\varphi$	***Corrente attiva***	P_{attesa}
5,99	10	0,000	0,000	0,000
6,59	10	0,000	0,000	0,000
7,19	11	0,000	0,000	0,000
7,79	12	0,000	0,000	0,000
8,39	13	0,000	0,000	0,000
8,99	14	0,000	0,000	0,000
9,59	15	0,000	0,000	0,000
10,19	16	0,000	0,000	0,000
10,79	17	0,000	0,000	0,000
11,39	18	0,427	4,26	2954
11,99	19	0,609	6,45	4465

I_{cp}	***PWM***	$Cos\varphi$	***Corrente attiva***	P_{attesa}
12,59	20	0,696	7,78	5394
13,19	21	0,727	8,57	5939
13,79	22	0,762	9,44	6541
14,39	23	0,785	10,20	7065
14,99	24	0,814	11,07	7669
15,59	25	0,820	11,63	8060
16,19	26	0,856	12,66	8769
16,79	27	0,871	13,40	9283
17,39	28	0,876	14,01	9706
17,99	29	0,883	14,64	10145
18,59	30	0,900	15,47	10716
19,19	31	0,910	16,19	11215
19,79	32	0,918	16,88	11696
20,39	33	0,915	17,37	12036
20,99	34	0,930	18,22	12623
21,59	35	0,930	18,78	13014
22,19	36	0,945	19,64	13606
22,79	37	0,946	20,23	14013
23,39	38	0,948	20,84	14435
23,99	39	0,953	21,53	14914
24,59	40	0,953	22,10	15311
25,19	41	0,959	22,81	15800
25,79	42	0,958	23,37	16192
26,39	43	0,964	24,09	16687
26,99	44	0,965	24,70	17111
27,59	45	0,958	25,09	17380
28,19	46	0,968	25,93	17967
28,79	47	0,971	26,58	18418
29,39	48	0,972	27,20	18842
29,99	49	0,978	27,96	19371
30,59	50	0,977	28,51	19754
31,19	51	0,976	29,08	20147
31,79	52	0,982	29,84	20674
32	53	0,979	29,96	20760

Tabella 7.2: Tabella veicoloA

Per valutare la validità delle scelte effettuate è necessario confrontare il modello creato con l'andamento reale assunto dal veicolo.
Quello che ci si aspetta è che inizialmente la differenza di potenza tra P_{reale} e la P_{attesa} sia nulla, mentre in corrispondenza del controllo di tensione i due andamenti si discosteranno.

Test di modello

Come mostrano i grafici il modello segue perfettamente il valore della potenza assorbita dal veicolo. Si osservano però, come atteso, delle discrepanze in corrispondenza della fase

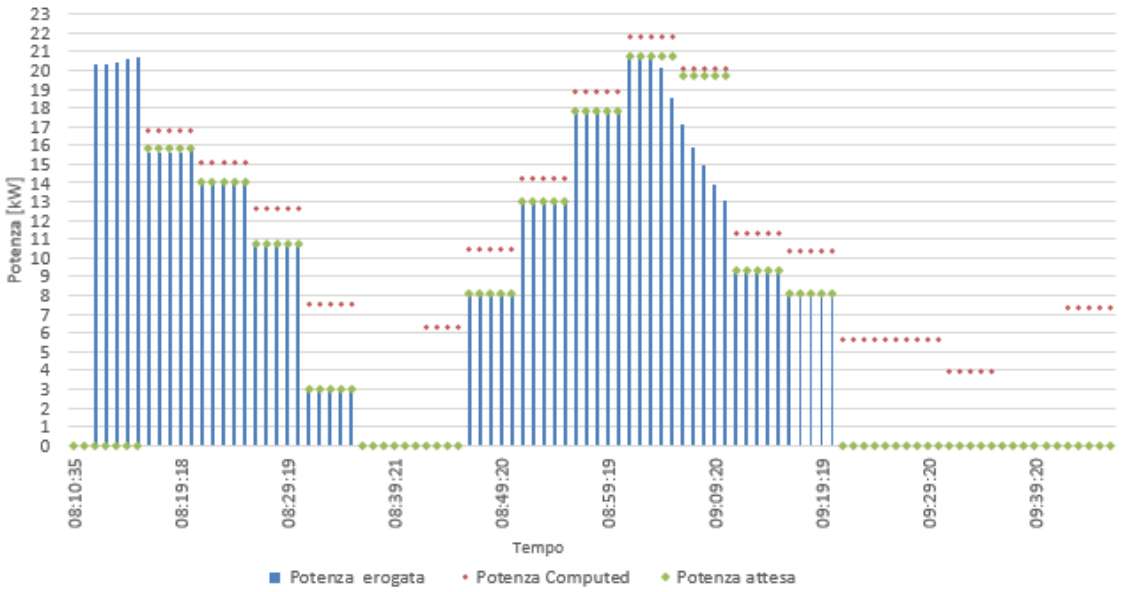


Figura 7.6: Confronto tra il modello e la potenza reale assorbita dal veicolo

finale della ricarica; infatti, durante le fasi di riduzione della potenza causate dal controllo di tensione, le due curve si discostano poiché il modello non tiene conto di tale fenomeno.

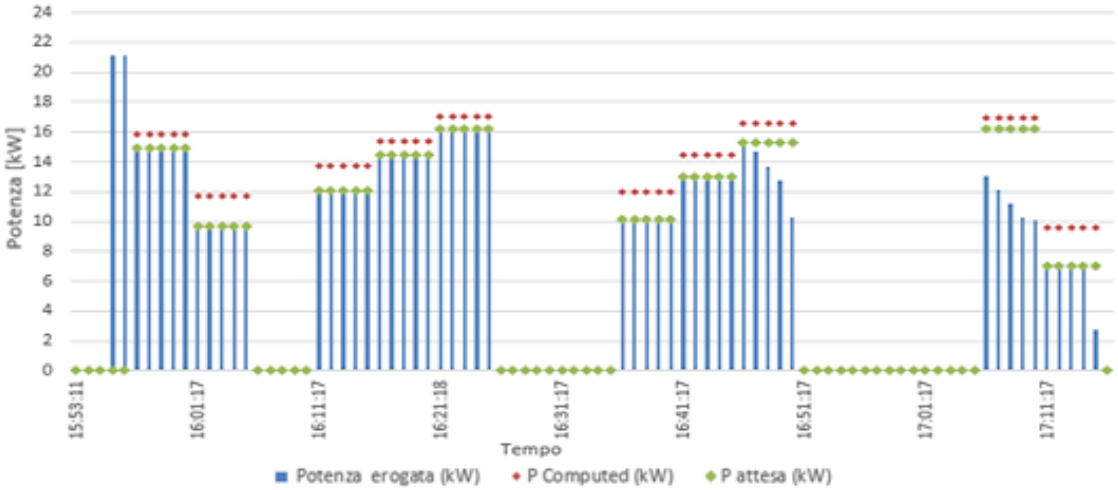


Figura 7.7: Confronto tra il modello e la potenza reale assorbita dal veicolo

È possibile effettuare una valutazione sull'andamento dell'errore atteso tra $P_{computed}$ e la

potenza P_{attesa} del veicolo, in funzione dei diversi valori della $P_{computed}$.
Il grafico mostra che i valori di errore più elevati sono in corrispondenza di valori bassi di potenza: questo perché il veicolo assume un comportamento completamente reattivo.

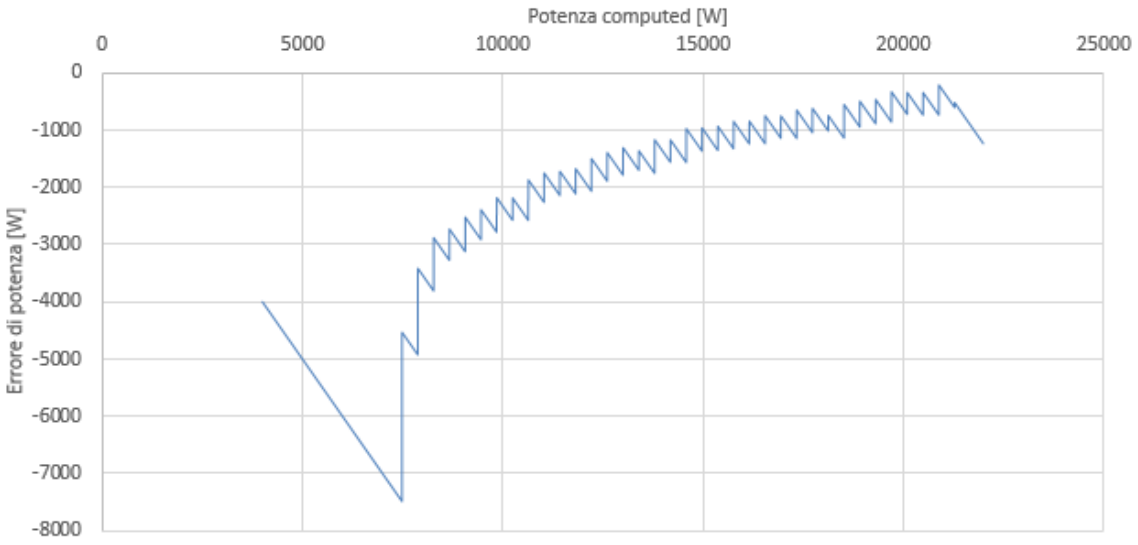


Figura 7.8: Errore atteso tra $P_{computed}$ e P_{attesa}

7.2.2 Costruzione del blocco pre-distorsore

Poiché il modello riesce a prevedere perfettamente l'andamento del veicolo, viene creato il blocco pre-distorsore che permette di modificare adeguatamente il valore del set point in modo tale da ridurre l'errore tra $P_{computed}$ e quanto realmente assorbito dal veicolo $P_{erogata}$.
Grazie alla funzione di trasferimento del blocco di pre-distorsione, è possibile calcolare partendo dalla $P_{computed}$ i valori di $P_{setpoint}$ da comandare, così da poterla implementare direttamente da ChargeAdvisor. La chiave di lettura risulta essere: fino al valore contenuto in ogni casella della $P_{computed}$ si deve applicare il relativo valore della $P_{setpoint}$, riportato nella colonna dedicata.

$P_{computed}$	$P_{setpoint}$
22000	21151
20716	21013
20410	20619
19950	20225
19562	19831
19106	19437
18629	19042
18192	18648

$P_{computed}$	$P_{setpoint}$
17673	18254
17245	17860
16898	17466
16439	17072
15995	16678
15555	16284
15112	15890
14674	15495
14223	15101
13809	14707
13309	14313
12818	13919
12329	13525
11865	13131
11455	12737
10965	12342
10430	11948
9925	11554
9494	11160
9025	10766
8414	10372
7864	9978
7366	9584
6802	9190
6239	8795
5666	8401
4929	8007
0	0

Tabella 7.3: Pre-distorsore veicolo A

E' possibile effettuare una valutazione dell'efficacia del blocco pre distorsore, verificando il delta tra la P_{attesa} e $P_{computed}$.

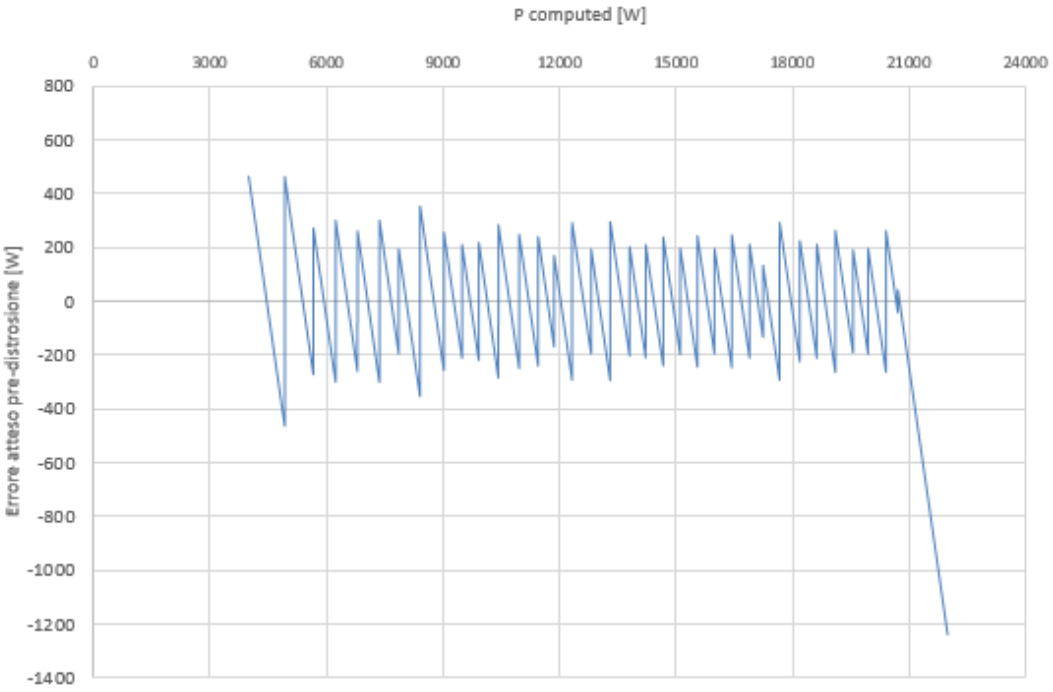


Figura 7.9: Confronto tra la P_{attesa} e $P_{computed}$ con il blocco pre-distorsore

Effettuando il confronto tra i grafici 7.8 e 7.9, si nota che in corrispondenza di valori bassi della $P_{computed}$ non vi sia più uno scostamento elevato ma l'errore risulta essere contenuto in un range minore. Così facendo è possibile mitigare il comportamento reattivo della macchina.

7.2.3 Rendimento

Durante le diverse prove, il rendimento della ricarica $\eta_{ricrica}$ (5.21) ha assunto valori differenti compresi tra 0.87. e 0.98. Dall'analisi delle prime 5 ricariche si è osservato che il valore 0.9 risulta essere il valore più basso riscontrato. Peranto, si è deciso di utilizzare tale valore come prima possibile soluzione di rendimento caratteristico del veicolo, poiché risulta essere il più cautelativo.
La formulazione per il calcolo del SOC_{ca} rimane la stessa (5.19), ma il η non risulta essere più 0.8 ma 0.9.
L'implementazione di tale valore e l'impiego dei dati reali ha permesso di ridurre notevolmente la discrepanza tra il SOC_{reale} e il SOC_{ca}, quest'ultimo è indicato nel grafico come $SOC_{nuovorend}$.
Dal grafico si nota come l'andamento del SOC_{reale} e del $SOC_{nuovorend}$, che corrisponde al valore di SOC_{ca} implementato, siano sovrapposti, ma che ancora è presente un errore tra

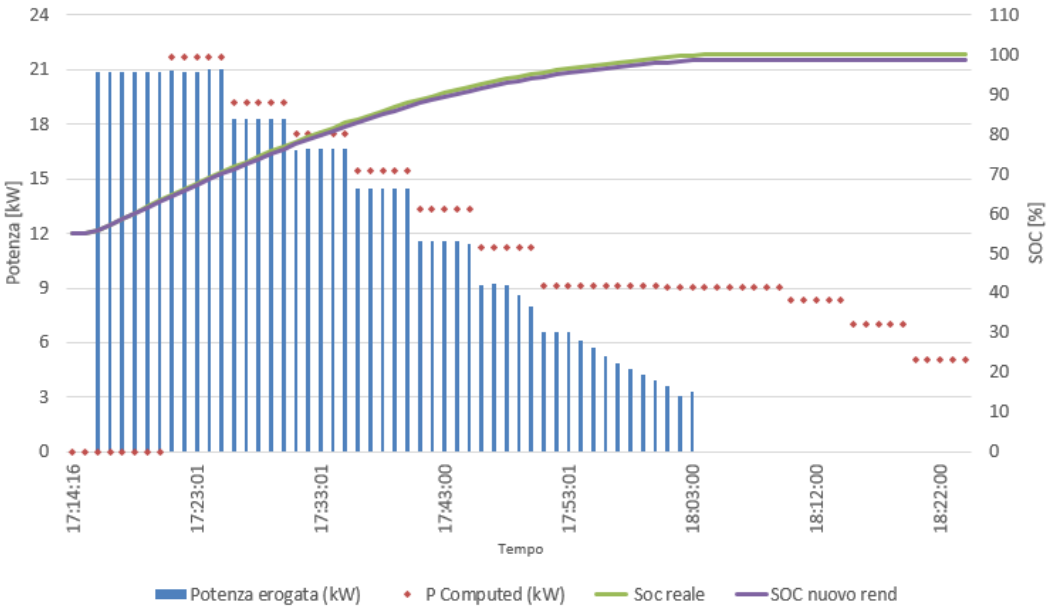


Figura 7.10: Andamento del SOC_{reale} e $SOC_{nuovorend}$ veicolo A

la $P_{computed}$ e la $P_{erogata}$.
Le prove successive hanno confermato che un rendimento di 0.9 risulta essere una scelta corretta come valore del rendimento caratteristico, nonostante il valore della media pesata sia pari a 0.92. Il contributo del valore 0.98 ha un effetto negativo incidendo molto sul valore medio.

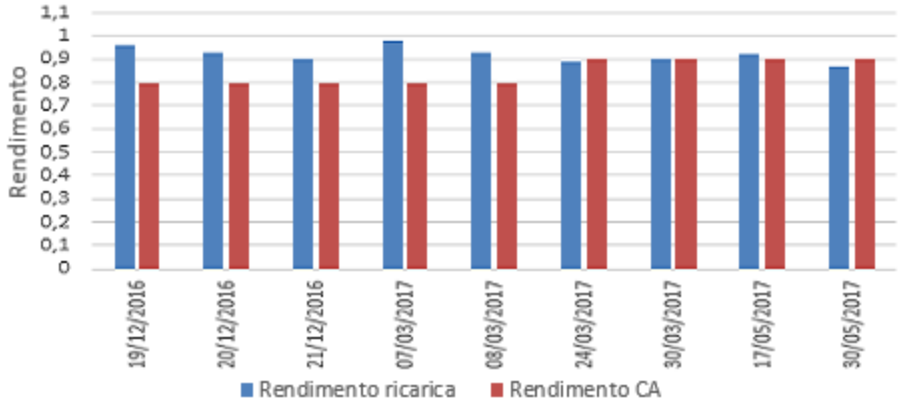


Figura 7.11: Confronto del rendimento reale della ricarica e di quello in ChargeAdvaisor nelle diverse prove

7.2.4 Valutazioni fine ricarica

Come anticipato in precedenza (6.2.3), caricando il veicolo con la massima corrente costante, l'intervento del controllo di tensione avviene per valori di stato di carica minori rispetto alle ricariche con corrente costante minore.
Questo comportamento è stato riscontrato anche durante i test, come si osserva dai grafici (7.12) e (7.13).
Nel caso di ricarica con potenza massima si nota che in corrispondenza di uno stato di carica del 90% si verifica una riduzione della potenza che corrisponde ad una riduzione della corrente imposta dal controllo di tensione.

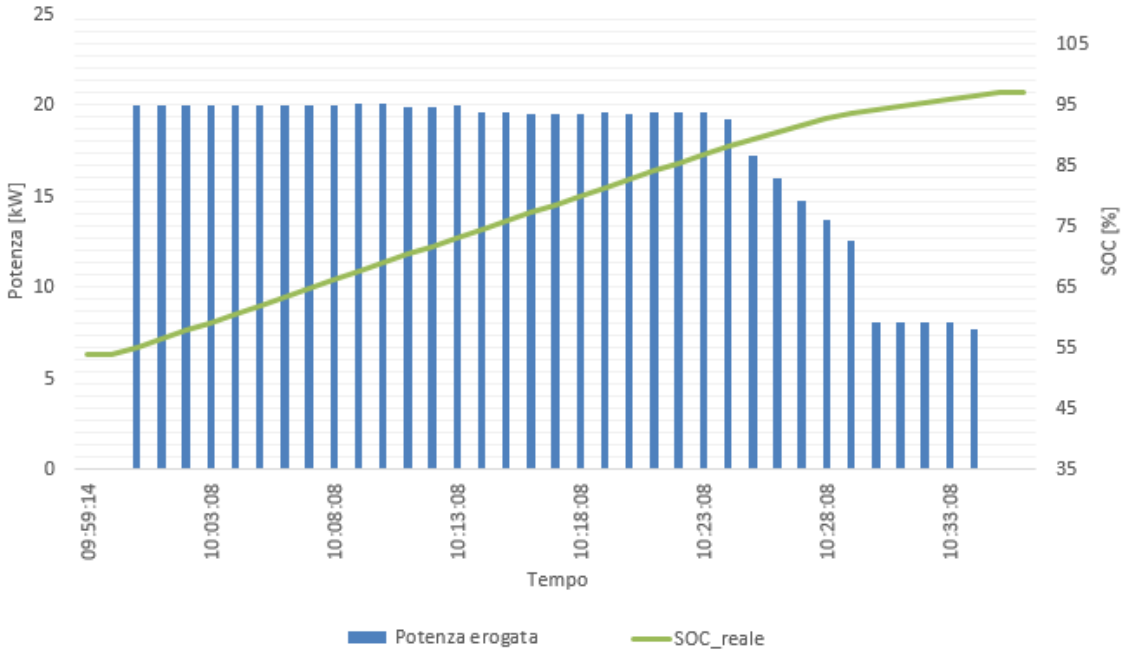


Figura 7.12: Andamento della potenza assorbita e del SOC_{reale} con ricarica alla massima potenza

Invece, quando il veicolo viene caricato con una corrente costante minore si osserva che il controllo di tensione avviene in corrispondenza di SOC molto più elevati.
Le considerazioni effettuate (6.1.2) vengono confermate dai test; infatti si osserva come in corrispondenza di un SOC del 90%, anche se la ricarica è avvenuta con un profilo di potenza basso, se viene settato un valore elevato di potenza (17 kW), si verifica l'intervento del controllo di tensione. Si conclude quindi che indipendentemente dalla potenza di ricarica ad un SOC del 90% conviene settare valori di potenza come 9-11 kW per evitare che l'intervento del controllo di tensione alteri l'andamento della ricarica. In particolare come si osserva dal grafico impostando progressivamente valori sempre più bassi l'intervento del controllo di tensione non è percepibile.

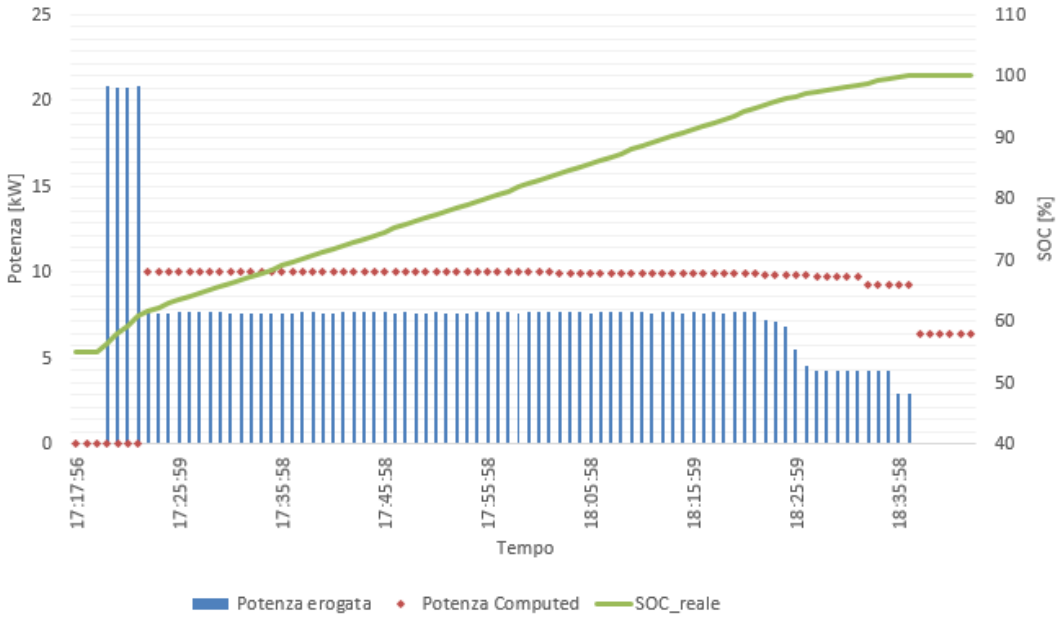


Figura 7.13: Andamento della potenza assorbita e del SOC_{reale} con ricarica con profilo di potenza media

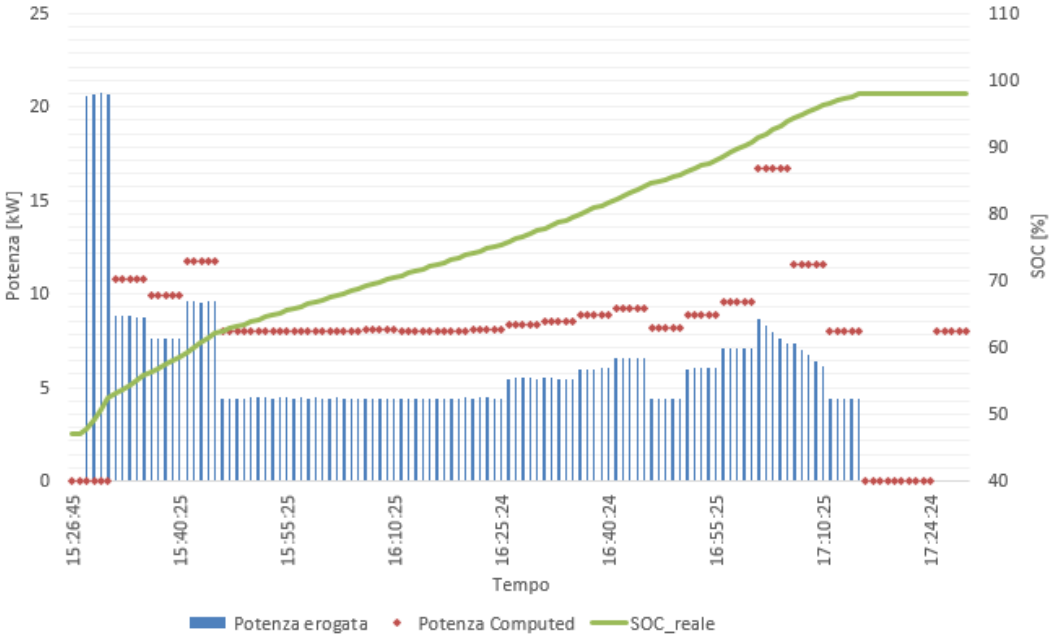


Figura 7.14: Inizo controllo di tensione

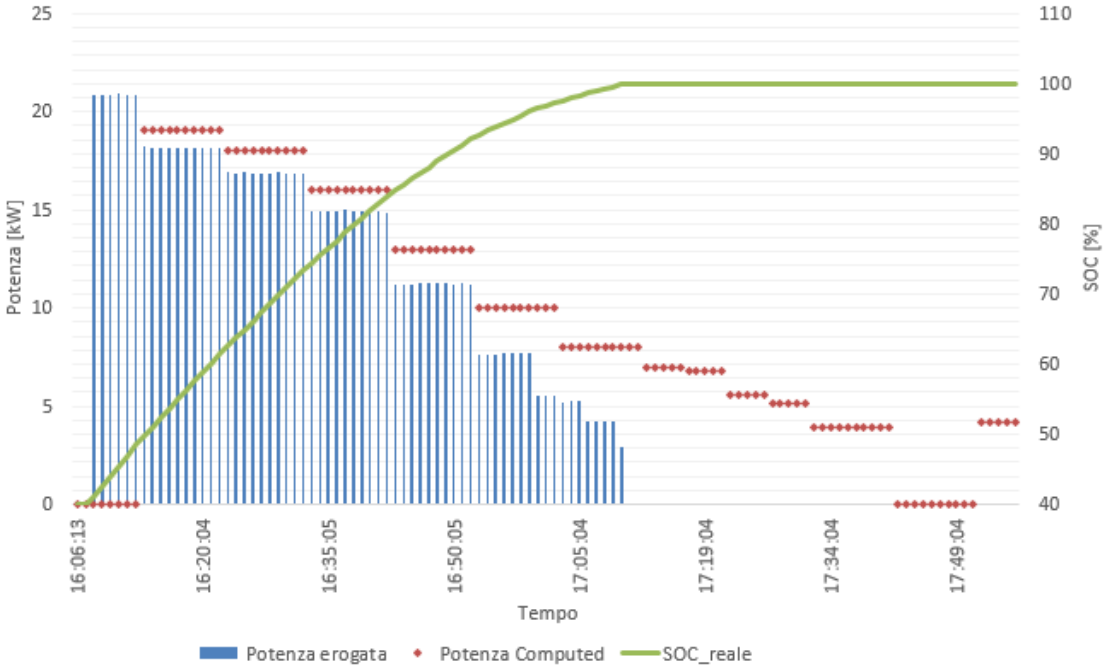


Figura 7.15: Assenza dell'intervento del controllo di tensione

7.3 Veicolo B

Sul veicolo B sono stati effettuati gli stessi test e considerazioni, di quanto eseguito per il veicolo A. In dettaglio, la prova effettuata alla corrente massima ha evidenziato che l'intervento del controllo di tensione avviene a circa 90% del SOC_{reale} . Questo dato è stato preso in considerazione per eliminare le misurazioni in corrispondenza di SOC maggiori. A differenza del veicolo A, si è notato che al variare dei set point di riferimento non si verifica una conseguente variazione dell'errore sulla corrente ma questo rimane praticamente nullo al variare dei valori di PWM.

Per una corretta analisi sull'errore di corrente è necessaria una valutazione di tipo probabilistico che prenda in considerazione tutti i risultati ottenuti nelle diverse prove. Quello che si è riscontrato è che il veicolo segue quasi perfettamente il valore del set point senza introdurre nessun errore.

Il valor medio dell'errore risuta essere 1.23 A con una deviazione standard pari a 1.19; visto l'elevato valore utilizzare il valor medio non è una soluzione corretta. Per tener conto degli eventi si è calcolata la media pesata; è possibile considerare come errore di corrente caratteristico del veicolo 0 A poichè la media pesata risulta essere -0.02 A.

Rispetto al caso precedente il veicolo non presenta nessun comportamento reattivo e il fattore di potenza rimane praticamente costante ad ogni valore di PWM, se ne deduce quindi che sul veicolo è presente un PFC, massimizzando così il trasferimento di potenza.

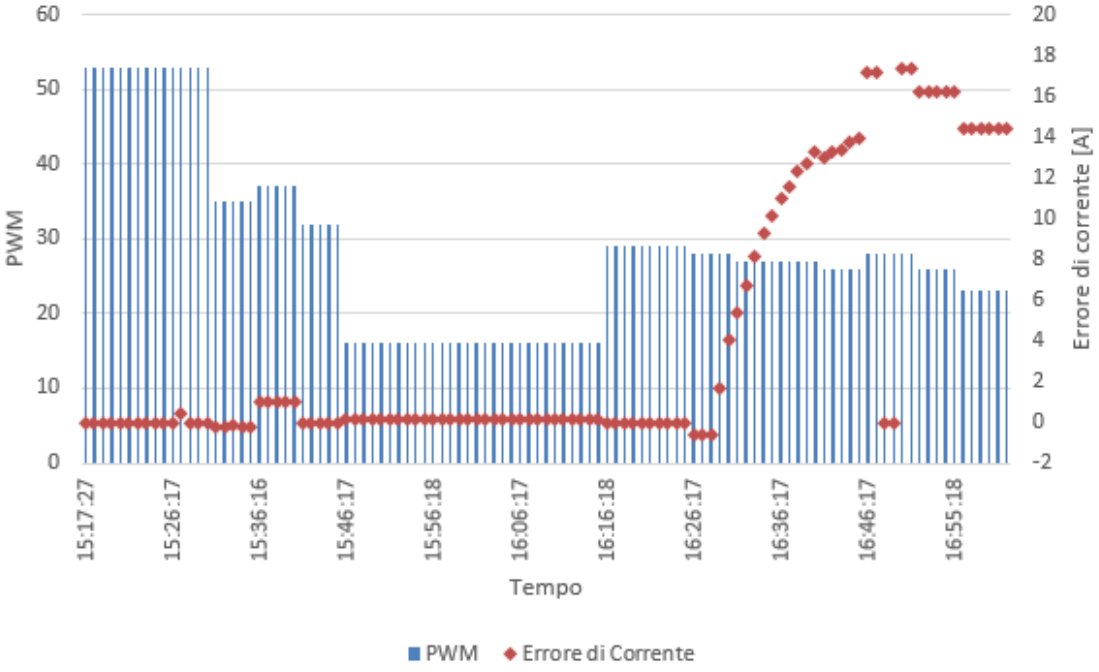


Figura 7.16: Andamento dell'errore di corrente in funzione del PWM

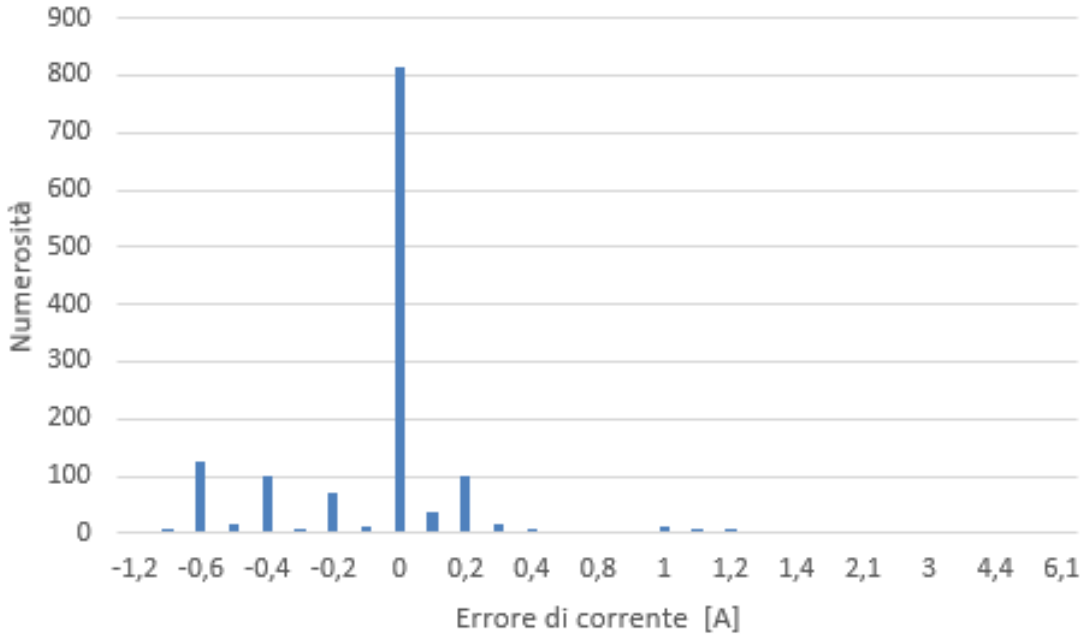


Figura 7.17: Distribuzione dell'errore di corrente

PWM	***Numerosità***	$Cos\varphi$	***Dev.Stand***	***Varianza***
10	324	0,999	0,0030	9,09E-06
11	5	0,992	0,0038	1,41E-05
12	5	1	0,0007	5,09E-07
13	20	1	0,0011	1,32E-06
14	5	0,998	0,0032	1,03E-05
15	5	1	0,0009	7,35E-07
16	45	0,999	0,0020	4,16E-06
17	5	1	0,0005	2,66E-07
18	58	1	0,0012	1,51E-06
19	9	1	0,0019	3,86E-06
21	9	1	0,0022	4,89E-06
22	12	1	0,0018	3,26E-06
23	24	1	0,0013	1,68E-06
24	349	0,999	0,0054	2,94E-05
25	35	1	0,0015	2,21E-06
27	5	1	0,0011	1,13E-06
28	8	1	0,0015	2,18E-06
29	30	1	0,0017	2,84E-06
30	15	0,996	0,0180	0,000324
31	10	1	0,0017	2,85E-06
32	25	1	0,0017	2,8E-06
33	30	1	0,0014	1,96E-06
34	25	0,990	0,0474	0,002247
35	18	1	0,0013	1,61E-06
36	12	1	0,0015	2,17E-06
37	28	1	0,0017	3,02E-06
38	5	1	0,0022	4,67E-06
39	20	1	0,0016	2,65E-06
40	10	1	0,0011	1,14E-06
41	23	1	0,0016	2,58E-06
44	10	1	0,0009	8,3E-07
45	30	1	0,0012	1,54E-06
46	25	1	0,0010	1,09E-06
47	12	0,999	0,0018	3,15E-06
48	10	1	0,0010	1,12E-06
50	38	0,999	0,0067	4,54E-05
51	10	1	0,0013	1,69E-06
52	14	1	0,0009	7,33E-07
53	105	0,996	0,0338	0,00114

Tabella 7.4: Tabella PWM B

Il grafico relativo al valor medio del $Cos\varphi$ in funzione dei valori di PWM mostra chiaramente che il fattore di potenza non cambia al variare della corrente imposta.

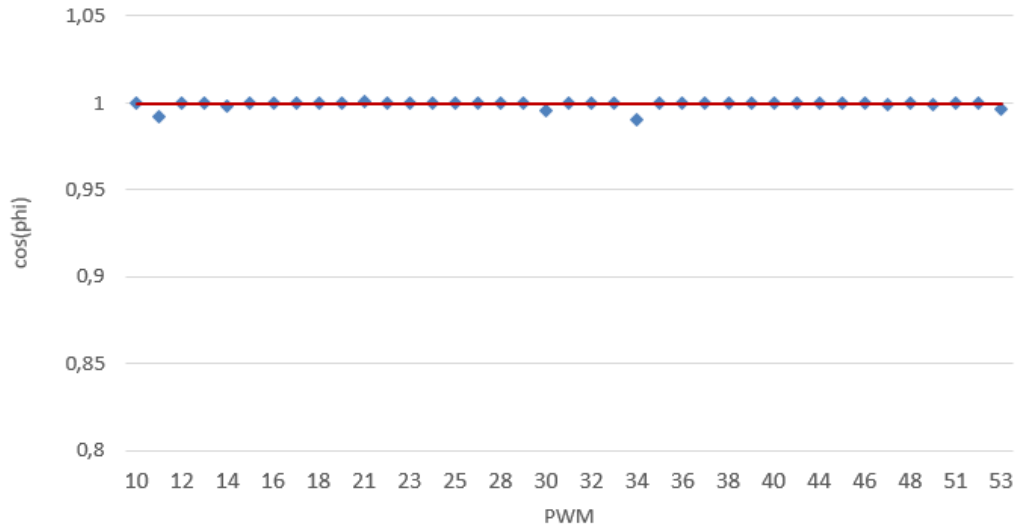


Figura 7.18: Andamento del $Cos\varphi$ in funzione del PWM e linea di tendenza

7.3.1 Modello

L'analisi sull'errore e sul $Cos\varphi$ permette di completare la caratteristica del veicolo B. Va inoltre osservato che, rispetto al caso del veicolo A, per il quale per PWM inferiori al 18% si ha un comportamento completamente reattivo, nel caso del veicolo B è possibile comandare tutti i set point previsti dalla tabella A.3 della normativa IEC 61851 [28].

I_{cp}	***PWM***	$Cos\varphi$	***Corrente attiva***	P_{attesa}
5,99	10	1	6	4150
6,59	10	1	7	4566
7,19	11	1	7	4981
7,79	12	1	8	5397
8,39	13	1	8	5813
8,99	14	1	9	6228
9,59	15	1	10	6644
10,19	16	1	10	7060
10,79	17	1	11	7476
11,39	18	1	11,39	7891
11,99	19	1	11,99	8307
12,59	20	1	12,59	8723

I_{cp}	***PWM***	$Cos\varphi$	***Corrente attiva***	P_{attesa}
13,19	21	1	13,19	9138
13,79	22	1	13,79	9554
14,39	23	1	14,39	9970
14,99	24	1	14,99	10385
15,59	25	1	15,59	10801
16,19	26	1	16,19	11217
16,79	27	1	16,79	11632
17,39	28	1	17,39	12048
17,99	29	1	17,99	12464
18,59	30	1	18,59	12880
19,19	31	1	19,19	13295
19,79	32	1	19,79	13711
20,39	33	1	20,39	14127
20,99	34	1	20,99	14542
21,59	35	1	21,59	14958
22,19	36	1	22,19	15374
22,79	37	1	22,79	15789
23,39	38	1	23,39	16205
23,99	39	1	23,99	16621
24,59	40	1	24,59	17036
25,19	41	1	25,19	17452
25,79	42	1	25,79	17868
26,39	43	1	26,39	18284
26,99	44	1	26,99	18699
27,59	45	1	27,59	19115
28,19	46	1	28,19	19531
28,79	47	1	28,79	19946
29,39	48	1	29,39	20362
29,99	49	1	29,99	20778
30,59	50	1	30,59	21193
31,19	51	1	31,19	21609
31,79	52	1	31,79	22025
32,00	53	1	32	22170

Tabella 7.5: Tabella veicoloB

Test di modello

Dal confronto tra il comportamento teorico del modello e quello reale si nota che non si hanno variazioni apprezzabili tra $P_{erogata}$ e la P_{attesa} durante la maggior parte della ricarica; solo in corrispondenza del fine ricarica,quando l'intervento del controllo di tenione

altera l'andamento della potenza, si osserva uno scostamento tra gli andamenti.
Come nel caso precedente è stato calcolato l'andamento dell'errore di corrente tra la

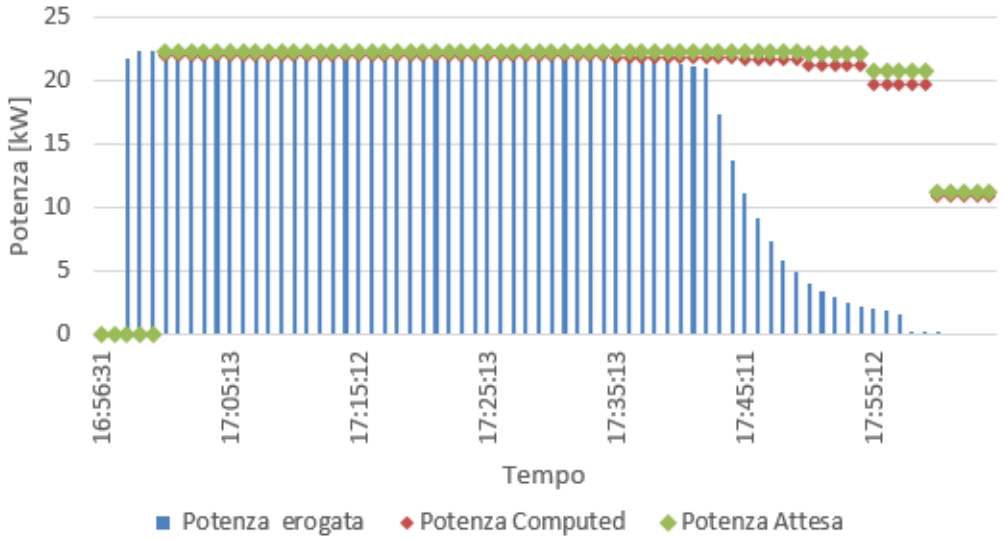


Figura 7.19: Confronto tra modello e comportamento reale

potenza attesa e la $P_{computed}$ riportato nel grafico (7.20).

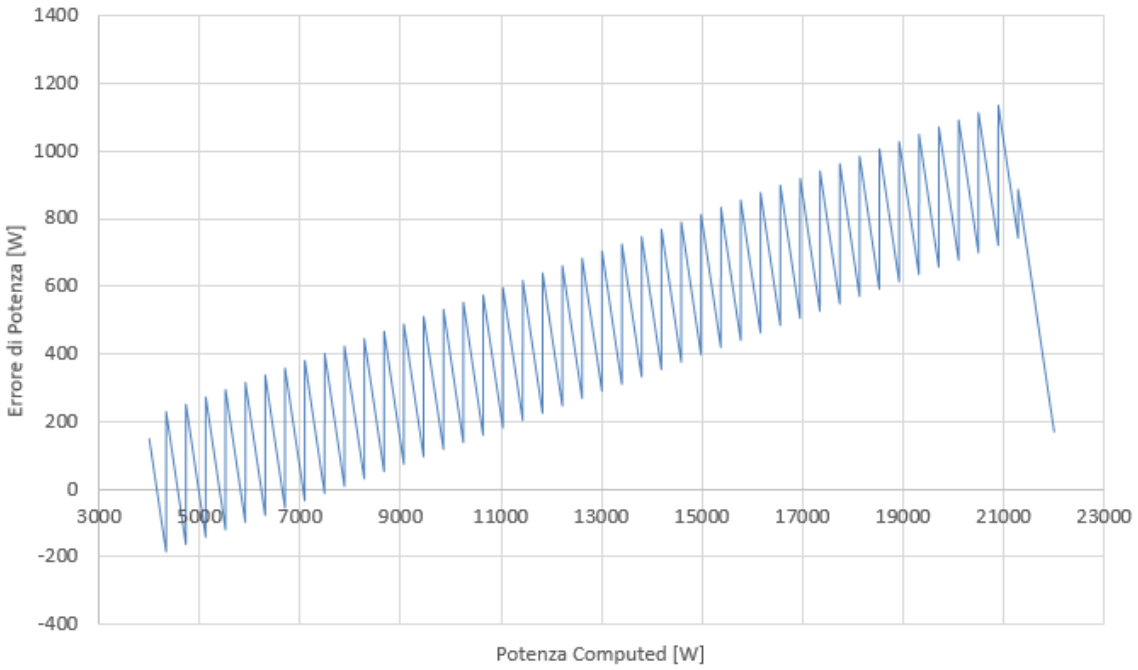


Figura 7.20: Andamento dell'errore P_{attesa} e $P_{computed}$ in funzione della $P_{computed}$

7.3.2 Costruzione del blocco pre-distorsore

La costruzione del blocco pre-distorsore viene realizzata utilizzando il sistema precedentemente descritto, con il calcolo dei valori da implementare direttamente su ChargeAdvaisor.

$P_{computed}$	$P_{setpoint}$
22000	21013
21816	20619
21400	20225
20984	19831
20568	19437
20153	19042
19737	18648
19321	18254
18906	17860
18490	17466
18074	17072
17659	16678
17243	16284
16827	15890
16412	15495
15996	15101
15580	14707
15164	14313
14749	13919
14333	13525
13917	13131
13502	12737
13086	12342
12670	11948
12255	11554
11839	11160
11423	10766
11008	10372
10592	9978
10176	9584
9760	9190
9345	8795
8929	8401
8513	8007
8098	7613
7682	7219
7266	6825

$P_{computed}$	$P_{setpoint}$
6851	6431
6435	6037
6019	5642
5604	5248
5188	4854
4772	4460
4356	4066
0	0

Tabella 7.6: Pre-distorsore veicolo B

È possibile effettuare una valutazione dell'efficienza dell'introduzione del blocco pre-distorsore, conoscendo per ogni valore della $P_{computed}$ il valore della I_{cp} e valutando , l'andamento dell'errore per tutti i valori della $P_{computed}$:

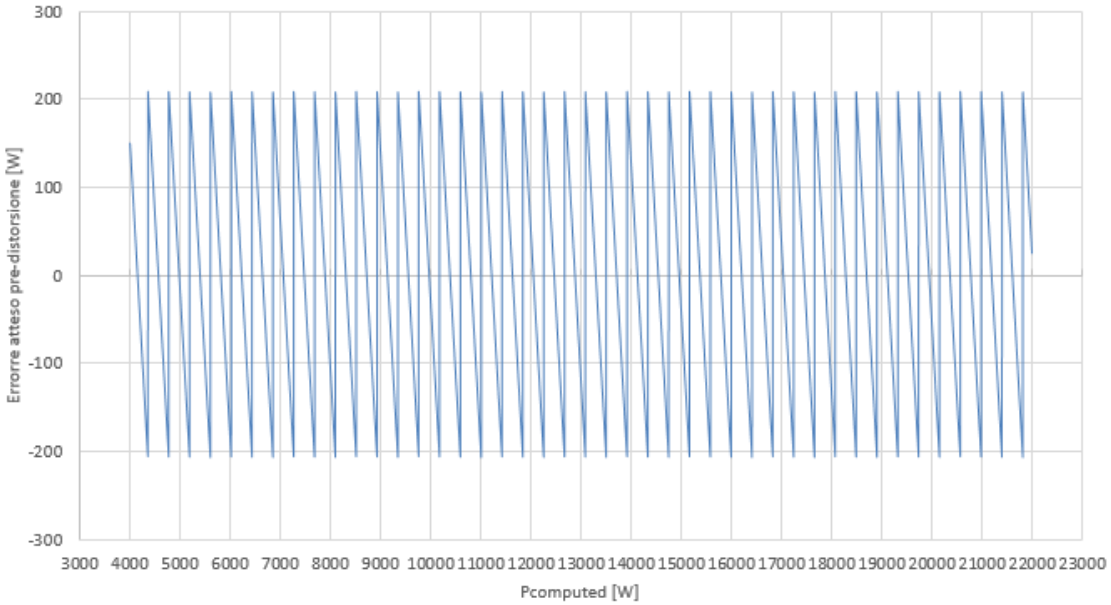


Figura 7.21: Andamento dell'errore tra P_{attesa} $P_{computed}$

7.3.3 Rendimento

Durante le diverse prove, il rendimento della ricarica $\eta_{ricarica}$(5.21) del veicolo B ha assunto valori differenti compresi tra 0.95 e 1.
Dall'analisi delle prime 6 ricariche si è osservato che 0.97 risulta essere il valore minore registrato. Pertanto tale valore è stato fissato come prima possibile soluzione di rendimento caratteristico del veicolo poiché risulta essere il più cautelativo.
L'utilizzo di tale valore e dei dati reali ha permesso una notevole miglioria sull'andamento

tra il SOC_{reale} e il SOC_{ca}, che nel grafico è indicato come $SOC_{nuovorend}$; si può osservare che i due comportamenti sono sovrapponibili, ma che ancora è presente un errore tra la $P_{computed}$ e la $P_{erogata}$. Si riporta il grafico contenente il rendimento della ricarica nei

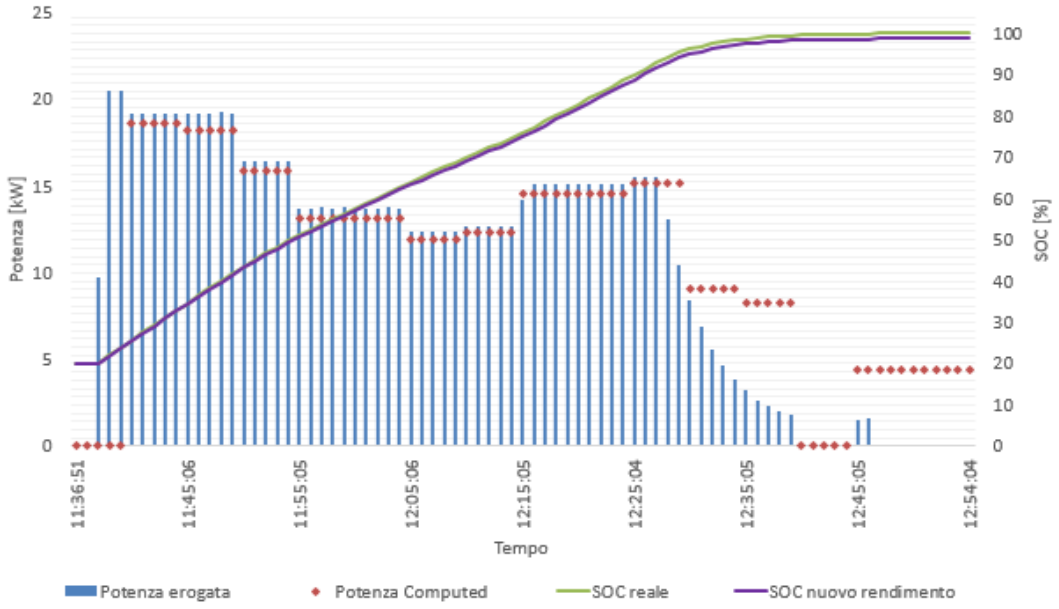


Figura 7.22: Andamento SOC_{reale} e del $SOC_{nuovorend}$

diversi test e il relativo rendimento considerato da ChargeAdvaisor (η).

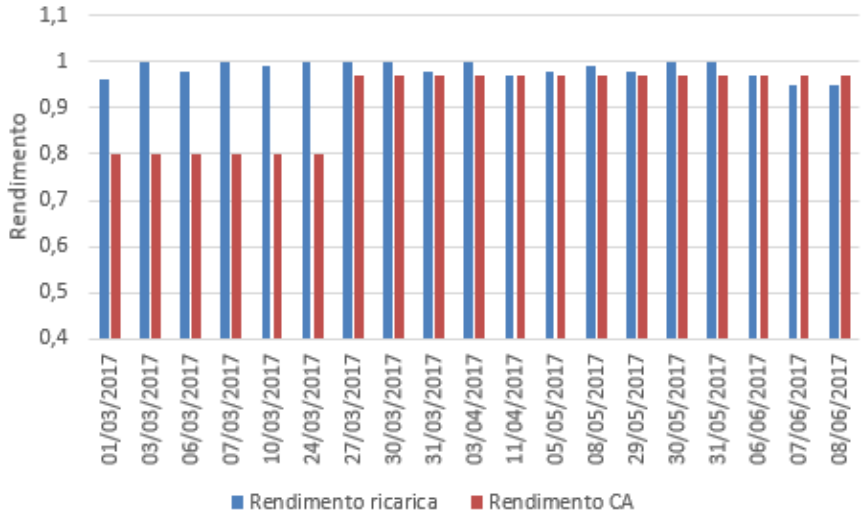


Figura 7.23: Confronto tra il rendimento della ricarica e quello in ChargeAdvaisor nelle diverse prove

7.3.4 Valutazioni fine ricarica

Per ricavare l'andamento ottimale del fine ricarica sono state testate diverse possibili soluzioni sperimentali.
Impostando una potenza costante pari a 4 kW si osserva come la ricarica del veicolo abbia una durata significativamente maggiore (4 ore) rispetto a quella con potenza massima e come il controllo di tensione intervenga solo negli ultimi minuti. Questo conferma quanto atteso (6.2.3).

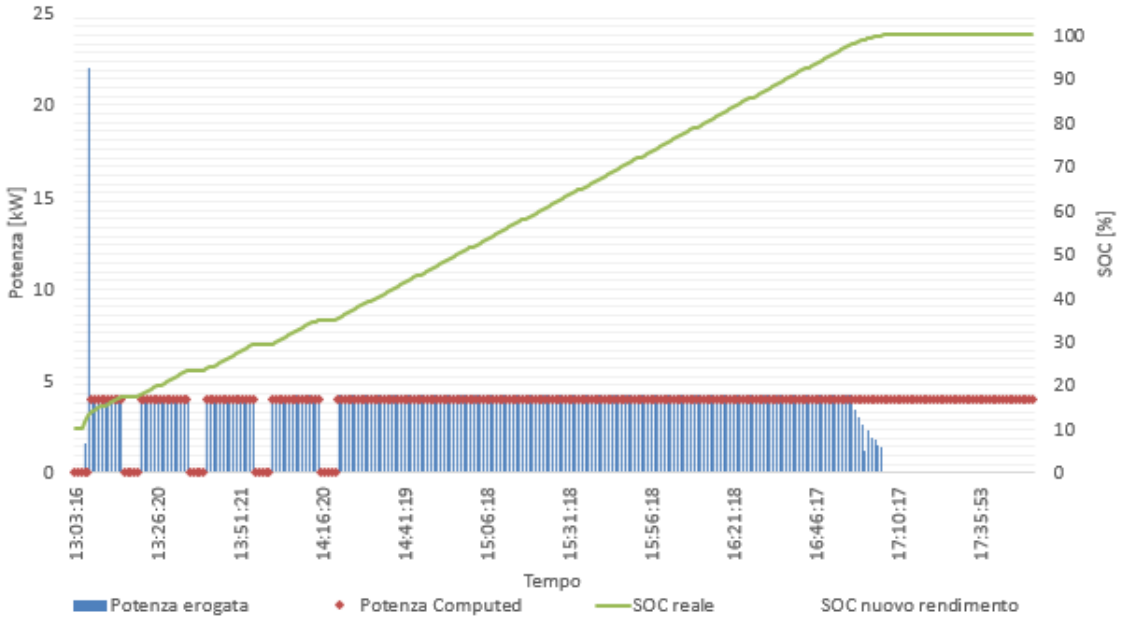


Figura 7.24: Andamento della ricarica con $P_{computed}$ pari a 4 kW

Cosi come per il veicolo A si è riscontrato che, indipendentemente dall'andamento della ricarica, in corrispondenza di un SOC del 90%, se viene settato un valore elevato di potenza, si verifica l'intervento del controllo di tensione.
Infatti, impostando un valore di $P_{computed}$ pari a 15 kW si osserva che il veicolo dapprima riesce a seguire il set point di corrente ma a causa dell'intervento del controllo di tensione si verifica una diminuzione della potenza e il grafico assume il tipico andamento parabolico (3.3).
Una buona soluzione è quella di impostare, oltre un SOC_{reale} del 90%, una potenza di 8 kW che permetta di prolungare il controllo di corrente e contestualmente di effettuare una ricarica veloce. Paragonando infatti la soluzione a ricarica libera (5.24) e la soluzione con set point limitato a 8 kW si osserva che la prima impiega 16 minuti mentre la seconda ne impiega 18 minuti: i tempi sono pressochè sovrapponibili ma rimane una potenza disponibile per altri veicoli.

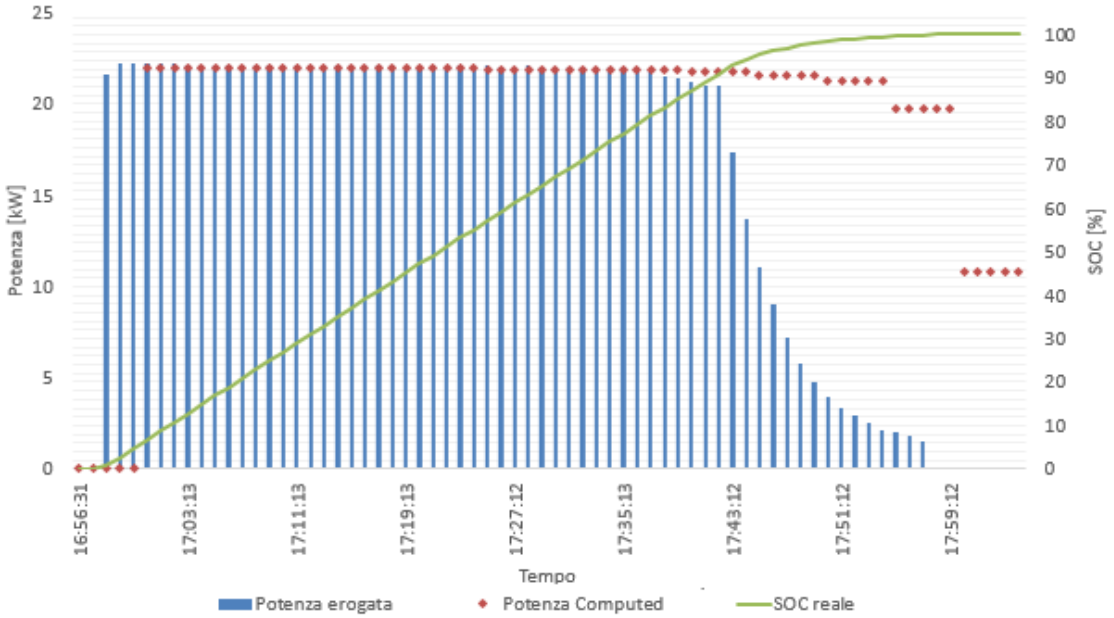


Figura 7.25: Andamento della ricarica con $P_{computed}$ max a 22 kW

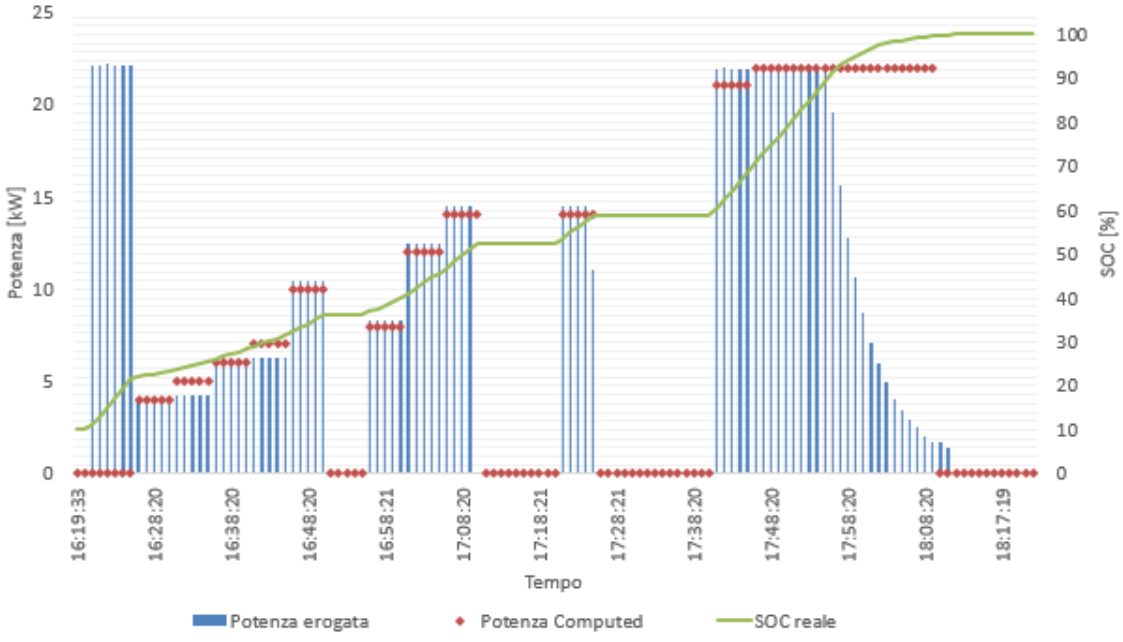


Figura 7.26: Intervento del controllo al 90% del SOC_{reale}

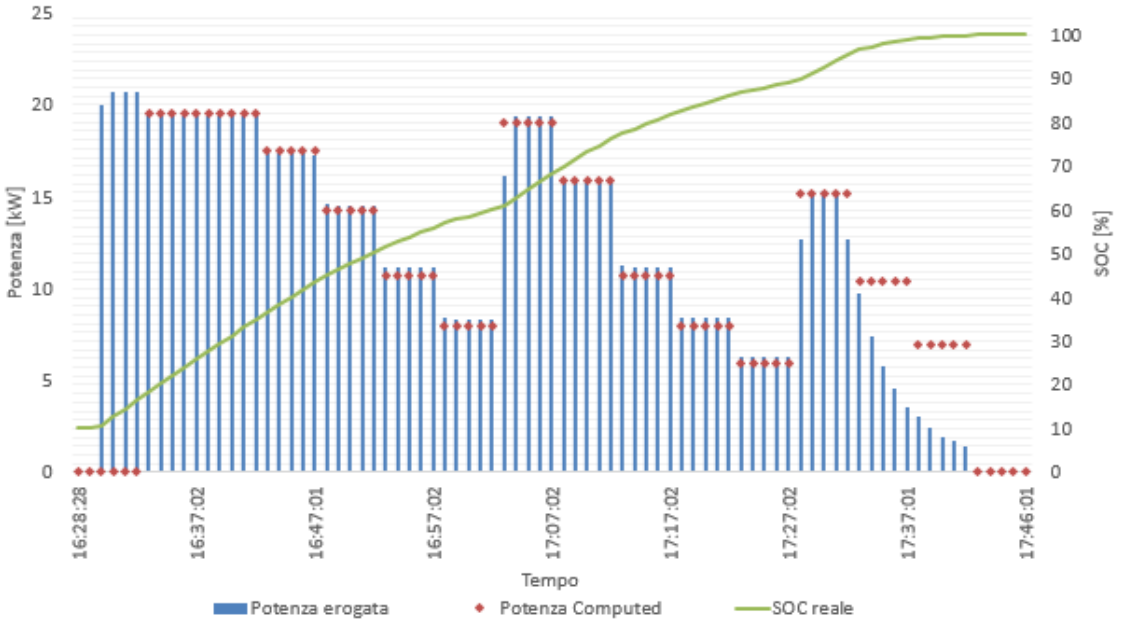


Figura 7.27: Intervento del controllo SOC_{reale}

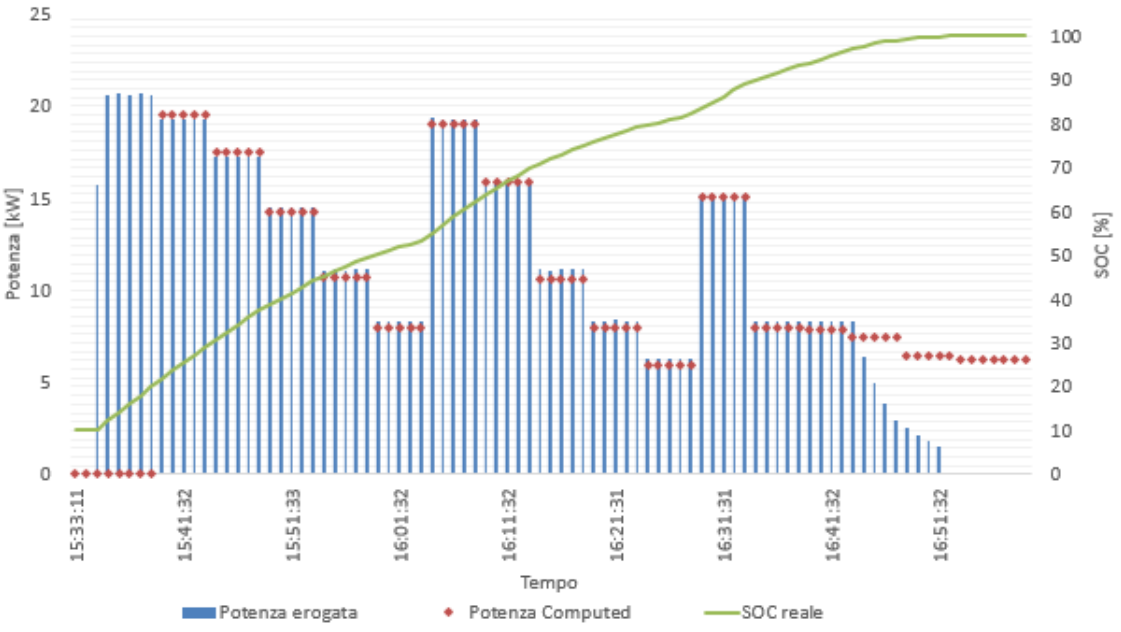


Figura 7.28: $P_{computed}$ impostata a 8 kW

Capitolo 8

Controllo della soluzione implementata

La nuova soluzioni di smart charging prevede la possibilità di selezionare il veicolo sulla quale si vuole effettuare la ricarica in modo da massimizzare l'efficienza. I blocchi di predistorsione sono stati implementati sul sistema di Charge Advaisor e insieme al rendimento vengono automaticamente impostati quando avviene la richiesta di ricarica. Si è testata questa nuova soluzione e raffrontata con quella base iniziale.

8.1 Nuovo applicativo

Per promuovere lo sviluppo delle ricariche con smart charging è stato realizzato un applicativo dedicato, che tenga conto della facilità di utilizzo delle App e il loro sistema user friendly, oltre che garantire i benefici sviluppati.
Quanto precedentemente sviluppato in Mobincity sarebbe stato di difficile utilizzo in un'applicazione per l'utente finale (automobilista), poiché si sarebbero dovuti inserire dati come BC, P_{max}, P_{min}, informazioni spesso non note all'utilizzatore. Per tale motivo, durante lo sviluppo della nuova App, si è pensato di raggruppare tutte queste indicazioni nel campo "veicolo", così da impostare automaticamente i diversi dati dell'auto elettrica. Ciò ha peresso di creare uno storico delle singole ricariche, e impostare adeguatamente il blocco pre-distorsione e il rendimento, caratteristici del singolo veicolo.
Nella nuova soluzione, attraverso l'App, l'utente finale sceglierà da una lista il modello corrispondente al veicolo da dover caricare. In un secondo step vengono chieste le sue preferenze 'utente': lo stato di carica della batteria, facilmente individuabile sul cruscotto dei veicoli, il soc finale desiderato, l'ora di partenza e la presa sulla quale effettuare la ricarica. Tali informazioni arrivano direttamente alla piattaforma Charge Advaisor, sulla quale per ogni veicolo sono presenti le caratteristiche di ricarica . Pertanto Charge Advisor inoltra la richiesta di ricarica con smart charging verso il sistema EMM, passando le informazioni necessarie per il corretto funzionamento (5.4).
Il sistema EMM cosi come inizia l'iter sviluppato in mobinciy invia la notifiction , i dati provenienti dal campo e la richiesta di 'scheduling', ChargeAdvaisor restituisce ad ogni

nuova richiesta di ottimizzazione, il vettore di potenze da settare. Grazie al blocco predistorsore i dati inviati ora sono quelli modificati, in modo tale che il veicolo segua il set point di potenza calcolato dall'algoritmo di ottimizzazione.
La piattaforma ChargeAdvaisor ora ha una doppia funzionalità, permette una gestione ottimizzata della load Area ed è il portale attraverso il quale l'utente richiede il servizio di ricarica con smart charging.
Grazie all'informazione sul veicolo chargeAdvaisor imposta automaticamente i blocco di pre distorsione, il rendimento del singolo veicolo e salva i dati delle ricariche in maniera adeguata.
Grazie all'App e all'aggiornamento dei dati real time, l'utente può seguire il processo di ricarica monitorandone l'avanzamento, e può terminarne il processo con la funziona di stop.
In aggiunta l'App offre la possibilità di prenotare una presa di ricarica, in funzione delle esigenze dell'automobilista, in una qualsiasi stazione collegata al sistema. Questa soluzione è pensata per i viaggi programmati, in modo tale che l'utente possa essere tranquillizzato sulla disponibilità di punti di alimentazione del veicolo.

8.2 Nuove ricariche

Per testare l'efficacia del blocco pre-distorsione, riducendo al minimo l'errore sulla potenza fornita alla ricarica, sono state effettuate delle prove sul singolo veicolo messo a disposizione. I test sono stati effettuati con la stessa metodologia β (7.1), impostando adeguatamente i valori della target sia durante la fase a cornete costante sia in corrispondenza della fase finale della ricarica.

8.2.1 Nuova ricarica veicolo A

Il veicolo A presenta uno stato di carica iniziale 48% e viene caricato fino al 100%. Attraverso il calcolo di previsione è stato imposto al veicolo una target di 9 [kW] attorno al 85% del soc previsto, questo permette di impostare ad un soc reale del 90% il valore desiderato della target. Lo scostamento tra i due è dovuto al fatto che il SOC_{reale} considera anche la fase di ricarica incontrollata che, come visto dall'algoritmo dura circa 2/4 minuti (5.3), influenzando il SOC di circa 5%.
Per mostrare l'efficacia del modello, indipendentemente dalla potenza settata, si sono scelti diversi valori corrispondenti a potenze sia elevate sia basse; in particolare si vuole mettere in evidenza l'effetto del blocco di pre-distorsione in corrispondenza di bassi valori della $P_{computed}$, dove è atteso un comportamento non completamente reattivo caratteristico del veicolo. Si osserva che la target è stata settata per una ricarica molto più lunga di quella prevista.

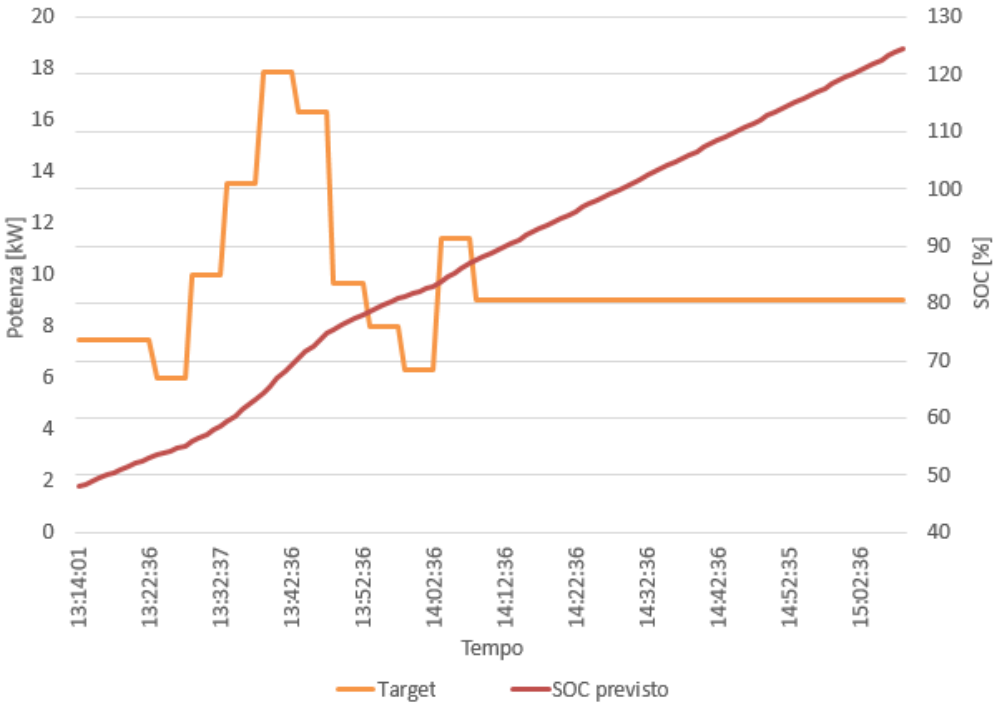


Figura 8.1: Andamento della target test con soluzione implementata veicolo A

Risultati veicolo A

Il grafico mostra come il veicolo segua perfettamente il set point di potenza senza introdurre più l'errore di potenza che si riscontrava nelle prime ricariche (5.15). Si osserva l'efficacia del blocco pre distorsore ai diversi livelli di potenza; infatti non è percepibile più nessuna differenza tra il set point e la potenza reale assorbita, mentre inizialmente si aveva un gap variabile in funzione del PWM, che era massimo in corrispondenza dei bassai valori di $P_{computed}$, quando il veicolo assumeva un comportamento completamente reattivo con gap massimo 7.5 kW come riportato nel grafico (7.8). Questa corretta compensazione è stata possibile grazie all'impiego di differenti $Cos\varphi$ ai diversi valori di PWM; utilizzare un unico fattore di potenza avrebbe portato compensazioni troppo elevate su alcuni valori e compensazioni troppo basse su altri.

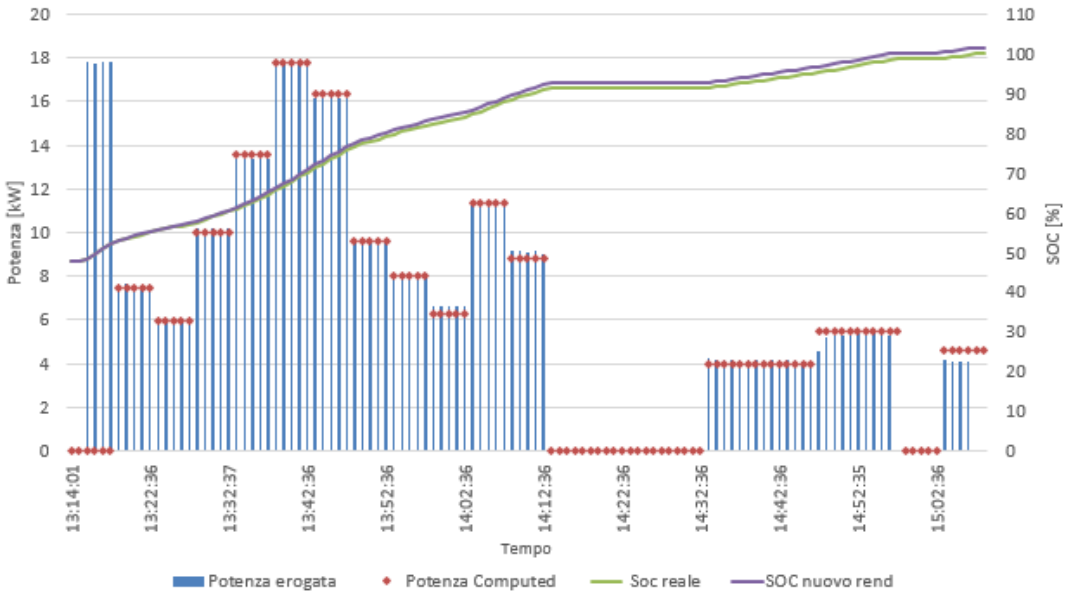


Figura 8.2: Andamento della SOC_{reale} e del $SOC_{nuovorendimento}$

Il contributo maggiore lo si nota in corrispondenza dei bassi valori come 4 e 6 kW, il veicolo ricalca anche in questa condizione l'andamento del riferimento dell'ottimizzatore.
Il grafico mostra inoltre come:

- L'andamento del SOC_{reale} e del SOC_{ca} sono praticamente sovrapposti si osserva solo un delta di 1.1% legato al fatto che il rendimento della ricarica risulta essere 0.87 mentre su ChargeAdvaisor utilizza 0.9 . Questa piccola differenza non incide sulla ricarica che viene portata al completamento come si osserva dal grafico: il veicolo ad un certo punto smette di seguire la target perché carico.

- L'efficienza del sistema risulta essere prossima a 1, infatti non è percepibile la differenza tra l'andamento della potenza reale e l'andamento del set point: si osservano piccoli scostamenti durante la ricarica nell'ordine del centinaio di Watt e solo in

corrispondenza dell'ultimo set point il veicolo smette di seguire la $P_{computed}$ perché completamente carico.

Va osservato che al sistema è stato imposto come valor massimo della target oltre 90% del soc reale un valore di 9 kW poiché, come riscontrato in precedenza nei test garantisce di prolungare la fase a corrente costante e limitare il tempo della fase finale della ricarica. L'algoritmo però attribuisce valori minori della $P_{computed}$ rispetto alla target. Questo garantisce comunque che il sistema segua il riferimento di potenza ma ne prolunga il tempo di ricarica. Vediamo che confrontato con la soluzione inizziale dove venivano impiegati i dati teorici e il rendimento era pari a 0.8 la ricarica per ChargeAdavaisor sarebbe dovuta continuare ancora poiché è il $SOC_{teorico}$ non ha ancora raggiunto il valore desiderato.

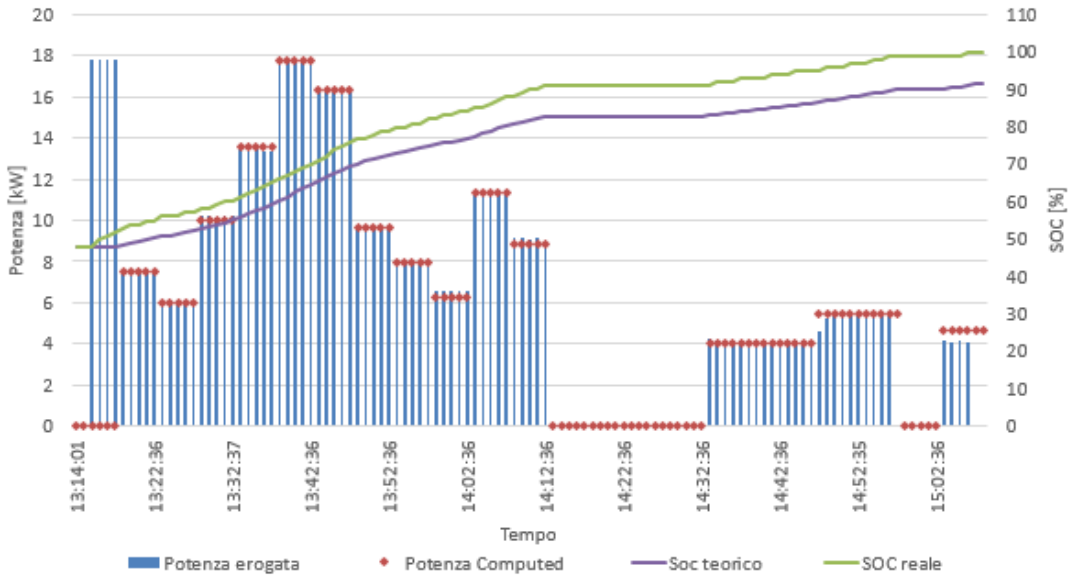


Figura 8.3: Andamento della SOC_{reale} e del $SOC_{teorico}$

Nonostante il blocco di pre distorsione sia riuscito a compensare l'errore di potenza, il veicolo continua ad avere un fattore di potenza non unitario verso la rete, problematica che come discusso nel capitolo precedente non può essere annullata poiché intrinseca del comportamento del mezzo.
Si riporta il grafico contenente l'evoluzione del rendimento del sistema: si nota come l'implementazione del nuovo rendimento su ChargeAdvaisor e l'utilizzo dei dati reali abbiano contribuito ad aumentare in parte l'efficienza del sistema; la condizione ottimale si è raggiunta con l'implementazione anche del blocco di pre distorsione unitamente all'applicazione di bassi set point in corrispondenza del fine ricarica.

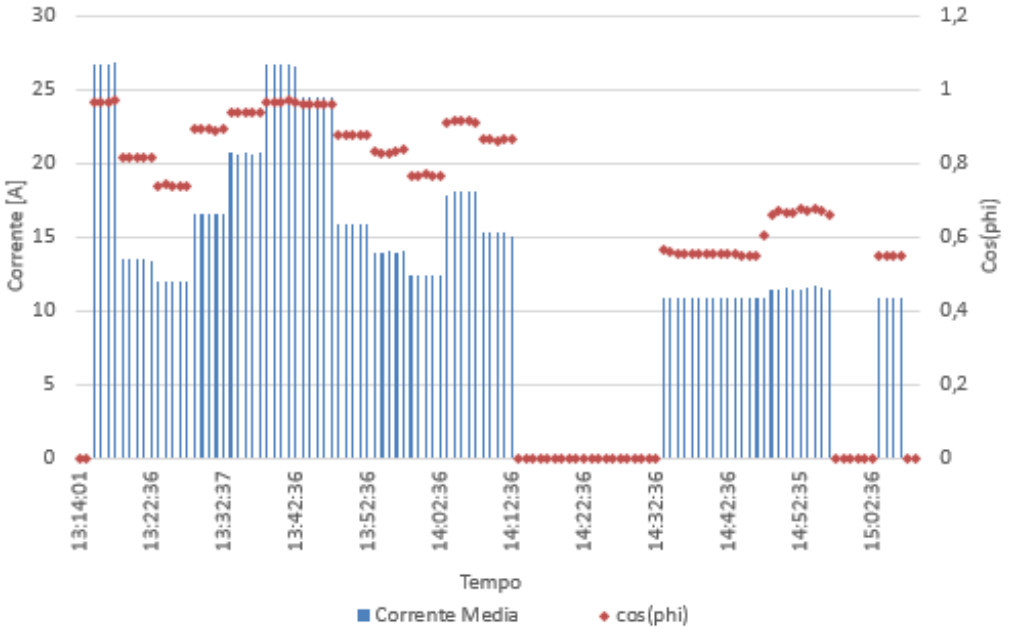


Figura 8.4: Andamento $Cos\varphi$ e PWM nuova soluzione

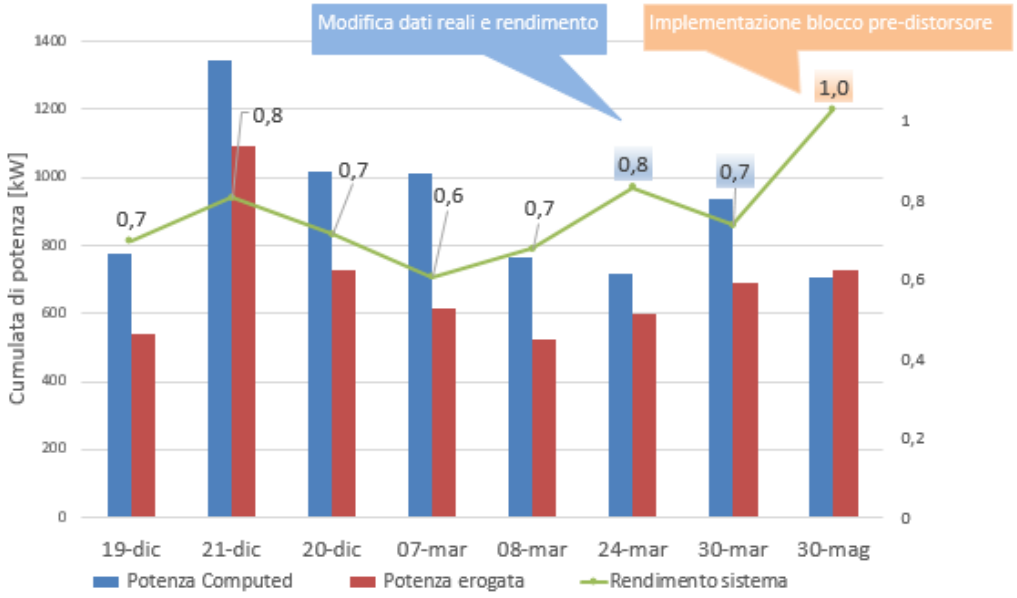


Figura 8.5: Andamento del rendimento del sistema nelle diverse prove veicolo A

8.2.2 Nuova ricarica veicolo B

Il veicolo B presenta uno stato di carica pari al 60% e viene caricato fino al 100%. Così come per il veicolo A è stata scelta una target che metta in evidenza il contributo del blocco

pre distorsore alle diverse potenze. In particolare si vuole evidenziare il comportamento in corrispondenza di elevati valori della $P_{computed}$ poiché in questi punti il veicolo presentava delle criticità 5.24. Inoltre si è impostato un valore pari a 8 kW oltre l'85% del $SOC_{previsto}$ per le stesse considerazioni fatte per il veicolo A.

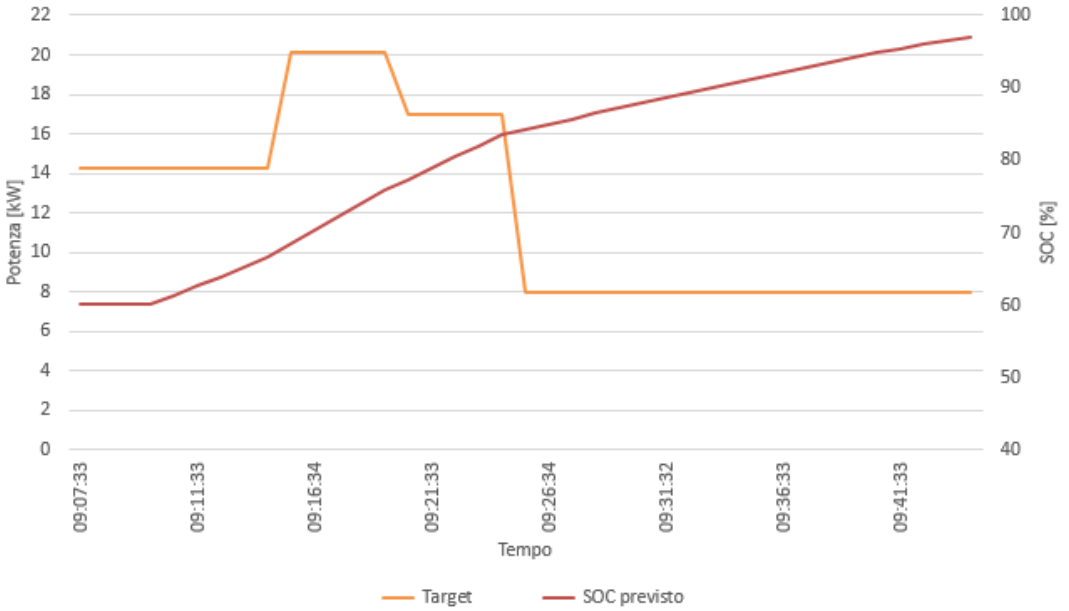


Figura 8.6: Andamento della target e del rendimento previsto

Risultati veicolo B

Il grafico mostra come il veicolo segua perfettamente il set point di potenza senza eccederlo in maniera elevata come si riscontrava nelle prime ricariche 5.24. L'effetto di blocco di predistorsione rispetto al caso precedente risulta essere meno marcato in quanto questo perché il veicolo presenta un fattore di potenza unitario e non introduce un errore nel set point di corrente.
Il grafico mostra inoltre come:

- L'andamento del SOC_{reale} e del SOC_{ca} sono praticamente sovrapposti si osserva solo un delta di 0.85% che non influenza sul temine della ricarica, tale differenza è legata al fatto che il rendimento della ricarica risulta essere 0.95 mentre il rendimento di ChargeAdvaisor η risulta essere 0.97
- L'efficienza del sistema risulta essere prossima a 1, infatti non è percepibile la differenza tra l'andamento della potenza reale e l'andamento del set point della P durante la fase a corrente costante, si hanno piccoli scostamenti nell'ordine del centinaio di watt compatibili con il valore atteso. Nella fase finale invece si osserva l'intervento del controllo di tensione che produce uno scostamento tra $P_{computed}$ e $P_{erogata}$, successivamente la ricarica termina.

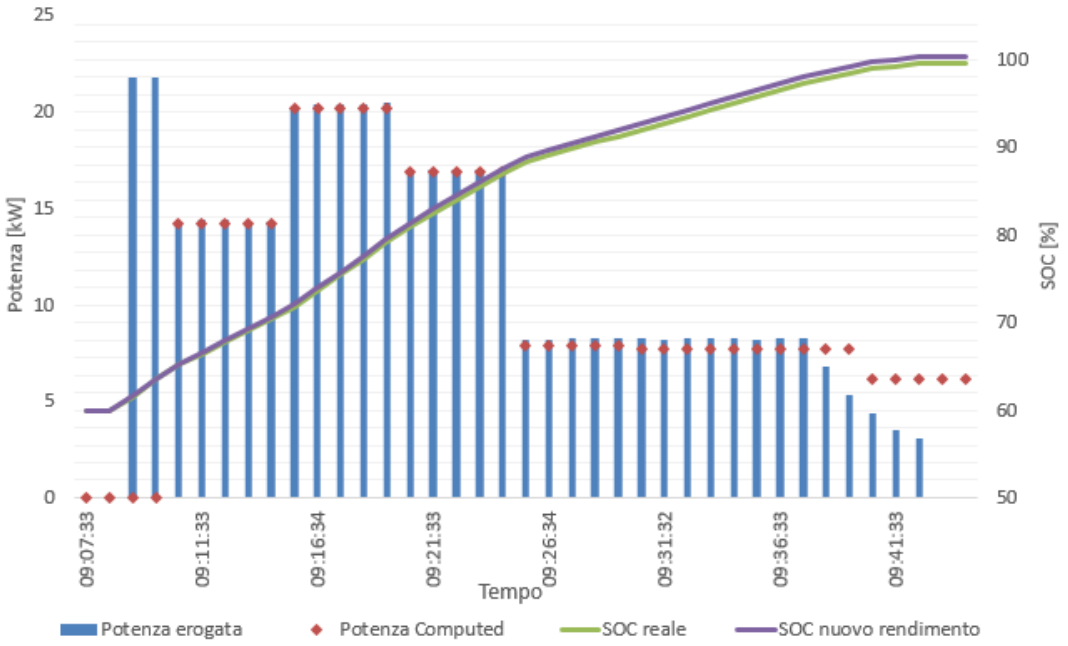


Figura 8.7: Andamento del SOC_{reale} e del $SOC_{nuovorendimento}$

Va osservato che al sistema è stato imposto come valor massimo della target oltre 90% del soc reale un valore di 8 kW poiché, come riscontrato in precedenza nei test garantisce di prolungare la fase a corrente costante e limitare il tempo della fase finale della ricarica. Si osserva come il controllo di tensione interviene quasi a fine ricarica incidendo poco sull'andamento. Si osserva anche in questo caso come per i veicolo A come l'utilizzo dei dati reali del rendimento contribuiscano a terminare la ricarica in modo corretto, con la configurazione iniziale la ricarica sarebbe dovuta continuare ancora. Si nota come il veicolo mantenga un $Cos\varphi$ pari a 1 durante tutta la sessione della ricarica. Si riporta il grafico contenete l'evoluzione del rendimento del sistema mettendo in evidenza le implementazioni effettuate. Si nota come la modifica del rendimento e l'implementazione sulla lettura dei dati reali abbiano contribuito ad aumentare l'efficienza del sistema. La condizione ottimale si è raggiunta con l'implementazione anche del blocco di pre-distorsione unitamente all'applicazione di bassi set point in corrispondenza del fine ricarica.

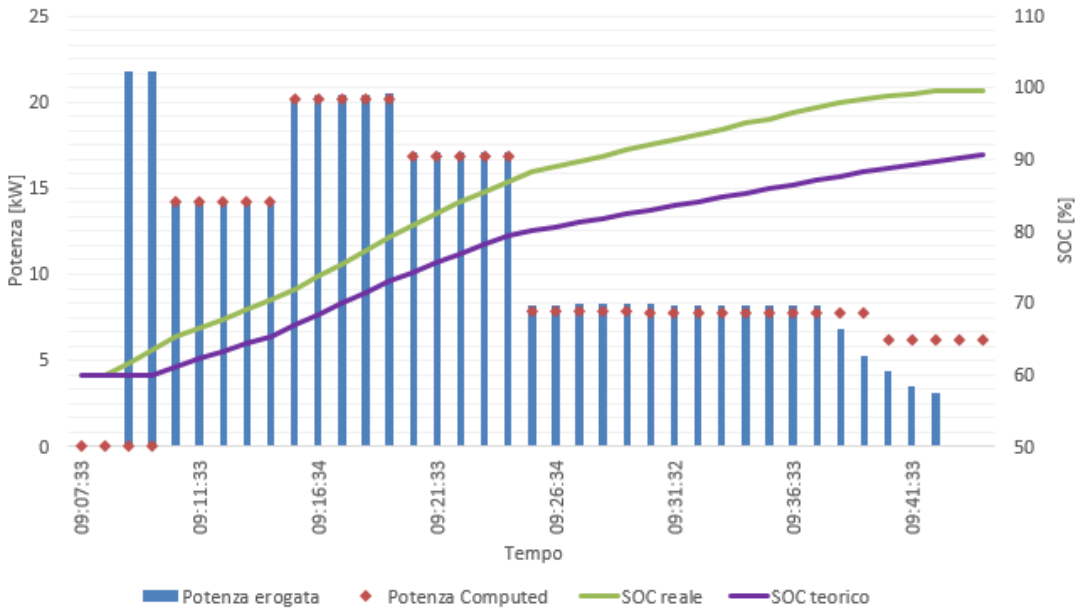


Figura 8.8: Andamento del SOC_{reale} e del $SOC_{teorico}$

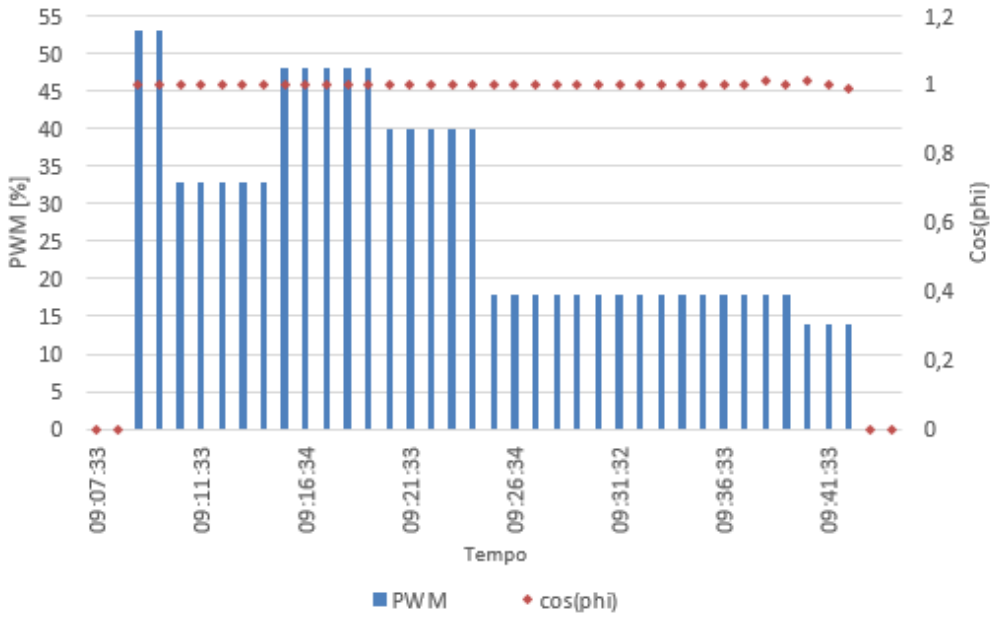


Figura 8.9: Andamento del $Cos\varphi$ e del PWM nella nuova soluzione

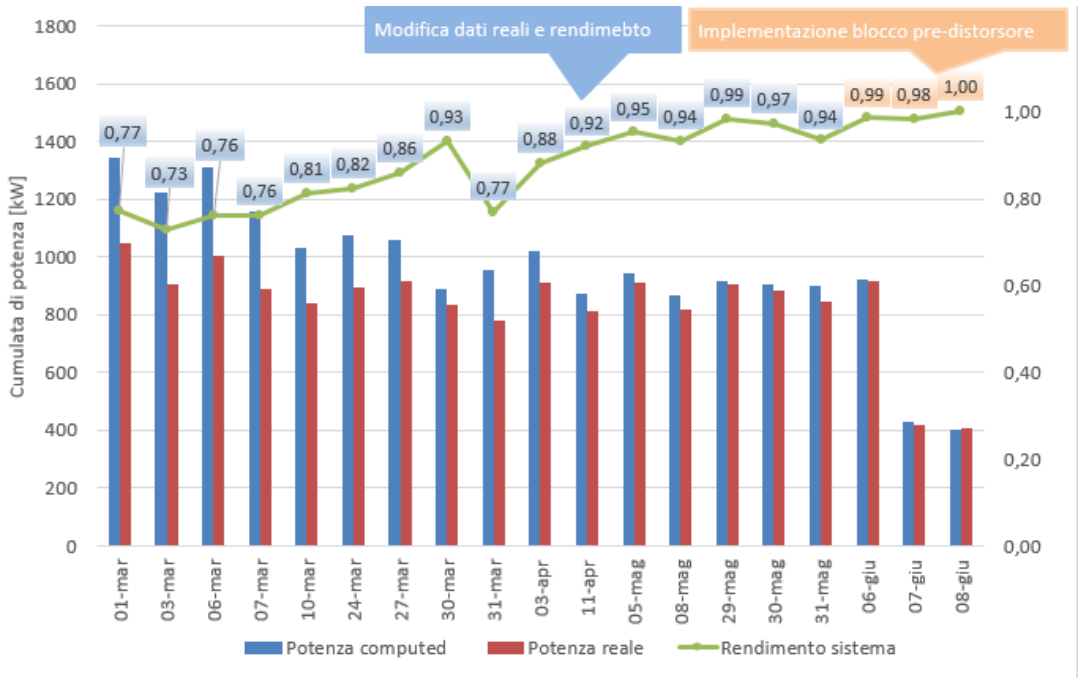


Figura 8.10: Andamento del rendimento del sistema nelle diverse prove veicolo B

Capitolo 9

Conclusioni

I veicoli elettrici rappresentano sempre più una realtà quotidiana, grazie alle loro peculiarità, promuovono una green economy e riducono l'inquinamento acustico e dei gas nocivi. Per poter sfruttare a pieno le potenzialità dei veicoli, superando l'idea che siano un nuovo carico per la rete, è necessario ricorrere alla tecnologia delle smart city per una loro totale integrazione, permettendo alla rete di utilizzare queste nuove "batterie distribuite."
E-distribuzione negli anni ha svolto un ruolo fondamentale nel promuovere nuovi progetti pilota che hanno portato a sviluppare una rete infrastrutturale efficiente in cui i clienti sono adeguatamente supportati. Con il progetto Mobincity si è introdotta, per la prima volta, la ricarica con smart charging che permette la modulazione del carico dei veicoli prendendo in considerazione sia i vincoli della rete che le preferenze utente. Tale soluzione nasce dalla sinergia di due piattaforme: Charge Advaisor e EMM; la prima contiene l'algoritmo di modulazione intelligente della potenza, la seconda invece permette il monitoraggio e il controllo delle stazioni di ricarica.
Nel presente lavoro è stato testato, con l'impiego di due veicoli denominati A e B messi a disposizione da E-distribuzione, il sistema di smart charging con l'obiettivo di migliorare la soluzione sviluppata in passato con il progetto Mobincity. Sfruttando la tecnologia delle smart city si è mostrato come il sistema, per esser più efficiente, deve essere dinamico, adattandosi così alle diverse tecnologie proposte. Nella soluzione messa in evidenza i dati ottenuti non rappresentano solo un mezzo per poter supportare il cliente ma, attraverso una loro corretta analisi e interpretazione, permettono di ottimizzare le ricariche rendendo più efficiente il sistema di smart charging.
Dai test effettuati è emerso che il sistema permette di rispettare i vincoli della rete ma non risulta essere efficiente per quanto riguarda l'acquisizione e l'elaborazione dei dati, poiché utilizza, per l'aggiornamento dello stato di carica, i valori di potenza teorica e non quelli reali. Per permettere al sistema di tener conto di eventuali scostamenti dal comportamento reale si sono quindi cambiate le impostazioni su ChargeAdvaisor.
Un'altra problematica riscontrata nel sistema è legata al limitato numero di caratteristiche tecniche delle auto prese in considerazione: la capacità della batteria, la potenza massima e la potenza minima. Non sono considerati fattori di potenza diversi da uno ed eventuali riduzioni della corrente assorbita dal veicolo rispetto al set point che, come riscontrato nei

test, provocano una differenza tra la potenza di riferimento e quella reale assorbita dal sistema. La soluzione sviluppata a questo proposito è stata la realizzazione di un blocco di pre-distorsione che compensa lo scostamento tra le due potenze. L'introduzione del blocco di pre-distorsione permette inoltre di compensare il disallineamento della tensione considerata da EMM e quella reale della rete.
I test sui veicoli hanno dimostrato inoltre che la soluzione statica iniziale del sistema, dove tutti i veicoli presentano le stesse caratteristiche in termini di rendimento, non risulta essere ottimale poiché le ricariche si prolungano nel tempo. L'analisi dei dati ottenuti dai diversi test ha così permesso di determinare un valore di rendimento caratteristico per ogni singolo veicolo.
L'implementazione su ChargeAdvaisor del blocco di pre-distorsione, l'aggiornamento del rendimento in base al veicolo, l'impiego dei dati reali insieme alla riduzione della potenza in corrispondenza del fine ricarica, hanno permesso di raggiungere un'efficienza del sistema prossima a 1, infatti come si nota dagli ultimi grafici la differenza tra la potenza di riferimento e quella reale assorbita risulta essere trascurabile.
La realizzazione di un sistema dinamico che si adatta alle caratteristiche dei diversi veicoli, attraverso lo sviluppo di un applicativo dedicato, permette un guadagno in termini di tempi di ricarica e suddivisione corretta della potenza a disposizione.
La problematica relativa ad un sistema poco user-friendly, dove i clienti devono indicare caratteristiche spesso non conosciute come ad esempio Pmax e Pmin, è stata superata con l'impiego dell'app che consente la realizzazione di un servizio 'fluido' in cui tutte le caratteristiche del veicolo vengono impostate automaticamente e il cliente deve inserire solo le proprie preferenze. Attraverso l'indicazione della tipologia del veicolo vengono impostati automaticamente il blocco pre-distorsore e il suo rendimento caratteristico.
L'analisi effettuata deve essere promossa su larga scala, grazie all'indicazione del veicolo è ora possibile salvare le ricariche in base al modello ed effettuare un'analisi per ogni veicolo, questo permetterà la costruzione per ogni veicolo di una tabella di caratterizzazione che contribuirà contribuirà ad ottimizzare il processo di ricarica.
Si rende quindi necessario sviluppare un sistema completamente automatizzato che permetta l'analisi dei dati seguendo le indicazioni proposte nella tesi. Il sistema, ad ogni nuova ricarica, potrà aggiornare le caratteristiche implementando le misurazioni effettuate, allineando cosi i dati dei nuovi veicoli alla situazione ottimale raggiunta per i due veicoli in esame.
L'implementazione sui limiti della potenza al fine ricarica verrà introdotta a breve, questo garantirà alla piattaforma di ChargeAdvaisor una gestione ottimale della potenza a disposizione evitando di attribuire ai veicoli potenze che in realtà non riescono ad assorbire. Il risultato dei test conferma che la limitazione della potenza massima in corrispondenza del fine ricarica permette un minimo allungamento dei tempi ma garantisce di sfruttare meglio la potenza a disposizione.
La soluzione di smart charging dinamico, unitamente alla nuova modalità di ricarica in movimento sviluppata dal professor Guglielmi, potrà essere l'alternativa alle ricariche fast ritenute ad oggi la soluzione ottimale.
La nuova soluzione proposta e l'impiego dell'app permetteranno agli utenti di spostarsi in piena libertà ed ottimizzare il sistema sfruttando i dati stessi delle ricariche; questo

porterà ad una mobilità sostenibile e a una gestione ottimale della rete con minori potenze in gioco e una riduzione dei costi e sprechi, in un circolo virtuoso a beneficio dell'ambiente.

Appendice A

Norma 61851

A.1 Tabelle circuito pilota di controllo

Tabella A.1: Parametri e valori del circuito pilota di controllo per l'apparecchiatura di alimentazione

Table A.2 – Control pilot circuit parameters and values for the EV supply equipment

Parameter[a]	Symbol	Min. value	Typical value	Max. value	Units	Remark
Generator open circuit positive voltage [c]	Voch	11,4	12	12,6	V	
Generator open circuit negative voltage[c]	Vocl	-12,6	-12	-11,4	V	
Frequency generator output	Fo	980	1 000	1 020	Hz	
Pulse width [b c]	Pwo	Per Table A.7 -5µs	Per Table A.7	Per Table A.7 + 5 µs	µs	
Rise time (10 % to 90 %) [c]	Trg	-		2	µs	Design value for the oscillator.
Fall time (90 % to 10 %)[c]	Tfg	-		2	µs	Design value for the oscillator.
Settling time to 95 % steady state [c]	Tsg	-		3	µs	Design value for the oscillator.
Equivalent source resistance	R1	970	1 000	1 030	Ω	970 Ω to 1 030 Ω 1 %equivalent resistors commonly recommended
EV supply equipment capacitance [d]	Cs	300	-	1 600	pF	
Cable capacitance	Cc	-	-	1 500	pF	Case B (cord set)
Optional series (damped) inductance [e]	Lse	-	-	1	mH	Maximum value allowed on off board EV supply equipment

[a] Tolerances to be maintained over the full useful life and under environmental conditions as specified by the manufacturer.

[b] At 0 V crossing of the 12 V signal.

[c] At point Vg as indicated on Figure A.1 and Figure A.2.(to be measured at output – open circuit).

[d] For Mode 3 Case C and for a Mode 2 cord set the max equivalent capacitance is total of Cc + Cs.

[e] Damped inductance. Nominal values of additional components such as L and required damping (R-damp)) used for high-frequency signal, are defined in Table A.11 of ISO 15118-3:2015.

EV pilot circuit values and parameters as indicated on Figures A.1 and A.2 are given in Table A.3.

Tabella A.2: Parametri e valori del circuito pilota di controllo per il veicolo elettrico

Table A.3 – EV control pilot circuit values and parameters and values for the EV

Parameter	Symbol	Min. value	Typical value	Max. value	Units
Permanent resistor value (Figure A.1)	R3	2 658	2 740	2 822	Ω
Switched resistor value for vehicles not requiring ventilation (Figure A.1)	R2 State Cx	1 261	1 300	1 339	Ω
Switched resistor value for vehicles requiring ventilation (Figure A.1)	R2 State Dx	261,9	270	278,1	Ω
Equivalent total resistor value no ventilation (Figure A.2)	Re State Cx	856	882	908	Ω
Equivalent total resistor ventilation required (Figure A.2)	Re State Dx	239	246	253	Ω
Diode (D) voltage drop (2,75 – 10 mA, -40 °C to + 85 °C)	Vd	0,55	0,7	0,85	V
Reverse recovery time	Tr	-	-	200	ns
Total equivalent input capacitance [a]	Cv	-	-	2 400	pF
Optional additional series (damped) inductance [b]	Lsv	-		1	mH

[a] For Mode 3 Case A the max equivalent capacitance is total of Cc + Cv. Cc is given in Table A.2.

[b] Damped inductance. Stray and additional components such as RDamp, L used for high-frequency signal, are defined in Table A.11 of ISO 15118-3:2015.

Value ranges shall be maintained over full useful life and under design environmental conditions.

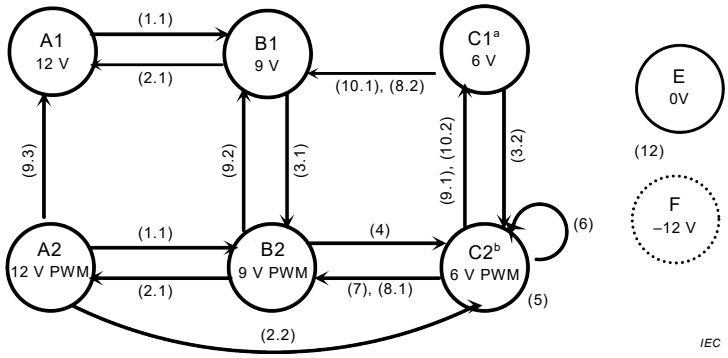
1 % tolerance resistors are commonly recommended for this application.

Table A.4 indicates the pilot voltage range based on components values in Tables A.2 and A.3. It incorporates an increased voltage margin for Va to allow for measurement tolerances of the EV supply equipment.

A.2 Sequenze dei passaggi di stato del circuito pilota di controllo

In case EV supply equipment requires authentication to supply power, a change from states CX or DX to state BX shall not lead to loss of authentication. This means that no repeated authentication shall be needed.

See Figures A.3 and A.4 for state diagrams.



Numbers in brackets refer to the sequence reference in Table A.6.

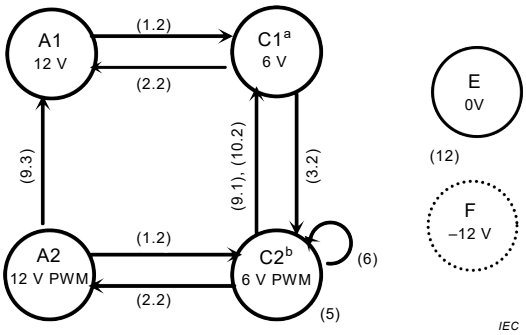
A change from any state to state Ax, E or F may take place at any time.

[a] Can be state D1 (3V).

[b] Can be state D2 (3V PWM).

Not all state changes and sequences described in Table A.6 are shown in this figure, e.g. a change from any state to state Ax, state E or state F may take place at any time.

Figure A.3 – State diagram for typical control pilot (informative)



Numbers in brackets refer to the sequence reference in Table A.6.

Not all state changes and sequences described in Table A.6 are shown in this figure, e.g. a change from any state to state Ax, state E or state F may take place at any time.

[a] Can be state D1,(3V).

[b] Can be state D2,(3V PWM).

NOTE Simplified pilot is not supported in SAE J1772:2016.

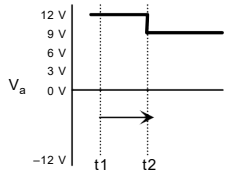
Figure A.4 – State diagram for simplified control pilot (informative)

Table A.6 indicates the principle sequences and transitions from one state to another with the timing requirements where applicable. Some transitions that may take place are not indicated in the table.

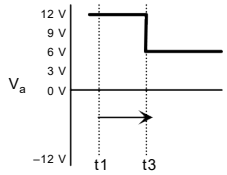
If the EV supply equipment or the EV changes to a new state within the timing indicated for that sequence, the new sequence is initiated and replaces the previous sequence.

Table A.6 – List of sequences

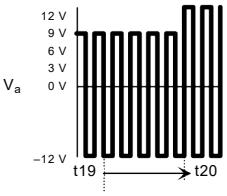
Sequence 1.1 Plug-in (With S2)

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
1.1  AC supply remains off S2 remains open AC current remains off Trigger: n/a	A1	(1) EV not connected +12 V	(t_2-t_1) = No max[a]
	A1→B1 or A2→B2 (not shown in image)	(2) The cable assembly is connected to the vehicle and to the EV supply equipment, +9 V.	

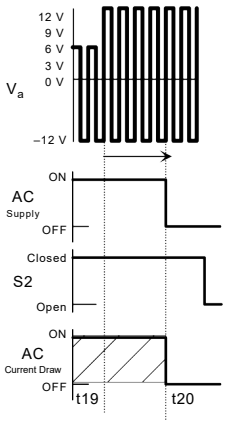
Sequence 1.2 Plug-in (w/o S2 or S2 always in close position)

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
1.2  AC supply remains off S2 already or always closed AC current remains off Trigger: n/a	A1	(1) EV not connected +12 V	(t_3-t_1) = No max[a] (3)
	A1→C1/D1 or A2→C2/D2 (not shown in image)	(3) The cable assembly is connected to the vehicle and to the EV supply equipment NOTE 1 This sequence indicates EV operates in simplified control pilot function. NOTE 2 t2 does not exist in this sequence. NOTE 3 In case this sequence 1.2, the EV supply equipment can assume EV operates in simplified control pilot and may not follow the current limitation indication by PWM. To detect if the EV operates in simplified control pilot, it is recommended for the EV supply equipment to start in state A1. Simplified pilot is not supported in SAE J1772:2016.	

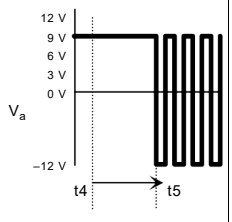
Sequence 2.1 Unplug at state Bx

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
2.1  AC supply remains off S2 remains open AC current remains off Trigger: n/a	B2→A2 or B1→A1 (not shown in image)	(19) Plug disconnected from the EV supply equipment or vehicle connector disconnected from the vehicle inlet. (20) EV not connected The EV supply equipment shall allow removal of the plug automatically, at a maximum of 5 s, when entering state A (case A or B) unless the locking was initiated through user interaction (e.g. authorization). Then unlatching / unlocking can be done only by using the adequate user interaction or both. In case A, EV with attached cable, a switch may be added on the control pilot circuit, on the EV side (cable, plug, vehicle), to simulate the EV disconnection (state A).	(t_{20}-t_{19}) = No max[a]

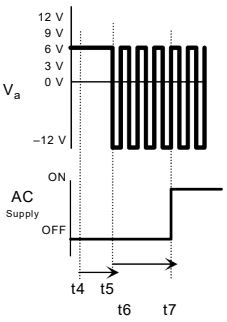
Sequence 2.2 Unplug at state Cx, Dx

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
2.2  Trigger: C2 (or D2) → A2	C2, D2 → A2	(19) In case of a failure, if – the control pilot circuit is broken or – the plug disconnected from the EV supply equipment under load or – the vehicle connector disconnected from the vehicle inlet under load, the EV supply equipment shall open its switching device. The EV shall open its S2, if any.	(t_{20}-t_{19}) = Max 100 ms from t_{19} Max 3 s
	C2, D2 → A2	(19) In case of normal operation, – the plug disconnected from the EV supply equipment not under load or – the vehicle connector disconnected from the vehicle inlet not under load, the EV supply equipment shall open its switching device. The EV shall open its S2, if any.	(t_{20}-t_{19}) = Max 100 ms from t_{19} Max 3 s
Trigger: C1 (or D1) → A1	C2,D2→ A2 or C1,D1→ A1	(19) EV not connected The EV supply equipment shall allow removal of the plug automatically, at a maximum of 5 s, when entering state A (case A or B) unless the locking was initiated through user interaction (e.g. authorization). Then unlatching / unlocking can be done only by using the adequate user interaction or both. In case A, EV with attached cable, a switch may be added on the pilot line, on the EV side (cable, plug, vehicle), to simulate the EV disconnection (state A), an EV that uses this, needs to make sure that the load is below 1 A.	

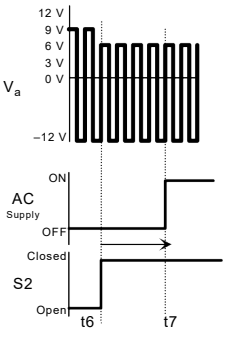
Sequence 3.1 EV supply equipment power available (state B)

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
3.1  AC supply remains off S2 remains open AC current remains off Trigger: EV supply equipment is able to supply energy	B1→B2	(5) The EV supply equipment is now able to supply power, and indicates the maximum current by the PWM duty cycle. The EV may detect this transition from B1 to B2, e.g. for wake-up. NOTE 4 This sequence can take place in the beginning of a charging session or to resume a charging session.	(t_5-t_4) = No Max[a]

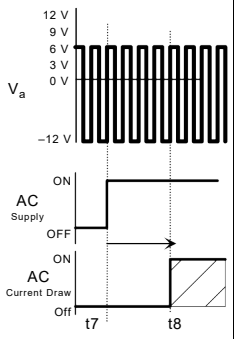
Sequence 3.2 EV supply equipment power available (state C)

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
3.2  S2 remains closed AC current remains off Trigger t4: EV supply equipment is able to supply energy Trigger t5: C1 →C2 or D1→D2	C1→C2 Or D1→D2 (not shown in image)	(5) The EV supply equipment is now able to supply energy, and indicates the maximum current by the PWM duty cycle.	(t_5-t_4) = No Max[a]
		(6) The EV is ready to receive energy.	(t_6-t_5) = 0 s
		(7) EV supply equipment energizes the system. If state D2 is detected, the supply will close only if ventilation requirements are met. If the duty cycle is equivalent to 5 % the EV Supply Equipment may not energize the system without digital communication (see Table A.8). NOTE 5 Maximum values for the inrush current of the EV are defined in ISO 17409.	(t_7-t_6) = Max 3 s

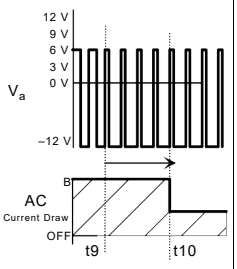
Sequence 4 EV ready to charge

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
4  AC current remains off Trigger: B2→C2,D2	B2→C2,D2	(6) The EV is ready to receive energy. (7) EV supply equipment energizes the system, unless the EV supply equipment changes within the 3 s timing to another state (e.g. C1).	(t_7-t_6) = Max 3 s
	C2,D2	If state D2 is detected, the supply will close only if ventilation requirements are met. In case of an EV asks for ventilation delay, ventilation command turns on after transition from state C2 to state D2 in 3 s. in case the EV supply equipment does not have ventilation, it shall open its switching devices and may change to state x1. NOTE 6 In case of 5 % duty cycle, the amount of current is indicated by the digital communication, the EV supply equipment may close the supply switching device only after the authorization given by digital communication. NOTE 7 Maximum values for the inrush current of the EV are defined in ISO 17409.	

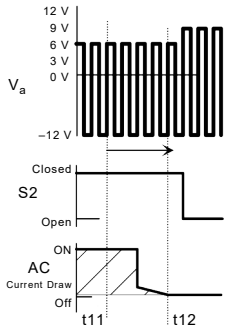
Sequence 5 EV starts charging

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
5  S2: remains closed Trigger: AC supply to EV	C2,D2	(8) Charge current drawn by the EV within the limit indicated by the duty cycle of the PWM signal given in Table A.8. NOTE 8 Maximum values for the inrush current of the EV are defined in ISO 17409.	(t_8-t_7) = No Min, No Max[a]

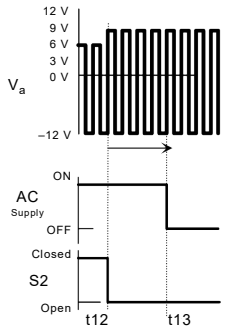
Sequence 6 Current change

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
6  AC supply remains available S2 remains closed Trigger: PWM duty cycle change	C2,D2	(9) EV supply equipment indicates an adjustment to the maximum AC line current. Such a change may originate from the grid, by manual settings or automatic changes calculated by the EV supply equipment. The EV supply equipment may change the duty cycle at any time to any valid duty cycle. In normal operation, during the 5 s allowed adjustment time (t10-t9), the EV supply equipment shall not initiate a new sequence 6 for changing the PWM.	Max 10 s From the instant when the EV supply equipment gets the status and responds by adjusting the duty cycle
		(10) The EV shall adjust its maximum current drawn to be equal or below the maximum current indicated by the PWM duty cycle.	(t_{10}-t_9) = Max 5 s

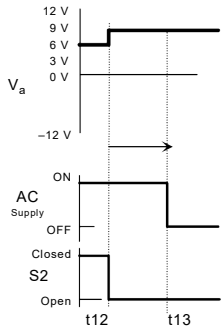
Sequence 7 EV stops charging

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
7  AC supply remains available Trigger: n/a	C2, D2	(11) In normal operation an EV shall decrease the current draw to minimum (less than 1 A) before opening S2. During a non-normal operation (emergency) the EV may open S2 immediately.	(t_{12}-t_{11}) = No Max[a]
	C2,D2 → B2	(12) The EV opens S2. NOTE 9 SAE J1772:2016 does not specify any minimum current draw before opening S2.	

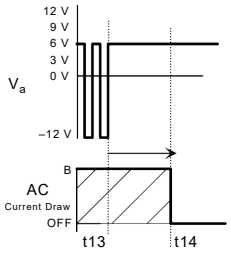
Sequence 8.1 EV supply equipment responds to EV opens S2 (with PWM)

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
8.1  AC current draw: off and remains off Trigger: C2/D2 → B2	B2	(13) The EV supply equipment shall open its switching device responding to a state change from state C2/D2 to state B2. (During a non-normal operation (emergency), the switching device might have to open under load). NOTE 10 SAE J1772 – 2016 defines a max. time of 3 s.	(t_{13}-t_{12}) = Max 100 ms

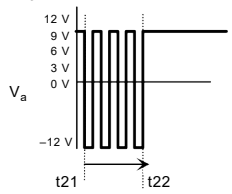
Sequence 8.2 EV supply equipment responds to EV opens S2 (w/o PWM)

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
8.2  AC current draw: off and remains off Trigger: C1/D1 → B1	B1	(13) The EV supply equipment shall open its switching device responding to a state change from state C1/D1 to state B1. An EV using the simplified pilot circuit is not able to generate this sequence. Simplified pilot is not supported in SAE J1772:2016.	(t_{13}-t_{12}) = Max 100 ms

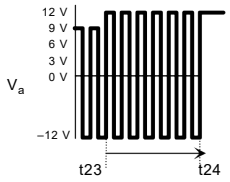
Sequence 9.1 EV supply equipment requests to stop charging

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
9  AC supply remains on S2 remains closed Trigger: C2,D2→C1,D1	C2,D2→C1,D1	(13) EV supply equipment may change to state x1 in order to indicate the EV to stop the current draw.	(t_{14}-t_{13}) = Max 3 s
	C1,D1	(14) The EV shall respond to the steady state PWM, and stops the current draw.	
	The EV supply equipment may open its switching device if the vehicle load current exceeds the maximum current indicated by PWM according to Table A.8.		

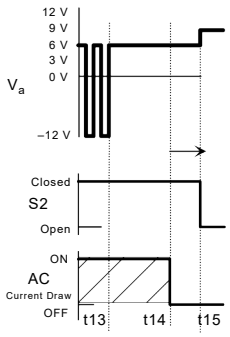
Sequence 9.2 EV supply equipment stops PWM at state B

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
9.2  AC supply remains off S2 remains open AC current draw remains zero Trigger: n/a	B2 → B1	(22) EV supply equipment may stop the PWM at any time. No action by the EV needs to take place. In case sequence 3.1 will follow sequence 9.2, the EV supply equipment shall wait at least 3 s. NOTE 11 This sequence interferes with time triggered charging or preconditioning of the EV.	(t_{22}-t_{21}) = No Max[a]

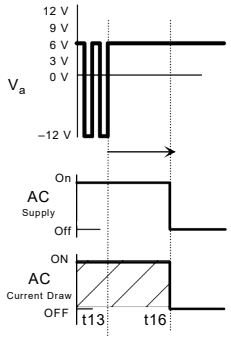
Sequence 9.3 EV supply equipment stops PWM at state A

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
9.3  AC supply remains off S2 remains open AC current draw remains zero Trigger B2/C2/D2 → A2	A2 → A1	(23) EV supply equipment may stop the PWM at any time. (24) No action by the EV needs to take place. EV disconnected. NOTE 12 SAE J1772:2016 requires a turn-off time less than 2 s.	(t_{24}-t_{23}) = No Max[a]

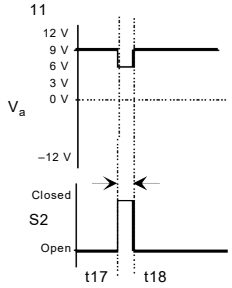
Sequence 10.1 EV responds to stop charging request

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
10.1  AC supply remains on Trigger:EV stops current draw		This sequence follows seq. 9.1. and the EV responds to the steady state by stopping the current draw.	
	C1,D1→B1	(15) The EV shall open S2.	(t_{15}-t_{14}) = Max 3 s
	This sequence shall be followed by sequence 8.2 An EV using the simplified pilot circuit is not able to generate this sequence Simplified pilot is not supported in SAE J1772:2016.		

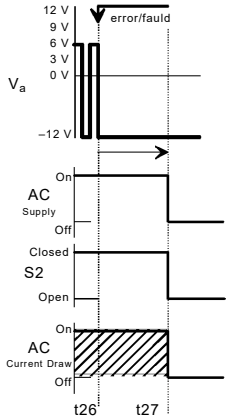
Sequence 10.2 EV does not respond to a stop charging request

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
10.2  S2 remains closed Trigger: C2/D2 → C1,D1		This sequence follows seq. 9.1. but the EV does not respond to the steady state and does not stop the current draw, contrary to seq. 9.1.	
	C1,D1	(16) The EV supply equipment may open its switching device under load. (Timer starts upon the PWM change)	$(t_{16}-t_{13})$ = Min 6 s
	NOTE 14 t_{15} does not exist due to any change of S2 in this sequence. Simplified pilot is not supported in SAE J1772:2016.		

Sequence 11 EV signal to the EV supply equipment

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
11  AC supply remains off AC current draw remains off Trigger: see ISO/IEC 15118	Bx→Cx/Dx →Bx	(17, 18) A transition from state Bx to Cx or Dx and Cx or Dx to Bx. The EV supply equipment shall not move to state F due to sequence 11. This sequence is optional, and shall be used only with digital communication (ISO/IEC 15118 series). This sequence may be used by the EV in order to signal the EV supply equipment (e.g. wakeup the digital modem). EV shall not draw current during this sequence.	$(t_{18}-t_{17})$ = Min 200 ms, Max 3 s

Sequence 12 State caused by error or fault condition

Example diagrams	State or transition	Conditions	Timing
 Trigger: any state → E or F	XX→F XX→E (not shown in image)	Changing from any state to state E, the EV supply equipment switching device shall be open.	(t_{27}-t_{26}) = Max 3 s
		EV shall open S2, if any.	(t_{27}-t_{26}) = Max 3 s
		The EV supply equipment unlatches / unlocks the socket-outlet if any. (Timing not shown on diagram). NOTE 13 In case B and if the cable assembly belongs to the EV supply equipment owner, the unlatching / unlocking is at the EV supply equipment owner's discretion.	Max 30 s
If locking is used, the EV supply equipment shall latch/lock the plug connected to the socket-outlet before closing its switching device, according to IEC 62196 series.			
• Va – Voltage of the control pilot at the socket-outlet or at the vehicle connector (as shown in Figure A.1 and Figure A.2). • AC supply – Status of the relays/contactor at the EV supply equipment (EV supply equipment is ready to supply energy). • S2 – Switching contacts terminals of the EV switch. • AC current draw – EV can draw electric energy.			
[a] The indication "No Max" implies that the delay time has no constraints and may depend on external influences and the conditions existing on the EV supply equipment or the EV.			

A.3 Tabella di conversione PWM

Tabella A.3: Conversione corrente PWM infrastruttura di ricarica e Auto

Table A.7 – Pilot duty cycle provided by EV supply equipment

Maximum current I_{av}	Nominal control pilot duty cycle D_N	Description
I_{av} = 0 A	D_N = 0 %	Continuous -12 V, EV supply equipment not available; state F
	D_N = 100 %	No current available – state x1 (see Table A.5)
Maximum current is indicated via digital communication	D_N = 5 %	A duty cycle of 5 % indicates that digital communication is required and shall be established between the EV supply equipment and EV before enabling energy supply. If digital communication cannot be established, the EV supply equipment shall: • stay in 5 % duty cycle or • change to x1 (100 % duty cycle) for at least 3 s or • change to x1 (100 % duty cycle) for at least 3 s and then change to a duty cycle between 10 % and 96 %.
6 A ≤ I_{av}≤ 51 A	D_N = I_{av} / 0,6 A	10 %≤ D_N≤ 85 %
51 A < I_{av}≤ 80 A	D_N = (I_{av} / 2,5 A + 64)	85 %< D_N≤ 96 %

NOTE Duty cycle tolerances are indicated in Table A.2.

Table A.8 – Maximum current to be drawn by vehicle

Control pilot duty cycle D_{in} at EV plug (in case A) or vehicle inlet	Maximum current I_{max}.to be drawn by vehicle	Description
Duty cycle < 3 %	0 A	Drawing current not allowed
3 %≤ D_{in} ≤ 7 %	As indicated by digital communication	A duty cycle of 5 % indicates that digital communication according to ISO/IEC 15118 series or IEC 61851-24 is required and shall be established between the EV supply equipment and the EV before energy supply. Drawing current is not allowed without digital communication. Digital communication may also be used with other duty cycles.
7 %< D_{in} < 8 %	0 A	Drawing current not allowed
8 %≤ D_{in} < 10 %	6 A	
10 %≤ D_{in} ≤ 85 %	D_{in} × 0,6 A	
85 %< D_{in} ≤ 96 %	(D_{in} – 64)× 2,5 A	
96 %< D_{in} ≤ 97 %	80 A	
97 %< D_{in} ≤ 100 %	0 A	Drawing current not allowed.
If the PWM signal is between 8 % and 97 % and there is a digital communication established, the maximum current shall not exceed the current indicated by the lower value of either the PWM signal or the digital communication. In 3-phase systems, the duty cycle value indicates the current limit per each phase. The EV supply equipment can start at any valid value of the duty cycle, and may change during power supply. The EV shall detect the frequency. In case the frequency is outside of (1 ± 5 %) kHz, the EV should not charge. For EVs using the simplified control pilot this is not applicable. The value given as “Maximum current (I_{max}) to be drawn by vehicle” does not cover either inrush current or leakage current such as current flowing to y-capacitors.		

A.4 Tabella delle resistenze per codifica corrente

Tabella A.4: Resistenza di codifica corrente per plug e connettore veicolo

Table B.2 – Current coding resistor for EV plugs and vehicle connector

Current capability of the cable assembly (A)	**Nominal resistance of Rc Tolerance ± 3 %[c]** (Ω)	**Minimum dissipation rating of resistances [a, b]** (W)	**Range of resistance Rc for interpretation by the EV supply equipment [e]** (Ω)
	Error condition [d] or disconnection of plug		> 4 500
13	1 500	0,5	1 100 – 2 460
20	680	0,5	400 – 936
32	220	1	164 – 308
63 (3-phase) / 70 (1-phase)	100	1	80 – 140
	Error condition [d]		< 60

[a] The power dissipation of the resistor caused by the detection circuit shall not exceed the value given above. The value of the pull-up resistor Ra shall be chosen accordingly.

[b] Resistors used should preferably fail open circuit failure mode. Metal film resistors commonly show acceptable properties for this application. Dissipation ratings are chosen to avoid destruction in the case of a fault to +12 V supply.

[c] Tolerances to be maintained over the full useful life and under environmental conditions as specified by the manufacturer.

[d] EV supply equipment shall not provide power.

[e] The minimum and maximum values of each range shall be tested. The choice of the resistance value at the transition between current levels is at the discretion of the EV supply equipment designer.

Contatori per	Corrente	Valore della corrente A
Inserzione diretta	I_{tr}	0,5 – 1 – 1,5 – 2
	(I_{ref} = 10 x I_{tr})	5 – 10 – 15 – 20
Inserzione mediante trasformatore/i di corrente	I_{tr}	0,05 – 0,1 – 0,25
	I_n (= I_{ref})	1 – 2 – 5 (EN 60044-1)
NOTA Il valore di I_{ref} è fornito a scopo informativo.		

Tabella A.5: Valori normali di Itr, Iref e In

Contatori per	Classe di precisione A	Classe di precisione B	Classe di precisione C
Inserzione diretta			
I_{st}	≤ 0,05 I_{tr}	≤ 0,04 I_{tr}	≤ 0,04 I_{tr}
I_{min}	≤ 0,5 I_{tr}	≤ 0,5 I_{tr}	≤ 0,3 I_{tr}
I_{max}	≥ 50 I_{tr}	≥ 50 I_{tr}	≥ 50 I_{tr}
Inserzione mediante trasformatori di corrente			
I_{st}	≤ 0,06 I_{tr}	≤ 0,04 I_{tr}	≤ 0,02 I_{tr}
I_{min}	≤ 0,4 I_{tr}	≤ 0,2 I_{tr} *	≤ 0,2 I_{tr}
I_n	= 20 I_{tr}	= 20 I_{tr}	= 20 I_{tr}
I_{max}	≥ 1,2 I_n	≥ 1,2 I_n	≥ 1,2 I_n
* Per i contatori elettromeccanici di classe di precisione B, si applica I_{min} ≤ 0,4 I_{tr}.			

Tabella A.6: Campi di corrente

Valore di corrente per contatori a inserzione diretta o mediante trasformatore	Fattore di potenza	Limiti di errore percentuale per contatori di classe di precisione		
		A	B	C
I_{min} ≤ I < I_{tr}	1	± 2,5	± 1,5	± 1,0
I_{tr} ≤ I ≤ I_{max}	0,5 ind...1...cap 0,8	± 2,0	± 1,0	± 0,5
NOTA Per i rapporti I_{min} / I_{tr} e I_{max} / I_{tr} vedere la Tabella 3 della EN 50470-1.				

Tabella A.7: Limiti di errore percentuale nelle condizioni di riferimento (contatori monofase e contatori polifase con carichi bilanciati)

Grandezza di influenza	Valore di corrente per contatori a inserzione diretta o mediante trasformatore	Fattore di potenza	Limiti dell'errore percentuale addizionale per contatori di classe di precisione		
			A	B	C
Variazione della temperatura					
da 5 °C a 30 °C	$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	1	± 1,8	± 0,9	± 0,5
		0,5 ind	± 2,7	± 1,3	± 0,9
da -10 °C a 5 °C da 30 °C a 40 °C	$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	1	± 3,3	± 1,6	± 1,0
		0,5 ind	± 4,9	± 2,3	± 1,6
da -25 °C a -10 °C da 40 °C a 55 °C	$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	1	± 4,8	± 2,4	± 1,4
		0,5 ind	± 7,2	± 3,4	± 2,4
da -40 °C a -25 °C da 55 °C a 70 °C	$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	1	± 6,3	± 3,1	± 1,9
		0,5 ind	± 9,4	± 4,4	± 3,1
Variazione di tensione ± 10 %	$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	1	± 1,5	± 1,0	± 0,3
		0,5 ind	± 2,0	± 1,5	± 0,5
Variazione di frequenza ± 2 %	$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	1	± 1,0	± 0,7	± 0,3
		0,5 ind	± 1,3	± 1,0	± 0,3
NOTA Per il rapporto I_{max} / I_{tr} vedere la Tabella 3 della EN 50470-1.					

Tabella A.8: Limiti dell'errore percentuale addizionale dovuto alle grandezze di influenza (contatori monofase e contatori polifase con carichi bilanciati)

I_{cp}	***PWM***	$Cos\varphi$	***Corrente attiva***	P_{attesa}
5,99	10	0,000	0,000	0,000
6,59	10	0,000	0,000	0,000
7,19	11	0,000	0,000	0,000
7,79	12	0,000	0,000	0,000
8,39	13	0,000	0,000	0,000
8,99	14	0,000	0,000	0,000
9,59	15	0,000	0,000	0,000
10,19	16	0,000	0,000	0,000
10,79	17	0,000	0,000	0,000
11,39	18	0,427	4,26	2954
11,99	19	0,609	6,45	4465
12,59	20	0,696	7,78	5394
13,19	21	0,727	8,57	5939
13,79	22	0,762	9,44	6541
14,39	23	0,785	10,20	7065
14,99	24	0,814	11,07	7669
15,59	25	0,820	11,63	8060

I_{cp}	***PWM***	$Cos\varphi$	***Corrente attiva***	P_{attesa}
16,19	26	0,856	12,66	8769
16,79	27	0,871	13,40	9283
17,39	28	0,876	14,01	9706
17,99	29	0,883	14,64	10145
18,59	30	0,900	15,47	10716
19,19	31	0,910	16,19	11215
19,79	32	0,918	16,88	11696
20,39	33	0,915	17,37	12036
20,99	34	0,930	18,22	12623
21,59	35	0,930	18,78	13014
22,19	36	0,945	19,64	13606
22,79	37	0,946	20,23	14013
23,39	38	0,948	20,84	14435
23,99	39	0,953	21,53	14914
24,59	40	0,953	22,10	15311
25,19	41	0,959	22,81	15800
25,79	42	0,958	23,37	16192
26,39	43	0,964	24,09	16687
26,99	44	0,965	24,70	17111
27,59	45	0,958	25,09	17380
28,19	46	0,968	25,93	17967
28,79	47	0,971	26,58	18418
29,39	48	0,972	27,20	18842
29,99	49	0,978	27,96	19371
30,59	50	0,977	28,51	19754
31,19	51	0,976	29,08	20147
31,79	52	0,982	29,84	20674
32	53	0,979	29,96	20760

Tabella A.9: Tabella veicoloA

Bibliografia

[1] BALDASSARI CAVI, 2017. URL: http://www.baldassaricavi.it/repository/public/products/13/FG7R\%20-\%20FG7OR\%200,6_1\%20kV.pdf.

[2] Leonardo Ambrosi e Fabio Zanellini. «Sistemi per la gestione delle infrastrutture di connessione dei veicoli elettrici». In: *L'Energia Elettrica* (2010), pp. 39–45.

[3] Fabio Bandiera. «Le batterie e le infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici». Tesi di dott. Politecnico di Milano, 2013.

[4] H. Beltran et al. «Lithium ion batteries ageing analysis when used in a PV power plant». In: *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (2012). DOI: 10.1109/isie.2012.6237330.

[5] R.J. Bessa e M.A. Matos. «The role of an aggregator agent for EV in the electricity market». In: *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)* (2010). DOI: 10.1049/cp.2010.0866.

[6] Cludio Bossi et al. «Problematiche e ruolo della generazione distribuita nell'evoluzione del sistema elettrico». In: (2017). URL: https://www.researchgate.net/profile/R_Cicoria/publication/235632451_Ruolo_della_Generazione_Distribuita_nell'evoluzione_del_Sistema_Elettrico_Italiano/links/542162d70cf2ce3a91b71773/Ruolo-della-Generazione-Distribuita-nellevoluzione-del-Sistema-Elettrico-Italiano.

[7] Paola Bresenti e Alberto Cerretti. «SDNO: Smart Distribution Network Operation Project». In: *IEEE* (2007).

[8] Claudio Cantoni. «Il veicolo elettrico a supporto delle smart grid». Tesi di dott. Politecnico di Milano, 2012.

[9] *CEI EN 50470. Apparati per la misura dell'energia elettrica.* Norma CEI EN. 2007.

[10] *CEI EN 61000. Compatibilità elettromagnetica.* Norma CEI EN. 2016.

[11] *CEI EN 62196. Spine, prese fisse, connettori mobili e fissi per veicoli - Carica conduttiva dei veicoli elettrici.* Norma CEI EN. 2016.

[12] Kristien Clement, Edwin Haesen e Johan Driesen. «Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids». In: *2009 IEEE/-PES Power Systems Conference and Exposition* (2009). DOI: 10.1109/psce.2009.4839973.

[13] *Climate change 2013*. 2013. URL: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SPM_brochure_en.pdf.

[14] PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO. *DIRETTIVA 2014/94/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO sulla realizzazione di un'infrastruttura per i combustibili alternativi*. 2014, pp. 1–20.

[15] Maurizio Delfanti. *European energy policy*. 2016.

[16] Maurizio Delfanti. *Regulation-driven pilot projects : electro-mobilityRegulation-driven pilot projects : electro-mobility*. 2016.

[17] Maurizio Delfanti. *Regulation of electric power systems*. 2016.

[18] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. *Piano Nazionale Infrastrutturale per la Ricarica dei veicoli alimentati ad energia Elettrica*. 2016, pp. 1–47.

[19] Ministero dello Sviluppo Economico della Repubblica Italiana. *Strategia Energetica Nazionale: per un'energia più competitiva e sostenibile*. 2013, pp. 1–122.

[20] Alessandro Di Giorgio, Francesco Liberati e Silvia Canale. «Electric vehicles charging control in a smart grid: A model predictive control approach». In: *Control Engineering Practice* 22 (2014), pp. 147–162. DOI: 10.1016/j.conengprac.2013.10.005.

[21] *e.car*. Siemens Spa, 2016.

[22] *Effetto serra*. 2017. URL: http://www.treccani.it/enciclopedia/effetto-serra/.

[23] Franco Ferraris. *Misure elettriche*. 2015.

[24] Sara Filipponi. *Siemens for a smart mobility world*. 2017.

[25] Lingwen Gan, Ufuk Topcu e Steven H. Low. «Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging». In: *IEEE Transactions on Power Systems* 28.2 (2013), pp. 940–951. DOI: 10.1109/tpwrs.2012.2210288.

[26] Paolo Guglielmi. *Propulsione di veicoli elettrici e ibridi*. 2015.

[27] Chih-Chiang Hua e Meng-Yu Lin. «A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles». In: *ISIE'2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.00TH8543)* (). DOI: 10.1109/isie.2000.930500.

[28] *ICE 61851. Dispositivi di ricarica*. Norma ICE. 2016.

[29] Han Jinsoo, Choi Chang-Sic e Lee Ilwoo. «More efficient home energy management system based on ZigBee communication and infrared remote controls». In: *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 57.1 (2011), pp. 85–89. DOI: 10.1109/tce.2011.5735485.

[30] H Khayyam, H Ranjbarzadeh e V Marano. «Intelligent control of vehicle to grid power». In: *Power Sources* (2012).

[31] *Le reti di distribuzione dell'energia elettrica e la generazione distribuita*. 2016.

[32] Luca Lo Schiavo et al. «Changing the regulation for regulating the change». In: (2016).

[33] J.A.P. Lopes, P.M:R Almeida e A.M.M da Siva. «Smart charging strategies for electric vehicles: Enhancing grid performance and maximizing the use of variable renewable energy sources,"» in: (2009). URL: https://www.researchgate.net/profile/Joao_Abel_Lopes/publication/235721228_Smart_Charging_Strategies_for_Electric_Vehicles_Enhancing_Grid_Performance_and_Maximizing_the_Use_of_Variable_Renewable_Energy_Resources/links/00b7d52fa1434041a1000000/Smart-Charging-Strategies-for-Electric-Vehicles-Enhancing-Grid-Performance-and-Maximizing-the-Use-of-Variable-Renewable-Energy-Resources.pdf.

[34] Zhongjing Ma, Duncan S. Callaway e Ian A. Hiskens. «Decentralized Charging Control of Large Populations of Plug-in Electric Vehicles». In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 21.1 (2013), pp. 67–78. DOI: 10.1109/tcst.2011.2174059.

[35] A.S. Masoum et al. «Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation». In: *IET Generation, Transmission and Distribution* 5.8 (2011), p. 877. DOI: 10.1049/iet-gtd.2010.0574.

[36] Amir-Hamed Mohsenian-Rad et al. «Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid». In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 1.3 (2010). DOI: 10.1109/tsg.2010.2089069.

[37] Hung Khanh Nguyen e Ju Bin Song. «Optimal charging and discharging for multiple PHEVs with demand side management in vehicle-to-building». In: *Journal of Communications and Networks* 14.6 (2012), pp. 662–671. DOI: 10.1109/jcn.2012.00032.

[38] G. Pede et al. *Report su test di ricarica rapida di batterie a litio*. 2011.

[39] Laura Pimpinella. *Smart grids demonstration projects in Italy*. 2016.

[40] «power system level impacts of phevs 2009». In: *2009 42nd Hawaii International Conference on System Sciences* (2009). DOI: 10.1109/hicss.2009.345.

[41] Casey Quinn, Daniel Zimmerle e Thomas H. Bradley. «The effect of communication architecture on the availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services». In: *Journal of Power Sources* 195.5 (2010), pp. 1500–1509. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.08.075.

[42] Emma Raszmann et al. «Modeling stationary lithium-ion batteries for optimization and predictive control». In: *2017 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)* (2017). DOI: 10.1109/peci.2017.7935755.

[43] Shengnan Shao et al. «Impact of TOU rates on distribution load shapes in a smart grid with PHEV penetration». In: *IEEE PES T&D 2010* (2010). DOI: 10.1109/tdc.2010.5484336.

[44] Olle Sundstrom e Carl Binding. «Flexible Charging Optimization for Electric Vehicles Considering Distribution Grid Constraints». In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 3.1 (2012). DOI: 10.1109/tsg.2011.2168431.

[45] Vittorio Trecordi. *Smart grid comunication-itroduction*. 2016.

[46] Tiziano Valentinetti. *The recharging infrastructure to support the mobility development in Itlay optimizing the impact on the network*. 2011.

[47] Chenye Wu, Hamed Mohsenian-Rad e Jianwei Huang. «Vehicle to Aggregator Interaction Game». In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 3.1 (2012), pp. 434–442. DOI: 10.1109/tsg.2011.2166414.

[48] Low Wen Yao et al. «Modeling of lithium-ion battery using MATLAB/simulink». In: *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (2013). DOI: 10.1109/iecon.2013.6699393.

[49] Murat Yilmaz e Philip T. Krein. «Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles». In: *IEEE* (2017).

[50] Yanchong Zheng e Linni Jian. «Smart charging algorithm of electric vehicles considering dynamic charging priority». In: *2016 IEEE International Conference on Information and Automation* (2016). DOI: 10.1109/icinfa.2016.7831884.