

Parliamo di auto elettrica

Collana a cura della *Fondazione Filippo Caracciolo*

La collana *Αιοδος* nasce con l'obiettivo di offrire uno spazio conoscitivo e divulgativo ai lavori scientifici, realizzati da giovani laureati e ricercatori, di particolare pregio e interesse sui temi della mobilità di cose e persone, con riferimento alla sicurezza, all'accessibilità e alla tutela ambientale. In questo numero, *Parliamo di auto elettrica*, una raccolta di tre articoli sui temi dell'evoluzione tecnologica dell'auto elettrica.

Autori:

Giovanni Imberti, Regenerative Braking Effects on Pollutant Release and Zero Emissions Brakes Technologies;

Sara Salamone, Sistemi High Power Charging e soluzioni per l'integrazione nella rete;

Mauro Tarraran e Fabio Bignucolo, Analisi tecnico-economica dell'integrazione di strutture di ricarica per veicoli elettrici in reti di distribuzione.

Luglio 2023

© 2023 Fondazione Filippo Caracciolo

ISBN 9788832245158

*“Non il possesso della conoscenza, della verità irrefutabile, fa l'uomo di scienza,
ma la ricerca critica, persistente e inquieta, della verità”
(Karl Popper)*

INDICE

Presentazione	5	
Regenerative Braking Effects on Pollutant Release and Zero Emissions Brakes Technologies	7	
Autore: <i>Giovanni Imberti</i>		
1	L'impatto delle emissioni frenanti sulle emissioni globali di un veicolo	7
2	L'effetto della frenata rigenerativa sulle emissioni secondarie	8
2.1	Modello di frenata rigenerativa	9
2.1.1	Modello energetico di frenata per il veicolo elettrico	9
2.1.2	Modello abrasivo	10
2.1.3	Test in pista	11
2.2	Risultati	12
2.2.1	Validazione sperimentale	12
2.2.2	Frenata limite	13
2.2.3	Rilascio del pedale dell'acceleratore	14
2.2.4	Ciclo WLTP	14
2.3	Layout rigenerativo ottimale	15
3	Sviluppo di un sistema frenante innovativo a zero emissioni	16
3.1	Alternative a zero emissioni	16
3.1.1	Freni a isteresi	16
3.1.2	Freni a correnti parassite	17
3.1.3	Freni magneto-reologici	18
3.2	Sistema di guida a zero emissioni	18
Conclusioni		23
Bibliografia		24
Sistemi High Power Charging e soluzioni per l'integrazione nella rete	25	
Autore: <i>Sara Salamone</i>		
Introduzione		25
1	I vantaggi dei sistemi HPC integrati con accumulo stazionario	26
2	Stato dell'arte	26
3	Integrazione nella rete e architetture	27
4	Modellazione di un sistema HPC connesso alla rete in bassa tensione	29
4.1	Caso d'uso: ricarica pubblica	32
4.2	Analisi economica	34
5	La stazione HPC sperimentale di RSE	37
5.1	Definizione dell'architettura per la stazione di ricarica	37
5.2	Definizione dei requisiti per gli elementi del sistema	38
Conclusioni		41
Bibliografia		43
Analisi tecnico-economica dell'integrazione di strutture di ricarica per veicoli elettrici in reti di distribuzione	45	
Autori: <i>Mauro Tarraran e Fabio Bignucolo</i>		
1	Mobilità elettrica	45
2	Analisi economica V2G	46
2.1	Ricarica semplice	46

2.2	Ricarica intelligente	46
2.3	Ricarica intelligente con V2G	47
3	Problema di ottimizzazione	47
3.1	Caricatori e veicoli elettrici	51
4	Simulazioni	52
4.1	Confronto risultati configurazioni con minimizzazione costo globale	53
4.2	Confronto tra configurazione magliata e radiale	54
4.2.1	Configurazione magliata	55
4.2.2	Configurazione radiale con auto connesse a sinistra	56
4.2.3	Confronto tra le due configurazioni	56
4.3	Variazione della curva di prezzo dell'energia	57
4.3.1	Confronto variazione della curva di prezzo dell'energia	58
4.4	Variazione del termine Incentivo	59
4.4.1	Confronto del costo utente di ricarica del veicolo 1 al variare di Incentivo	61
	Conclusioni	63
	Bibliografia	64
	Glossario	65

Presentazione

L'Automobile vive una fase cruciale del suo sviluppo. I processi di elettrificazione e di automazione restituiscono i risultati di decenni di ricerca. Gli importanti traguardi raggiunti nel percorso di riduzione delle emissioni o nella sfida tesa a rendere i veicoli sempre più sicuri e confortevoli sono il frutto di un lungo e complesso lavoro svolto da ingegneri, tecnici e ricercatori che hanno dato il loro contributo nelle fabbriche, nelle università, nei laboratori di studio e sperimentazione.

Un lavoro che richiede anni di investimento e, prima ancora, il sostegno per la formazione delle nuove leve da indirizzare, incoraggiare e seguire nel percorso di studio e professionale.

Nella prospettiva di offrire uno spazio conoscitivo e divulgativo ai lavori scientifici di particolare pregio e interesse, realizzati da giovani laureati e ricercatori sui temi della mobilità sostenibile, nella sua accezione più ampia, sicura, accessibile ed ecocompatibile, nasce la collana *Αιοδος (la strada della ricerca)*, di cui la presente raccolta di articoli scientifici rappresenta il primo numero, promossa dall'Automobile Club Roma e curata dalla Fondazione Filippo Caracciolo.

Questo primo numero, intitolato *Parliamo di auto elettrica*, presenta tre articoli che affrontano, sotto prospettive diverse, soluzioni per ottimizzare l'utilizzo dell'auto elettrica, riducendo le emissioni o favorendo la sua integrazione con il sistema elettrico.

Il primo lavoro prende in considerazione l'impatto emissivo dei sistemi frenanti, con un focus sulle auto elettriche. Se, infatti, da un lato, il peso dell'auto elettrica può peggiorare in via teorica le emissioni per l'usura dei componenti e la generazione di pulviscolo di pastiglie e freno, per altro verso il sistema di frenata rigenerativa, escludendo in tutto o in parte i sistemi di bloccaggio meccanici, può operare in direzione opposta.

Il secondo lavoro analizza i vantaggi di sistemi di ricarica integrati con soluzioni di accumulo. Lo studio mette in risalto i benefici legati alla migliore gestione dell'approvvigionamento energetico in presenza di ricariche ad alta potenza, anche in relazione alle potenzialità di valorizzazione delle fonti di energia rinnovabile stoccabili in fase di sovrapproduzione.

Il terzo lavoro prende in considerazione i vantaggi derivanti dal possibile contributo energetico, in chiave V2G, dei veicoli elettrici. La ricerca valorizza il tempo di inutilizzo dei veicoli, che in media rimangono in sosta per oltre il 95% del tempo. Nel contempo, mette in risalto l'opportunità che mezzi geneticamente concepiti per assorbire energia possano invece offrirla alla rete nelle fasi di maggiore domanda, non solo evitando di gravare, ma concorrendo alla stabilizzazione del sistema elettrico e alla riduzione del rischio di sovraccarico.

In sintesi estrema, tre approfondimenti che ci indicano come la strada per la decarbonizzazione passi anche per un lavoro di limature e di soluzioni a contorno, adottate nella comune direzione dell'efficientamento e del progresso tecnologico. Tre articoli che al tempo stesso ci ricordano la centralità della ricerca teorica e applicata, come volano della conoscenza e parametro per l'adozione di soluzioni ecorazionali.

Giuseppina Fusco

Presidente Auomobile Club Roma
Presidente Fondazione Filippo Caracciolo

Regenerative Braking Effects on Pollutant Release and Zero Emissions Brakes Technologies

Autore: *Giovanni Imberti*

1 L'impatto delle emissioni frenanti sulle emissioni globali di un veicolo

La più grande sfida del ventunesimo secolo per il mondo dell'automobile è dettata dal ridurre l'impatto ambientale dei veicoli durante l'intero ciclo vita. Questo obiettivo può essere raggiunto con diverse tecnologie atte alla riduzione delle emissioni, quali *powertrain* elettrici o combustibili alternativi.

Al fine di perseguire questo obiettivo sotto la lente di ingrandimento sono finiti inquinanti come CO_x , NO_x e i pulviscoli emessi dal motore a combustione. In particolare, questi ultimi vengono comunemente definiti particolati e categorizzati sulla base della loro dimensione, come PM_{10} (con diametro aerodinamico inferiore a $10\mu\text{m}$), $\text{PM}_{2.5}$ (con diametro aerodinamico inferiore a $2.5\mu\text{m}$), o PM_1 (con diametro aerodinamico inferiore a $1\mu\text{m}$). Queste emissioni sono principalmente attribuite alle fasi di combustione e, negli ultimi venti anni, i motori a combustione interna hanno subito stringenti regolamentazioni per la riduzione del particolato emesso a causa degli effetti che quest'ultimo comporta sulla salute umana [1]. In particolare, attraverso le normative Euro-, emesse dagli organi di regolamentazione europea, le emissioni di particolato provenienti dai motori a combustione [2] si sono ridotte di due ordini di grandezza, come riportato in Figura 1.1.

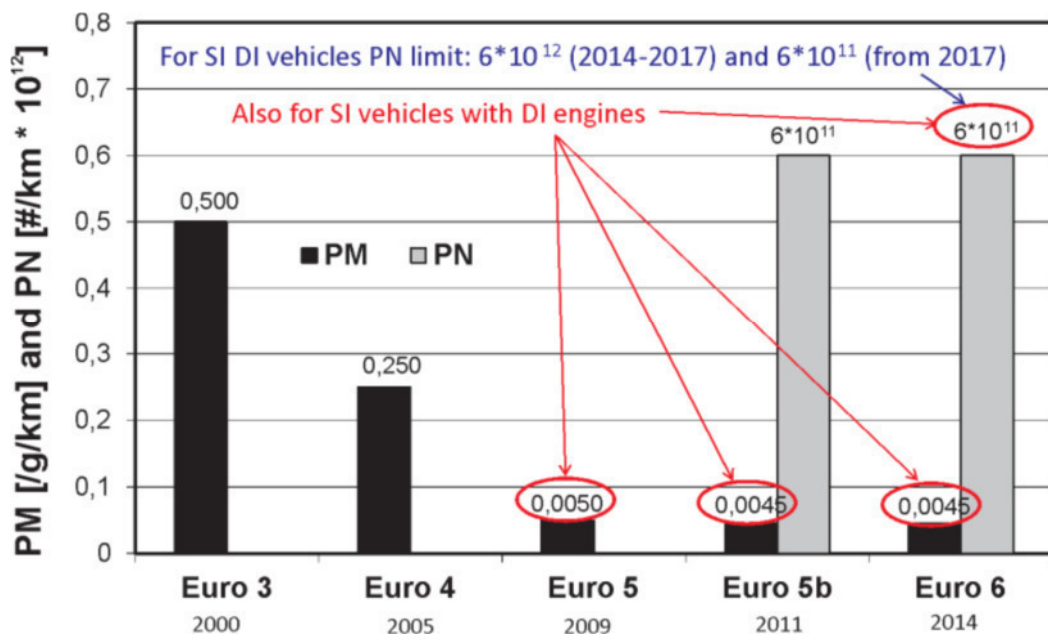


Figura 1.1 Limitazioni di Particolato nel corso degli anni per motori a combustione [2]

La decarbonizzazione di un veicolo, d'altro canto, prevede la riduzione al minimo degli inquinanti emessi da ogni componente durante la vita operativa del veicolo, senza limitarsi alle emissioni provenienti dal motore a combustione interna. Infatti, ogni componente le cui

operazioni prevedono una frizione genera del pulviscolo inquinante. Tra i sottosistemi maggiormente inquinanti si evidenziano:

- emissioni di pastiglie e dischi freno;
- pulviscolo dagli pneumatici;
- polveri dalla superficie di contatto tra pneumatico e asfalto;

Sebbene verificare quale delle tre fonti principali sia più emissiva tramite un unico test non sia attualmente possibile con gli strumenti a disposizione, diverse strategie sono state prese in considerazione per verificare quale in un tradizionale ciclo di guida sia predominante [3]. Tutti gli studi e i processi analizzati portano a un'unica risposta: i freni. Infatti, essi risultano i più emissivi sia in termini di particolato emesso, che di sub-componenti di matrice carbonica (CO_x) che di tossici nitrati (NO_x) [4].

Sebbene i sistemi frenanti non siano attivi durante l'intero ciclo operativo, diversi studi hanno sottolineato quanto l'impatto dei PM emessi dai sistemi frenanti sia di circa il 30% di quelli prodotti dall'intero veicolo, vista la forte riduzione imposta dalla normativa degli ultimi decenni [5].

Risulta così fondamentale un'azione atta a mitigare le emissioni provenienti dai sistemi frenanti, aspetto anche sottolineato e fortemente evidenziato dall'unione europea, che con la proposta Euro-7 introduce per la prima volta delle limitazioni riguardanti i cosiddetti non-exhaust pollutant [6]:

“Non-exhaust emissions consist of particles emitted by tires and brakes of vehicles. Emissions from tires is estimated to be the largest source of microplastics to the environment. As shown in the Impact Assessment, it is expected that by 2050 non-exhaust emissions will constitute up to 90% of all particles emitted by road transport”.

Diviene così fondamentale analizzare e valutare tutte le possibili alternative offerte dal mercato per la mitigazione o l'annullamento delle emissioni provenienti dai freni, partendo da uno dei sistemi con maggiore potenzialità nella trazione elettrica: la frenata rigenerativa.

2 L'effetto della frenata rigenerativa sulle emissioni secondarie

L'avvento dei veicoli a propulsione elettrica ha comportato parziali riprogettazioni e nuovi modi di immaginare le automobili.

Tra le più peculiari caratteristiche del motore elettrico, per esempio, è annoverata la frenata rigenerativa (RB), capacità del propulsore di fungere da generatore durante le fasi dove esso non fornisce trazione, recuperando parte della energia cinetica che andrebbe altrimenti dissipata sotto forma di calore dai sistemi di frenata a frizione. La frenata rigenerativa permette così di assicurare una maggiore efficienza globale del veicolo nella gestione energetica e, al contempo, ampliare il *range* che il veicolo può raggiungere a parità di dimensione della batteria. Il recupero energetico permette inoltre di ridurre la necessità di coppia frenante richiesta ai freni a disco, andando a limitare conseguentemente le emissioni secondarie prodotte. La seguente analisi vuole valutare l'efficacia della RB nella minimizzazione delle emissioni da non combustione e il *layout* ottimale per un veicolo elettrico nel massimizzare gli effetti benefici della RB stessa, ottimizzando contemporaneamente l'efficienza globale del veicolo.

Per raggiungere questo *target* è stato sviluppato un modello veicolo atto a valutare la dinamica longitudinale dello stesso e, in particolare le manovre di frenata, con conseguente stima delle emissioni di polveri da parte dei dischi freno e delle pastiglie freno.

2.1 Modello di frenata rigenerativa

Il modello sviluppato permette di analizzare la dinamica longitudinale di un veicolo partendo da parametri di base dello stesso, andando a modellare il suo comportamento, partendo dalla velocità fino ad ottenere i valori di pressione del pistone del freno e pulviscolo emesso da pastiglie e disco. Per fare un confronto sono stati sviluppati due modelli paralleli, in grado di valutare lo stesso veicolo, sia in condizioni di RB attiva che in condizioni di rigenerazione nulla. Per ottenere un modello realistico sono stati sviluppati i seguenti modelli:

- modello energetico di frenata per veicolo elettrico;
- modello abrasivo per le pastiglie e dischi freno;
- modello termico del blocco freno.

Il modello è stato poi validato attraverso una serie di test in pista atti a validare le *performance* reali del veicolo e permettere analisi di emissioni su manovre e cicli di guida difficilmente replicabili durante test reali.

2.1.1 Modello energetico di frenata per il veicolo elettrico

Partendo da segnali di velocità e accelerazione, è stato possibile calcolare la coppia massima richiesta per ottenere la *performance* richiesta dall'input.

Per farlo è stato necessario valutare l'intera forza frenante necessaria per rallentare il veicolo una volta sottratte le forze resistenti presenti, quali resistenza al rollio o resistenze aerodinamiche. Il valore di forza ottenuto per l'intero veicolo andrà così ripartito tra assale anteriore e posteriore, considerando la valvola di ripartizione di frenata standard di veicoli commerciali. Dalla forza agente su ogni assale sarà così possibile ottenere la pressione sulla pinza freno necessaria per ottenere la manovra richiesta da input.

Una volta ottenuto un modello di frenata standard per ogni veicolo sarà necessario valutare gli effetti della RB nella riduzione della pressione precedentemente ricavata; di conseguenza è fondamentale comprendere quale sia il comportamento del motore elettrico in fase di rigenerazione.

La maggior parte dei motori elettrici sono in grado di raggiungere lo stesso picco di *performance* e, in generale, la stessa curva di coppia e potenza, riportate in Figura 1.2, sia in trazione che in rigenerazione. Questo significa che, potenzialmente, il motore sarebbe autonomamente in grado di raggiungere le stesse *performance* sia in accelerazione che in frenata. Purtroppo, però, le potenzialità rigenerative vengono fortemente ridotte da tre fattori:

- **La batteria.** Per motivi di mantenimento termico si preferisce limitare parzialmente le correnti generate attraverso RB (*Regenerative Braking*) inviate al modulo di accumulo energetico e, inoltre, a seconda dello stato di carica della stessa è possibile notare una riduzione della capacità rigenerativa.
- **L'inverter.** Esso è progettato per massimizzare le proprie *performance* nell'invio di corrente al motore, ottenendo così fasi di trazione efficienti, andando però a limitare la trasmissione energetica opposta diretta alla batteria.
- **Il sistema di controllo del veicolo.** I produttori preferiscono, per ottenere una esperienza di guida simile a quella ottenuta con i motori endotermici, limitare le capacità rigenerative dei veicoli.

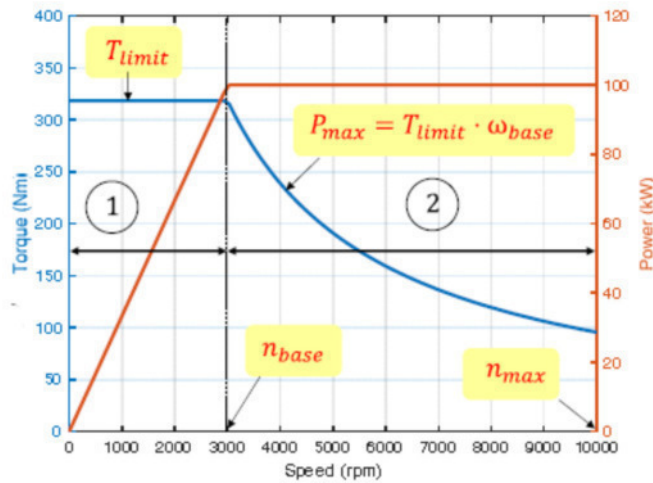


Figura 1.2 Curve di coppia e potenza di un motore elettrico

La coppia generata in fase rigenerativa sarà quindi proporzionale alla curva mostrata in Figura 1.2, scalando, però, i valori rispetto a tutte le riduzioni di *performance* precedentemente descritte. Vista l'impossibilità di valutare esclusivamente in modo analitico le inefficienze della *driveline* in fase rigenerativa, si è scelto di valutare un coefficiente dal valore compreso tra 0 e 1 che consideri dopo la fase sperimentale il valore rigenerato durante le decelerazioni. Il coefficiente verrà poi moltiplicato ai valori forniti dal motore elettrico al 100% della sua efficienza, in modo da ridurne la capacità totale. Verrà poi ricavata conseguentemente dalla coppia del motore una forza rigenerativa da sottrarre alla forza frenante richiesta in modo tale da assicurare la frenata del veicolo e, contemporaneamente, valutare la riduzione dello sforzo sulle pastiglie e sui dischi freno.

2.1.2 Modello abrasivo

La valutazione delle emissioni frenanti è una analisi complessa e richiede test estremamente specifici. Conseguentemente, modellare le emissioni è altrettanto complesso visti i molteplici parametri che entrano in gioco. Fondamentale è quindi valutare i parametri principali che hanno gli effetti maggiori nella emissione di particolato da dischi e pastiglie.

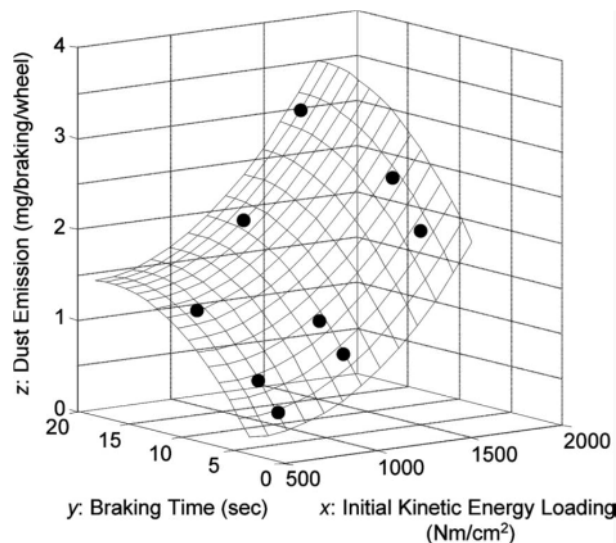


Figura 1.3 Tabella per la valutazione delle emissioni generate dai freni [7]

Si è deciso di selezionare perciò un modello abrasivo sviluppato da Ijima [7] in grado di tenere in conto diversi parametri, quali: tempo di frenata, energia dissipata, pressione applicata e

carico iniziale alla frenata. Il modello, precedentemente sviluppato, assicura una buona approssimazione delle emissioni prodotte, sebbene non valuti un aspetto fondamentale e critico relativo alla temperatura della pastiglia, che può variare i risultati parzialmente, una volta superati i 250°C.

Il modello valuta contemporaneamente le polveri generate dall'interazione tra pastiglia e disco ed è stato validato attraverso una serie di test sperimentali su diverse miscele di materiale per la produzione di pastiglie.

2.1.3 Test in pista

I test in pista sono stati effettuati per valutare delle manovre di frenata di un veicolo elettrico e comprendere la logica di controllo e ripartizione della frenata rigenerativa. Contemporaneamente i risultati ottenuti sono stati necessari per la validazione del modello e la valutazione del coefficiente empirico di efficienza rigenerativa descritto nel paragrafo 2.1.1.

I dati acquisiti e necessari sono:

- velocità;
- accelerazioni;
- corrente da/al motore;
- pressione di frenata.

I primi due segnali, ricavati dalla centralina del veicolo e comparati con ulteriori sensori applicati al veicolo, sono stati utilizzati come input del modello, in modo da avere simulazioni il più realistiche possibile. La corrente del motore è stata utilizzata come parametro di confronto con i dati del modello. Infatti, esso dipende da quanto sia o meno efficiente la rigenerazione. Il rapporto tra il valore sperimentale e il valore ideale in ogni istante ha permesso di valutare il coefficiente di rigenerazione del mezzo.

La pressione in frenata è stata valutata e confrontata con il valore ottenuto tramite il modello per una ulteriore validazione prima del calcolo delle emissioni di particolato.

È stato quindi stilato un piano prove, riportato in Tabella 1.1, che andasse a valutare diverse condizioni di guida.

Tabella 1.1 Piano Prove per Test Sperimentali

<i>Throttle Release</i>	<i>Low Pressure Brake</i>	<i>Mid Pressure Brake</i>	<i>Limit Brake</i>
Initial velocity 40 km/h and 60 km/h	Initial velocity 40 km/h and 60 km/h	Initial velocity 40 km/h and 60 km/h	Velocity 120 km/h
No pressure applied to the brake pedal	Low pressure applied to the brake pedal (0.4g)	Medium pressure applied to the brake pedal (0.6g)	Maximum pressure to the brake pedal
Throttle release when target speed is stable	Throttle release just before braking	Throttle release just before braking	Straight line trajectory until vehicle stops
Straight line trajectory until track ends	Straight line trajectory until vehicle-stop	Straight line trajectory until vehicle-stop	Avoiding the ABS & no pressure control

Si può notare come vengano considerati diversi stati di frenata attraverso cui è possibile valutare la massima capacità rigenerativa del mezzo e anche la massima capacità frenante dello stesso. Le prove sono inoltre state svolte a diversi stati di carica (*State of Charge* – SoC) della batteria, in modo da comprendere meglio il fenomeno della perdita di efficienza rigenerativa al variare della SoC stessa.

2.2 Risultati

In questa sezione si vedrà come, dopo aver validato il modello descritto nel paragrafo 2, sia possibile valutare gli effetti di riduzione delle emissioni secondarie in diverse manovre di frenata e, in conclusione, come questi fenomeni hanno un impatto su cicli guida normati come, in particolare, il ciclo WLTP, prova atta a determinare i consumi e le emissioni degli autoveicoli.

2.2.1 Validazione sperimentale

La validazione sperimentale è stata effettuata sulla manovra definita in Tabella 1 come *Mid-Pressure Braking Manoeuvre* in modo tale da verificare l'effetto della frenata rigenerativa rispetto alla frenata richiesta al freno a disco.

La validazione del modello è stata effettuata andando a modulare il coefficiente rigenerativo del modello, comprensivo di tutte le perdite in fase di recupero energetico del sistema di trazione elettrico. Il risultato ottenuto dalla validazione considera un coefficiente pari a 0,4. Significa quindi che il veicolo è in grado di recuperare il 40% della totale coppia massima generabile dal motore elettrico.

Per effettuare la validazione è stato preso in considerazione il valore di corrente recuperata dal motore elettrico e, successivamente, valutato l'effetto che la stessa ha nella pressione da applicare al pistone della pinza freno.

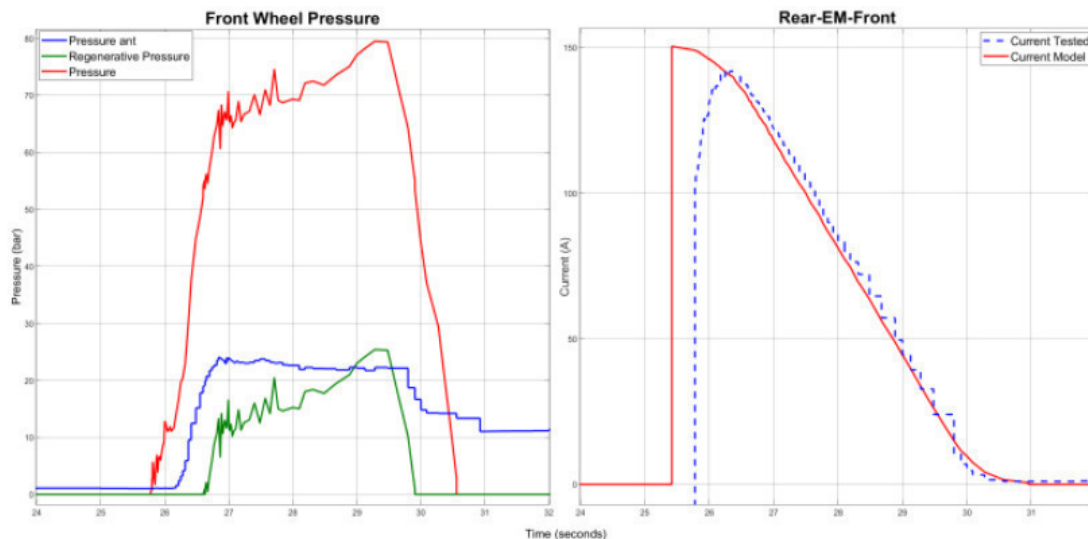


Figura 1.4 Validazione del Modello: Pressione della pinza freno - Correlazione correnti motore elettrico

Come è possibile vedere in Figura 1.4, la curva sperimentale di corrente – di colore blu – coincide con la curva calcolata tramite il modello. Il risultato di questa correlazione porta a una correlazione tra la curva sperimentale di pressione e la curva calcolata per la stessa variabile. È quindi possibile affermare che il modello sia validato. Risulta inoltre interessante sottolineare, guardando la curva di sinistra di Figura 1.4, come la pressione del caso con frenata rigenerativa assente – colore rosso – sia di circa tre volte superiore al caso rigenerativo; è quindi possibile, sin d'ora, considerare quanto il recupero di energia cinetica non solo permetta una maggiore efficienza energetica del veicolo, ma sia anche in grado di ridurre i carichi frenanti su pastiglie e dischi, riducendo così le emissioni di particolato degli stessi.

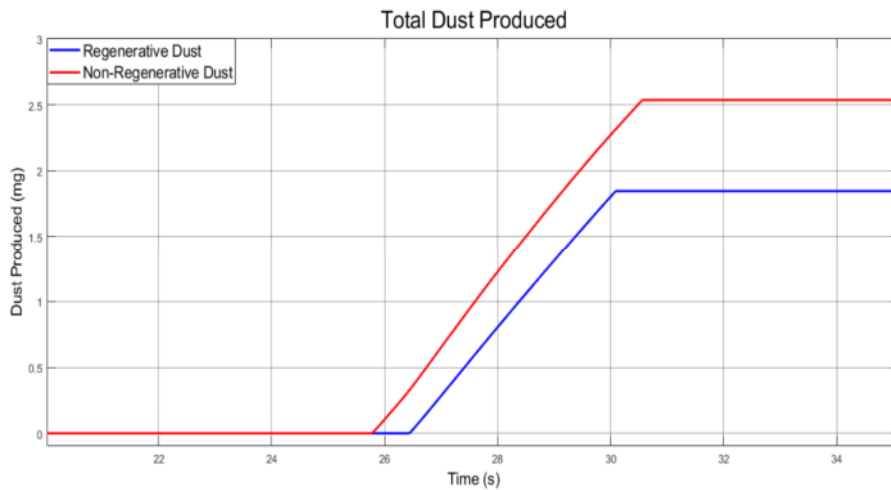


Figura 1.5 Emissioni di polveri calcolate per il caso: *Mid-Pressure Manoeuvre*

In Figura 1.5 è possibile osservare come, utilizzando il modello abrasivo, il caso rigenerativo – curva blu – riduca le emissioni di circa il 30% rispetto al caso in cui la rigenerazione è disattivata. Questo valore è significativo in quanto una decelerazione *Mid-Pressure* rappresenta una decelerazione di 0.6g, comprendendo la maggior parte delle frenate fatte durante una decelerazione standard.

2.2.2 Frenata limite

Le frenate limite prese in considerazione rappresentano una decelerazione di 0.9g. Questo tipo di manovre rappresentano frenate di emergenza. Non estremamente diffuse durante la guida standard, rappresentano un interessante parametro per capire quanto efficacemente la frenata rigenerativa possa non solo supportare la frenata tradizionale, ma anche limitare le emissioni di particolato durante queste manovre critiche.

Come è possibile dedurre dal grafico in Figura 1.6, la pressione applicata nel caso rigenerativo è leggermente minore a quella del caso non rigenerativo. Inoltre, in questo caso, la durata dell'applicazione della pressione sulla pastiglia è uguale per entrambe le strategie di frenata. Conseguentemente le emissioni ritrovano una riduzione della frenata di solo il 15%.

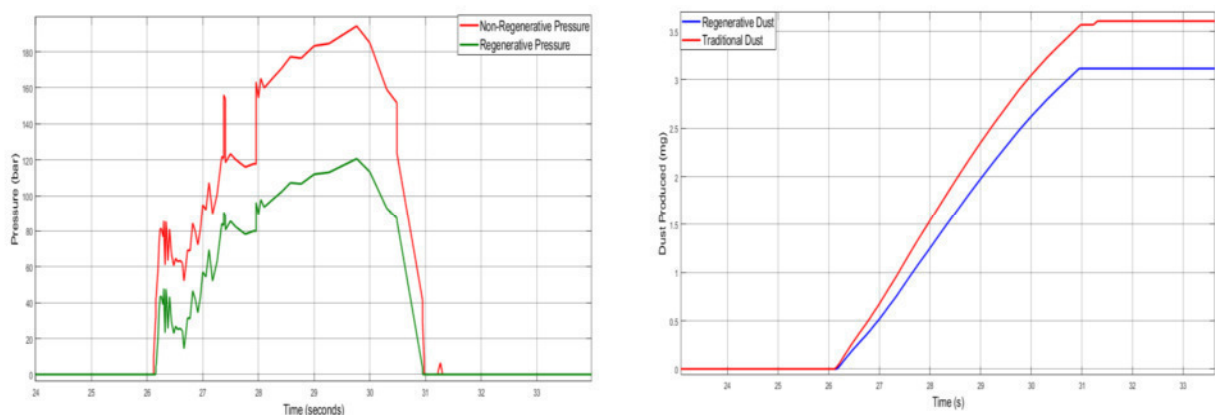


Figura 1.6 Frenata limite: andamento delle pressioni alla pinza freno ed emissioni di polveri nel caso rigenerativo e non rigenerativo

Comprensibilmente, la frenata limite pone sotto forte stress il sistema frenante, portando ad alti consumi della pastiglia. Inoltre, è evidente che questo tipo di manovra sarebbe difficilmente raggiungibile esclusivamente dalla frenata rigenerativa, anche se essa fosse fortemente più efficace.

2.2.3 Rilascio del pedale dell'acceleratore

La manovra definita in Tabella 1 come *throttle release* rappresenta l'operazione del *driver* di rilasciare il pedale dell'acceleratore senza premere sul pedale del freno. Questo tipo di manovra comporta nelle macchine a combustione interna una leggera decelerazione causata dalle inerzie del veicolo e dalle rispettive forze resistenti. Al contrario, per i veicoli elettrici alle forze resistenti si aggiunge la decelerazione rigenerativa, con conseguente recupero dell'energia cinetica. Questo tipo di manovra permette di valutare la massima decelerazione possibile per il veicolo elettrico esclusivamente tramite RB, valore importante per capire quanto efficacemente il veicolo riesca a compiere decelerazioni crescenti.

Durante questa manovra è possibile verificare come il veicolo analizzato sia in grado di decelerare a 0.4g autonomamente, senza l'ausilio dei freni meccanici. Durante queste manovre è importante sottolineare come non ci siano emissioni da parte del sistema frenante in quanto non vengono applicati carichi al freno meccanico.

Il risultato di 0.4g assicura di poter completare una consistente quantità di manovre che il veicolo compie durante tutti i suoi cicli guida. Il valore, però resta significativamente ridotto considerando frenate limite pari a 0.9g di decelerazione.

2.2.4 Ciclo WLTP

Le valutazioni emissive, però, devono non solo considerare una singola manovra, ma valutare in modo più significativo le prestazioni di un veicolo attraverso un ciclo guida che sia rappresentativo di un percorso guidato caratteristico. Per questo motivo è necessario verificare come le emissioni dei freni si riducano grazie alla frenata rigenerativa durante il ciclo WLTP, ciclo guida pensato per essere rappresentativo dei principali percorsi di guida, valutando una sessione di guida sia urbana che extraurbana che ad alta velocità. Il ciclo è utilizzato per l'omologazione dei veicoli e la valutazione delle emissioni del motore a combustione interna per i veicoli endotermici e la valutazione della distanza raggiunta con una ricarica per i veicoli elettrici.

Per questo motivo il ciclo WLTP è particolarmente significativo nel valutare la variazione delle emissioni dei sistemi frenanti.

I risultati ottenuti sono fortemente caratterizzati, però, dalle poco stressanti decelerazioni a cui i veicoli sono sottoposti durante il ciclo WLTP, che mai raggiungono una decelerazione maggiore di 0.4g, valore relativamente ridotto, che comporta conseguentemente un relativo realismo delle performance in frenata del veicolo.

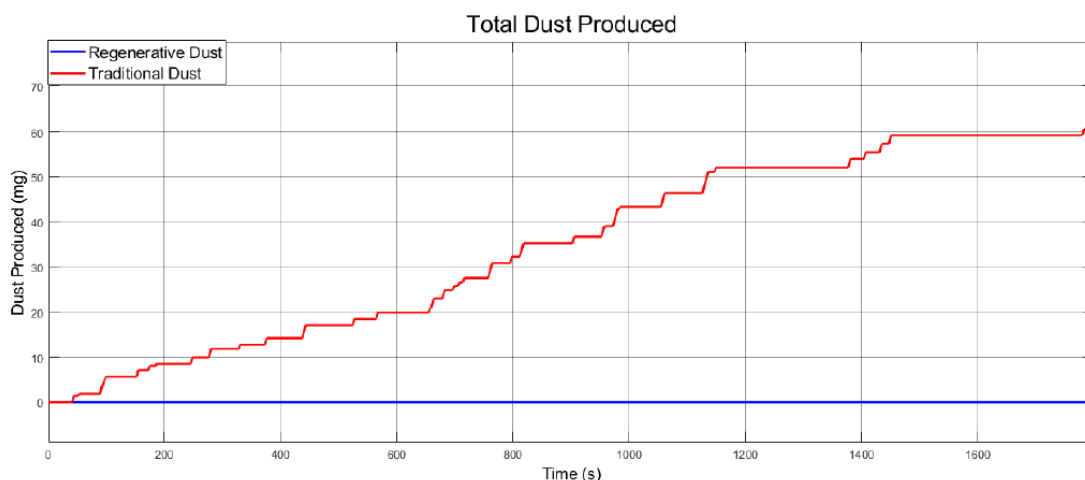


Figura 1.7 Emissioni di particolato durante il ciclo di WLTP - Confronto con rigenerazione attivata vs disattivata

Infatti, come è possibile vedere dalla Figura 1.7, gli effetti della frenata rigenerativa assicurano di azzerare le emissioni dal sistema frenante durante il ciclo WLTP, in quanto il veicolo testato è in grado di completare tutte le decelerazioni inferiori a 0.4g esclusivamente con la frenata rigenerativa.

Per quanto le frenate di tale intensità siano presenti e rappresentino una buona percentuale della totalità delle decelerazioni a cui un veicolo è sottoposto, non rappresentano per intero quelle necessarie per rappresentare un ciclo misto. Questo significa che il ciclo WLTP non riesce ad essere tanto rappresentativo in decelerazione quanto lo è per le fasi di accelerazione. Per questo motivo è necessario in futuro considerare alternative che valutino gli effetti della frenata per giudicare le emissioni globali del veicolo in modo più veritiero. Per questo motivo, alternative come il già presentato ciclo WLTP-Brake, sono da tenere in considerazione.

In ogni caso questa analisi permette di vedere quanto l'efficacia della frenata rigenerativa sia altamente significativa su un ciclo guida che genererebbe, nel caso non rigenerativo, un cospicuo quantitativo di polveri da ogni singolo veicolo.

2.3 Layout rigenerativo ottimale

Come si è potuto verificare dalla analisi dei risultati ottenuti dal modello validato, gli effetti della frenata rigenerativa sono significativi nella riduzione delle emissioni secondarie provenienti dai sistemi frenanti, ma la forte limitazione non permette di assicurare un ampio range di decelerazioni esclusivamente rigenerative. Un'altra limitazione nelle *performance* della frenata rigenerativa è stata analizzata durante i test. Infatti, la RB è fortemente limitata quando la batteria è ai suoi massimi stati di carica. Non essendo disponibile sufficiente spazio per l'accumulo energetico nel pacco batteria l'energia cinetica non sarà così recuperata dal motore elettrico.

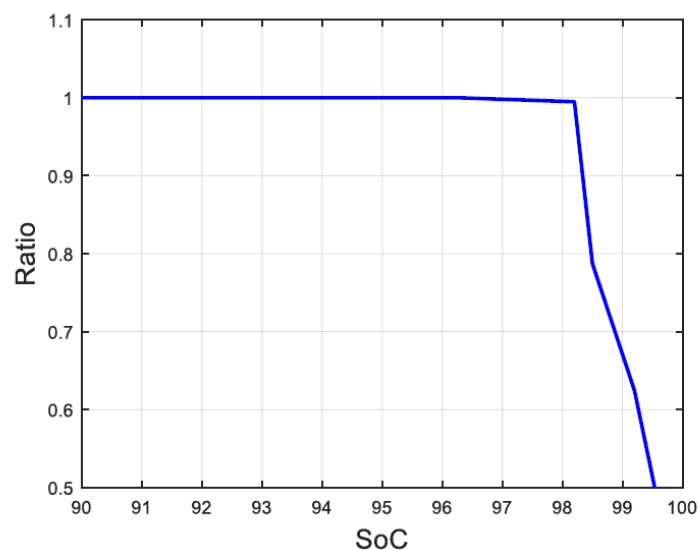


Figura 1.8 Riduzione dell'efficienza rigenerativa in funzione dello stato di carica della batteria

Il diagramma in Figura 1.8 mostra come, calcolando il rapporto tra la corrente rigenerata ai più alti stati di carica rispetto a un caso considerato di riferimento e con una SoC pari al 60%, la frenata rigenerativa dimezza quasi la sua efficienza, iniziando a decrescere per il veicolo testato intorno al 98%.

Per questo motivo è infatti impossibile assicurare che la frenata rigenerativa possa effettuare tutte le decelerazioni richieste in ogni condizione di guida in modo ripetitivo, ma resta fondamentale sviluppare un *layout* rigenerativo che quantomeno assicuri delle decelerazioni di

almeno 0.6g autonomamente, in modo da annullare le emissioni della maggior parte delle manovre frenanti.

Per fare ciò è stato pensato un *layout* composto da quattro motori *in-wheel*, uno per ciascuna ruota. Essi infatti assicurano, eliminando la trasmissione, una maggiore coppia frenante proveniente dal motore. Allo stesso tempo, comporre questo tipo di *layout* assicura di avere una pari coppia su ogni ruota, innalzando maggiormente il livello di decelerazione massima raggiunta dal sistema rigenerativo. Il modello permette di prevedere una decelerazione con questo schema superiore al target di 0.6g.

Purtroppo, come accennato, questo livello di frenata non è sufficiente a sopperire a tutte le frenate possibili e la frenata rigenerativa, conseguentemente, non può autonomamente garantire la sicurezza del veicolo in ogni condizione. Quindi, è fondamentale trovare un sistema parallelo che, nel caso in cui la RB non sia sufficiente, fermi il veicolo in modo totalmente pulito.

3 Sviluppo di un sistema frenante innovativo a zero emissioni

Una volta comprese le grandi qualità, ma anche i limiti della frenata rigenerativa si ritiene fondamentale lo sviluppo di un sistema frenante di supporto che sopperisca ai limiti della frenata rigenerativa. Per la sicurezza degli occupanti del veicolo risulta fondamentale che il veicolo sia sempre in grado di soddisfare le richieste frenanti del pilota in ogni condizione. Immaginando di avere un comportamento ideale e un ottimale controllo della rigenerazione, la RB non è in grado di assicurare una ripetibilità sufficiente per gli standard di sicurezza richiesti. Il sistema di supporto, in un'ottica di riduzione delle emissioni deve forzatamente essere ideato a zero emissioni, con l'idea di ottenere un sistema di guida che sia a zero emissioni sia in trazione che in frenata, ipotizzando l'accoppiamento con il motore elettrico *in-wheel* descritto nel paragrafo 2.3. Inoltre, considerando gli standard di sicurezza richiesti per le applicazioni *automotive*, il sistema frenante non solo deve essere in grado di sopperire alla differenza tra la coppia frenante massima richiesta a un veicolo e la massima disponibile tramite RB, ma anche essere in grado autonomamente di fornire esso stesso la coppia frenante massima e fermare autonomamente il veicolo anche considerando malfunzionamenti o limiti della rigenerazione.

3.1 Alternative a zero emissioni

Risulta quindi fondamentale valutare diverse opzioni di freni a zero emissioni applicati in altri ambiti, con l'obiettivo di valutare il più adattabile all'applicazione *automotive*, partendo da una ricerca dello stato dell'arte.

Le principali possibili alternative frenanti a zero emissioni sono:

- freni a isteresi;
- freni a correnti parassite;
- freni magneto-reologici.

3.1.1 Freni a isteresi

Questa tecnologia, attualmente applicata per la costituzione di frizioni, utilizza magneti permanenti che producono una coppia elettromagnetica. Non ci sono componenti che strisciano sugli altri, assicurando che la tecnologia non produca particolato, basterà un campo magnetico applicato in una sezione d'aria. Una bobina, venendo elettrificata, genera un campo elettromagnetico che, interagendo con i magneti permanenti, produce una forza elettromagnetica in grado di fermare i componenti rotanti presenti nel sistema. Il sistema è controllabile attraverso la modulazione del flusso elettrico applicato alle bobine ed è proporzionale alla coppia frenante finale applicata [8].



Figura 1.9 Freno a isteresi

Il componente, mostrato in Figura 1.9, per quanto sia a zero emissioni ha un basso rapporto tra geometria e coppia frenante generata, rappresentando una criticità estrema per l'applicazione *automotive*, in cui le dimensioni, soprattutto dell'impianto frenante devono necessariamente sottostare a limiti di spazi disponibili nella stessa. Risulta così impraticabile attualmente l'applicazione in ambito *automotive*.

3.1.2 Freni a correnti parassite

La tecnologia a correnti parassite si basa sull'utilizzo di un campo elettromagnetico indotto per rallentare un disco rotante. In particolare, al disco rotante, solidale con la ruota, è posto esternamente un insieme di bobine, atte a generare un campo elettromagnetico che genera delle correnti parassite sul disco stesso. Le correnti permettono di generare una coppia resistente alla rotazione che rallenta la velocità del disco rotante e, conseguentemente, la ruota [9].

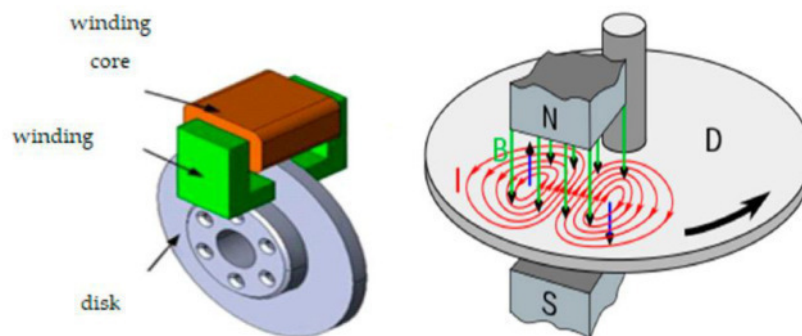


Figura 1.10 Esempio di freno a correnti parassite

Questa soluzione, mostrata in Figura 1.10, ha diversi vantaggi in quanto è di facile applicazione, richiede un singolo segnale corrente per essere attuata e geometricamente è compatibile con l'applicazione *automotive*, in quanto occupa uno spazio operativo simile a quello degli attuali freni a disco.

Per quanto si sia testato con successo l'utilizzo di multiple bobine agenti su un singolo disco, con lo scopo di raggiungere più alti picchi di frenata, la soluzione risulta non sufficientemente sicura per l'applicazione *automotive*. Il motivo è riferito al fatto che la coppia generata dal freno a correnti parassite è proporzionale alla velocità di rotazione del disco. Conseguentemente, ad alte velocità la frenata sarà sicura, ma sarà praticamente nulla quando il veicolo starà per

fermarsi, assicurando una alta instabilità per il pilota. Come sottolineato precedentemente questo rende la soluzione impraticabile, in quanto, il sistema ridondante di frenata da abbinare al freno rigenerativo deve necessariamente assicurare la frenata in ogni condizione.

3.1.3 Freni magneto-reologici

Quella del freno magneto-reologico è una tecnologia che sfrutta la capacità di un cosiddetto *smartfluid* di cambiare il suo stato viscoso quando sottoposto a un campo elettromagnetico. Il fluido magneto-reologico, come mostrato in Figura 1.11, infatti, è in grado di diventare semi-solido una volta che ad esso viene applicato un campo elettromagnetico. Le sue caratteristiche gli permettono, una volta inserito in un traferro tra una parte rotante e una fissa, di rallentare il rotore una volta che al fluido viene applicato un campo elettromagnetico [10, 11].

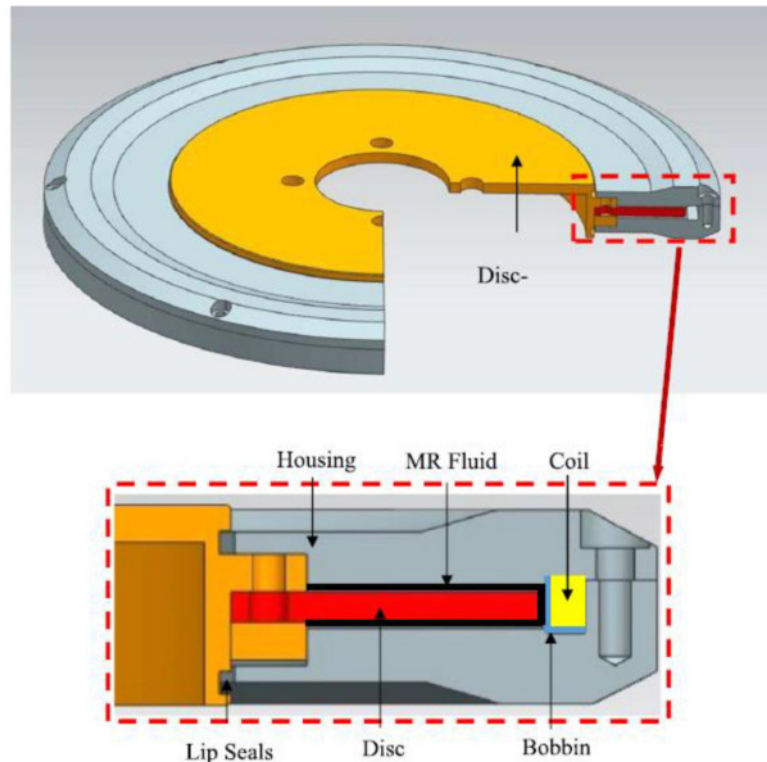


Figura 1.11 Esempio di Freno magneto-reologico

Queste caratteristiche permettono al fluido di raggiungere delle elevate coppie frenanti, se opportunamente ottimizzata la geometria, senza necessariamente occupare un ampio spazio operativo.

Il fluido risulta inoltre essere performante ad ogni velocità di rotazione della sezione rotativa, conseguentemente risulta conforme alle stringenti richieste per l'applicazione *automotive* anche in fasi di scarsa efficienza rigenerativa.

In conclusione, è possibile affermare che il freno magneto-reologico sembra la soluzione più compatibile con le richieste *automotive* al momento, considerando l'efficienza, l'affidabilità e la ripetibilità delle manovre.

3.2 Sistema di guida a zero emissioni

Una volta valutate le potenzialità dei diversi sistemi innovativi a zero emissioni è possibile affermare che l'utilizzo del freno magneto-reologico ad oggi risulti il compromesso più compatibile con l'applicazione *automotive*.

Il nuovo sistema di guida, perciò, deve integrare alte efficienze di frenata rigenerativa e, contemporaneamente, sfruttare, quando essa non risulta sufficiente, il principio magneto-reologico. Il freno a fluido, però deve anche essere in grado autonomamente di sopperire alle totali richieste massime che il pilota potrebbe desiderare anche quando la frenata rigenerativa è limitata. Il freno magneto-reologico dovrà quindi essere dimensionato per assicurare la frenata autonomamente, senza l'ausilio di rigenerazione.

Risulta strategico sviluppare quindi un sistema che, partendo dal *layout* rigenerativo ottimale descritto nel paragrafo 2.3, massimizzi al contempo la frenata rigenerativa e le coppie generate dal fluido magneto-reologico.

Per fare ciò, si è deciso di integrare il freno magneto reologico ad un motore *in-wheel*. In questo modo, si va a sfruttare il rotore del motore come componente rotante del freno magneto-reologico, aggiungendo poi uno statore esterno, fornito di solenoidi per la magnetizzazione del fluido magneto-reologico, inserito in un traferro tra rotore del motore e componente statico stesso. Come è visibile in Figura 1.12 il nuovo sistema, per quanto vada ad occupare una sezione maggiore di volume nel vano ruota è dimensionato per essere contenuto all'interno di almeno un cerchio da 18", rendendo la soluzione praticabile anche da un punto di vista di limitazioni geometriche.

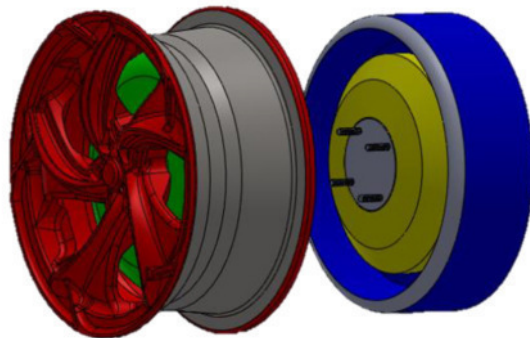


Figura 1.12 Vista della soluzione innovativa contenuta nel cerchio ruota

Il risultato che si ottiene porta a una maggiore ottimizzazione della posizione del fluido rispetto al centro di rotazione della ruota. Infatti, esistono alcuni esempi di freni magneto-reologici progettati per un utilizzo in ambito *automotive*, ma ognuno di essi si propone di ricondursi a una geometria simile a quella degli attuali freni a disco, che occupano una posizione vicina allo pneumatico mantenendo però una forma sviluppata verticalmente. In questo modo non è possibile posizionare una sufficiente quantità di fluido lontano dal centro di rotazione, portando così le forze resistenti generate a produrre una coppia frenante ridotta a causa di un corto braccio di applicazione della forza.

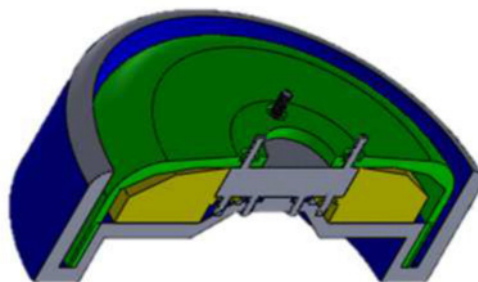


Figura 1.13 Sezione della soluzione innovativa

La combinazione con il motore elettrico *in-wheel* permette così, sfruttando l'ampiezza del motore stesso, di allontanare il fluido dal centro di rotazione, assicurando, a parità di fluido impegnato, una maggiore coppia frenante. Considerando una applicazione come quella *automotive* è fondamentale massimizzare ogni effetto per assicurare la massima frenata possibile e la posizione del fluido risulta estremamente critica. In quest'ottica la combinazione tra motore elettrico *in-wheel* e freno magneto-reologico risulta incredibilmente efficace.

L'accoppiamento tra le due tecnologie risulta ulteriormente favorevole considerando la possibilità di costruire una soluzione perfettamente modulare e di facile applicazione a chassis veicolo predefiniti. Infatti, si otterrebbe un modulo motore-freno in grado di essere accoppiato al resto del veicolo dati da: interfaccia con il blocco sospensivo, input e output del sistema di raffreddamento, cavi di corrente per motore e freno.

A proposito del sistema di raffreddamento, l'abbinamento delle due tecnologie risulta, ancora una volta, vincente. Infatti, la temperatura critica sia per i motori *in-wheel* che per il freno magneto-reologico è la stessa, pari a circa 150°. Per quanto il significato per i due sia diverso, in quanto per il motore si tratta di un limite termico per i flussi di corrente nelle bobine del motore, mentre per il freno e la temperatura oltre la quale la magnetizzazione risulta non più sufficiente per variare le caratteristiche fisiche del materiale, sarebbe possibile utilizzare il circuito di raffreddamento sviluppato per il motore con alcune modifiche per l'ottenimento del risultato target di mantenimento termico dell'intero blocco senza ulteriormente complicare la geometria degli spazi circostanti la ruota, già fortemente limitati.



Figura 1.14 Esploso della soluzione innovativa

Si può così riassumere il dettaglio degli elementi necessari per la realizzazione del sistema di guida innovativo a zero emissioni, mostrato nell'esploso di Figura 1.14, e riportato in Tabella 1.2.

Tabella 1.2 Bill of Material della soluzione innovativa

Parts List		
Item	Qty	Part Name
1	1	EM Stator
2	1	EM Rotor
3	1	Shaft
4	1	Bracket Resolver

Parts List		
Item	Qty	Part Name
5	9	Bolt
6	1	Ring Sealing
7	1	Shaft
8	1	Bearing i/o
9	1	Bearing o/i
10	1	MR Brake Stator

La soluzione presenta inoltre alcune caratteristiche fondamentali e critiche per le performance frenanti del sistema. In particolare, si deve considerare che tra i parametri fondamentali per il raggiungimento del target di frenata sono da considerare:

- lunghezza del traferro in cui è posto il fluido magneto-reologico;
- spessore del traferro;
- numero di avvolgimenti delle bobine in grado di generare il campo elettromagnetico sul fluido;
- quantità di corrente di cui le bobine sono percorse.

La selezione per la prima progettazione di questi parametri è stata svolta attraverso una analisi bibliografica relativa a sistemi di frenata magneto-reologica.

Una volta definito un primo *design* della soluzione risulta fondamentale procedere con delle validazioni virtuali che permettano di affermare che il nuovo ritrovato sia in grado di sopperire ai target di frenata richiesti e conseguentemente conforme all'applicazione *automotive*.

La difficoltà maggiore per la simulazione di un fluido magneto-reologico è la sua molteplice valenza. Infatti, è importante verificare le seguenti condizioni e seguenti comportamenti affinché si possa considerare l'applicazione validata:

- comportamento elettro-magnetico del fluido sottoposto ad un campo elettromagnetico;
- resistenza fluidodinamica con il fluido non magnetizzato;
- massima coppia frenante disponibile con il fluido magnetizzato e al massimo del suo stato semi-solido.

L'importanza di verificare ognuno di questi parametri è di critica importanza per ottenere il risultato atteso di validare l'efficacia dell'applicazione in ambito *automotive*.

L'impossibilità di ottenere il risultato attraverso una unica simulazione in grado di valutare sia l'aspetto elettromagnetico che quello fluidodinamico porta alla necessità di sviluppare una strategia di analisi separata, in cui si assicura in primo luogo che il fluido sia interamente magnetizzato raggiungendo una magnetizzazione tale da assicurare il raggiungimento del massimo stato semisolido. Per fare ciò si è deciso di sviluppare un modello, analizzato tramite software di calcolo, in grado di rappresentare il *design* innovativo ideato.

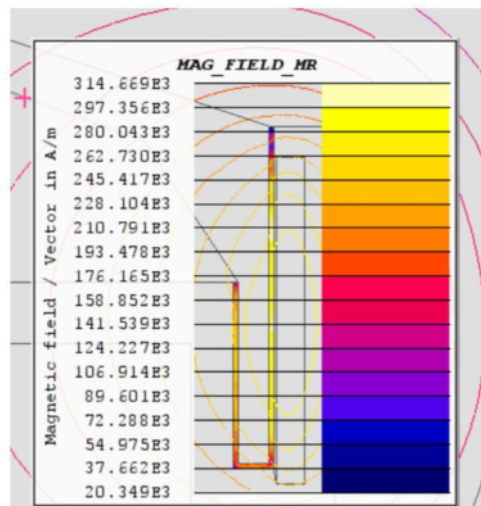


Figura 1.15 Risultato simulazione elettromagnetico

Il risultato ottenuto, visibile in Figura 1.15, assicura che il fluido superi in modo consistente i 200kA/m nella maggior parte della propria sezione, ritenendo necessaria una lieve modifica e ottimizzazione.

Una volta assicurato che il fluido sia in grado di raggiungere la massima magnetizzazione, ci si deve assicurare che il fluido magneto-reologico sia in grado di, una volta magnetizzato, generare una coppia resistente in grado di fermare un veicolo ed essere così validato per l'applicazione *automotive*, ma, nell'ottica di generare un veicolo costantemente più efficiente, è necessario assicurarsi che la resistenza al rotolamento del sistema frenante non magnetizzato sia sufficientemente ridotta da assicurare che non si provochino delle perdite di *performance* durante le fasi di trazione.

I target da raggiungere in termini di coppia, scelti per la validazione, sono rispettivamente 1025 Nm per la coppia massima, rappresentativo di una frenata di 0.9g di decelerazione per un veicolo di 1800kg, e 60 Nm per la resistenza al rotolamento, di valore compatibile a quello della resistenza dello pneumatico.

Tabella 1.3 Risultati di coppia delle simulazioni fluidodinamiche

	<i>Torque Target (Nm)</i>	<i>Torque Result (Nm)</i>
<i>Rolling Resistance</i>	60	67
<i>Maximum Braking</i>	1025	1100

Come è possibile verificare dai risultati ottenuti in Tabella 1.3, la coppia risultante massima ottenuta dal freno si dimostra superiore all'ambizioso *target* scelto. Ad ogni modo, sarà necessario sviluppare un percorso di ottimizzazione che permetta la riduzione della coppia residua quando non è applicato campo magnetico al fluido stesso.

In conclusione, si può affermare che il sistema innovativo è da valutare come possibile, considerando la sua capacità di raggiungere i target prefissati ad inizio progetto e, necessariamente, può essere migliorato per rendere la soluzione ulteriormente efficiente sia in termini di dissipazioni energetiche per la magnetizzazione del fluido, sia per quanto riguarda la riduzione della coppia residua a campo magnetico applicato nullo.

Conclusioni

La ricerca portata avanti sinora sottolinea la criticità delle emissioni secondarie e, in modo massivo, quelle provenienti dai sistemi frenanti. Risulta quindi fondamentale sfruttare ogni tecnologia ad oggi disponibile per ridurre e se possibile annullare le polveri generate dai freni a frizione attualmente utilizzati su ogni veicolo.

Partendo dalle soluzioni attualmente in mercato è possibile analizzare gli effetti benefici della frenata rigenerativa e in quale modo essa risulti molto efficace nella limitazione delle emissioni secondarie, sfruttando la capacità del motore elettrico di recuperare energia cinetica durante le decelerazioni.

La frenata rigenerativa, infatti, sottolinea la grande capacità dei veicoli elettrici di minimizzare le emissioni durante una buona parte delle manovre di frenata svolte durante un ciclo guida standard di un pilota. Considerando di ottimizzare il *layout* del veicolo e generare così un massimo livello di rigenerazione dell'intero mezzo, è possibile affermare che la rigenerazione possa avere risultati strabilianti nell'assorbire tutte le decelerazioni di entità inferiore a 0.6g. Risulta però necessario assicurare la stabilità e sicurezza del veicolo in ogni condizione di guida. Per fare ciò, la frenata rigenerativa non risulta sufficiente, anche a causa della sua non ripetibilità in alcune manovre, come per esempio frenate limite o ad alti stati di carica del pacco batteria.

Diventa quindi fondamentale accoppiare all'efficienza della rigenerazione un sistema frenante di supporto che sia a zero emissioni per realizzare una guida a impatto zero.

Il sistema innovativo presentato, che combina l'efficienza della frenata rigenerativa dei motori *in-wheel* con un sistema frenante magneto-reologico, è stato validato virtualmente per l'applicazione in ambito *automotive*. Risulta comunque necessaria una ulteriore ottimizzazione del sistema, con l'obiettivo di assicurare la massima efficienza possibile dal sistema e, parallelamente, mantenere lo standard di sicurezza richiesto per il tipo di applicazione.

Fondamentale è poi una volta che l'ottimizzazione fosse terminata, sviluppare un prototipo della soluzione, in grado di confermare i promettenti risultati di calcolo ottenuti in fase di validazione virtuale.

Bibliografia

- [1] L. Perez, «Size Fractionate Particulate Matter, Vehicle Traffic, and Case-Specific Daily Mortality in Barcelona, Spain,» *Environmental Sciences and Technologies*, vol. 43, pp. 4707-4714, 2009.
- [2] P. Bielaczyc, A. Szczotka e J. Woodburn, «An overview of particulate matter emissions from modern light duty vehicles,» *Combustion Engines*, vol. 153, pp. 101-108, 2013.
- [3] T. Demir, D. Karakas e S. Yenisoay-Karakas, «Source identification of exhaust and non-exhaust traffic emissions through the elemental carbon fractions and Positive Matrix Factorization method,» *Environmental Research*, vol. 204, n. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112399, 2022.
- [4] J. M. Wang, C.-H. Jeong, N. Hilker, R. M. Healy, U. Sofowote, J. Deboasz, Y. Su, A. Munoz e G. J. Evans, «Quantifying metal emissions from vehicular traffic using real world emission factors,» *Environmental Pollution*, vol. 268, n. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115805, 2021.
- [5] Y. Liu, S. Wu, H. Chen, M. Federici, G. Perricone, Y. Li, Gang, S. Munir, Z. Luo e B. Mao, «Brake wear induced PM10 emissions during the world harmonised light-duty vehicle test procedure-brake cycle,» *Cleaner Production*, vol. 361, n. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132278, 2022.
- [6] *Euro 7, European Commission*, 10/11/2022.
- [7] A. I. e. al., «Emission Factor for Antimony in Brake Abrasion Dusts as One of the Major Atmospheric Antimony Sources,» *Environmental Science & Technology*, vol. 42(8), n. DOI: 10.1021/es702137g, 2008.
- [8] Placid Industries, «Hysteresis Brake,» [Online]. Available: <https://placidindustries.com/products/brakes/hysteresis-brakes/hysteresis-brake-h250/>.
- [9] Shiau e Ma, «The design of eddy-current magnet brakes,» *Transactions- Canadian Society for Mechanical Engineering*, n. DOI: 10.1139/tcsme-2011-0002, 2012.
- [10] Q. H. Nguyen e al, «Optimal design of disc-type magnetorheological brake for mid-sized motorcycle: experimental evaluation,» *Smart Mater. Struct*, n. DOI: 10.1088/0964-1726/24/8/085009, 2015.
- [11] A. G. Olabi e A. Grunwald, «Design and application of magneto-rheological fluid,» CORE, Dublin; DOI:10.1016/j.matdes.2006.10.009, 2006.

Sistemi High Power Charging e soluzioni per l'integrazione nella rete¹

Autore: Sara Salamone

Introduzione

La possibilità di ricaricare un veicolo in pochi minuti è un fattore fondamentale per l'accettazione della mobilità elettrica. I sistemi High Power Charging (HPC) sono in grado di ricaricare gli autoveicoli elettrici con potenze superiori ai 150 kW. Ciò significa garantire una ricarica fino all'80% della capacità della batteria in meno di 20 minuti². Sebbene ad oggi le auto in grado di ricaricare a queste potenze non siano molte, il mercato automobilistico si sta evolvendo, offrendo modelli di fascia medio-alta in grado di ricaricare fino a 350 kW, come mostrato in Tabella 2.1.

Dal punto di vista regolatorio, già a partire dal 2021 sono state definite delle importanti misure a supporto dell'infrastruttura di ricarica che hanno attribuito ai sistemi HPC un ruolo rilevante.

La nuova proposta europea di regolamento per le infrastrutture per combustibili alternativi [1] (AFIR), che andrà a sostituire l'attuale direttiva, una volta approvata, vincolerà gli stati membri a installare ogni 60 km lungo la rete TEN-T *core* (in Italia la rete autostradale) almeno 300 kW di potenza di ricarica al 2025, di cui almeno un punto da 150 kW, e 600 kW al 2030, di cui almeno due punti da 150 kW. Gli stessi requisiti, traslati di 5 anni, dovranno essere garantiti sui corridoi appartenenti alla rete TEN-T *comprehensive*, che in Italia corrispondono circa alla rete di superstrade e strade extraurbane principali.

Nel contesto italiano, l'ultima versione del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) promuove lo sviluppo della mobilità elettrica con 750 milioni di euro di fondi per l'installazione di 21.400 punti di ricarica veloce ed ultraveloce entro la fine del 2025 [2].

Nei prossimi anni, è dunque ragionevole aspettarsi una significativa diffusione dell'infrastruttura di ricarica HPC. Tuttavia, viste le elevate potenze in gioco dei sistemi HPC, la loro integrazione nel sistema elettrico richiede un'attenta valutazione. Seguendo le indicazioni della normativa CEI 0-16, che regola le connessioni alle reti di distribuzione, per potenze superiori a 200 kW, come in questo caso, è richiesta una connessione in media tensione (MT), che tuttavia non è sempre disponibile. Bisogna inoltre considerare che lo sviluppo della rete elettrica potrebbe essere più lento rispetto alle necessità di installare infrastrutture di ricarica veloci. In questo contesto, i sistemi HPC accoppiati ad un sistema di accumulo (SdA) locale costituiscono una valida soluzione. La presenza dell'accumulo, infatti, permette di coprire i picchi di potenza di ricarica pur mantenendo una connessione in bassa tensione (BT), aprendo inoltre alla possibilità di valorizzare fonti di energia rinnovabile locale.

¹ Questo lavoro è stato finanziato dal Programma "Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale", in base al Piano triennale 2022-2024, approvato nel decreto del 15 Settembre 2022 dal Ministro della transizione ecologica (ora Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica).

² Per una batteria da 75 kWh con ricarica dal 20% all'80% dello stato di carica.

Tabella 2.1 Esempi di auto abilitate alla tecnologia HPC fino a 350 kW

	Costo (€)	Disponibile dal	Batteria (kWh)	Livello di Tensione (V)	Potenza di ricarica (kW)	Tempo di ricarica (min)
Hyundai IONIQ 6	47.750 - 58.950	2023	53-77,4	800	350	18
Kia EV6 [3]	da 55.450	2021	77,4	697	350	18
Lotus Eletre [4]	da €95.990	2023	112	800	350	20
Porsche Taycan turbo [5] [6]	da 161.000	2021	93,4	610-835	350	18

In questo articolo ci si propone di analizzare vantaggi, soluzioni e architetture per stazioni HPC integrate con SdA, sviluppandone un modello di simulazione per valutare diverse soluzioni e logiche per la gestione ottimale dei flussi di potenza. Infine, verranno presentate le caratteristiche del sistema HPC integrato con sistema di accumulo e pensilina fotovoltaica di cui si doterà RSE (Ricerca Sistema Energetico) per svolgere attività sperimentali e di ricerca.

1 I vantaggi dei sistemi HPC integrati con accumulo stazionario

I principali vantaggi derivanti dell'integrazione di un SdA in una infrastruttura di ricarica HPC, possono riassumersi nei seguenti punti:

- vantaggio infrastrutturale: la presenza dell'accumulo mitiga la necessità di realizzare nuove connessioni nel caso di assenza della rete in MT. In aggiunta, la realizzazione di nuove linee in MT, oltre a presentare un costo di sistema, necessita di tempi di approvazione ed esecuzione non trascurabili, che in assenza di una corretta pianificazione potrebbero rallentare lo sviluppo dell'infrastruttura;
- vantaggio di sistema: l'accumulo contribuisce a coprire parte del picco della ricarica, riducendo il carico sulla rete specialmente nelle ore di punta, quando usualmente si colloca la richiesta di ricarica veloce. L'azione di limitazione del picco è anche nota con il termine inglese *Peak shaving*;
- vantaggio economico: l'accumulo consente di immagazzinare energia dalla rete quando il costo dell'energia è più basso, per poi usarla nei momenti in cui prelevare energia dalla rete risulta più costoso. L'altro sostanziale vantaggio è rappresentato dalla riduzione della potenza impegnata che in bolletta si traduce in un risparmio della quota potenza relativa a entrambe le componenti Trasporti e gestione del contatore e Oneri generali di sistema.

Le potenzialità di queste soluzioni stanno attirando l'interesse sia del mondo della ricerca, che quello regolatorio. Tant'è che nella consultazione pubblica sulla misura PNRR sopra citata, si fa particolare riferimento all'incentivazione di infrastrutture di ricarica sperimentali abbinata a sistemi di accumulo. Anche l'ARERA nel documento per la consultazione pubblica 449/2022/R/eel del 7 settembre 2022, prende in esame il possibile ruolo dei SdA per la ricarica fast e ultra-fast [7].

2 Stato dell'arte

Attualmente sul mercato sono già disponibili soluzioni commerciali che integrano all'interno di stazioni di ricarica HPC sistemi di accumulo stazionari. La Tabella 2.2 offre alcuni esempi di tali sistemi insieme alle principali caratteristiche.

Tabella 2.2 Stazioni HPC con accumulo stazionario disponibili in commercio

	Potenza di connessione	Potenza di ricarica	Accumulo
ADS-TEC [8]	50-110 kVA	320 kW	140 kWh
Numbat [9]	n.d.	300 kW	200 kWh
NIDEC [10]	50 kW	320 kW	158 kWh
FCS Mobility [11]	50-100 kW	300 kW	da 240 kWh
Ingeteam [12]	n.d.	200-400 kW	580-820 V
Kreisel [13]	120 kW	240 kW	115 kWh

La maggior parte di queste stazioni presentano due prese di ricarica, che se utilizzate contemporaneamente erogano a ciascun veicolo metà della potenza disponibile, se attivate invece singolarmente possono erogare la massima potenza prevista dal sistema.

Oltre agli esempi sopra riportati, vale la pena ricordare che anche operatori di spicco come Ionity e Tesla stanno integrando sistemi di accumulo stazionario presso le loro infrastrutture di ricarica. Ionity [13] sta integrando sistemi di accumulo nei luoghi in cui la rete elettrica non può fornire potenza sufficiente per la ricarica ad alta potenza. L'azienda rende noto di aver implementato questa configurazione in siti remoti della Spagna, che utilizzano l'accumulo per prelevare 20 kW di potenza disponibili dalla rete locale, abilitando al tempo stesso ricariche a potenze significativamente più elevate. Altri esempi sono i siti di ricarica nel Regno Unito, dove le batterie incrementano la potenza del sito per consentire a più veicoli elettrici di caricarsi contemporaneamente a una potenza di 350 kW. Oltre oceano, Tesla ha realizzato nel 2019 a Las Vegas una stazione da 24 punti di ricarica ciascuno da 250 kW, con pannelli fotovoltaici sul tetto e un sistema di accumulo locale.

3 Integrazione nella rete e architetture

I sistemi di ricarica HPC richiedono alla rete significativi livelli di potenza, che risultano troppo onerosi per essere sostenuti dalla rete in BT. L'integrazione ordinaria di questi sistemi prevede pertanto un allaccio diretto alla rete in MT. Questa configurazione si mostra particolarmente idonea per stazioni di ricarica di grandi dimensioni e ad alto tasso di utilizzo, che giustificano anche la realizzazione di nuove connessioni in caso di assenza della rete in MT. Tale scenario, tuttavia, trova applicazione in un contesto di elevata diffusione della mobilità elettrica.

In una fase di sviluppo iniziale, la realizzazione di nuove linee in MT, dove mancanti, potrebbe richiedere dei tempi troppo lunghi per rispondere prontamente alle prime domande di richiesta di ricarica. In questo caso, l'integrazione di un SdA nella stazione di ricarica potrebbe figurarsi come una valida opzione per sfruttare una connessione in BT, generalmente più diffusa, accessibile e con tariffe di connessione più contenute. Per accedere alla rete in BT, infatti, non è richiesta all'utente l'installazione di una cabina secondaria, che risulta necessaria per ricevere la connessione in MT. In più, con una connessione in BT si contrae la spesa tariffaria per le componenti "Trasporto e gestione del contatore" e "Oneri di sistema", che conferiscono un peso maggiore all'utilizzo della potenza. Risulta evidente che specialmente in una prima fase di sviluppo, caratterizzata da una bassa richiesta di ricarica, la spesa per una connessione in MT potrebbe introdurre dei costi operativi eccessivi rispetto a una domanda di potenza modesta e intermittente.

A valle di queste osservazioni, è comunque importante sottolineare che la tipologia di connessione alla rete più conveniente dipenderà dal caso d'uso specifico e dalla partecipazione di numerosi fattori, quali la domanda totale di ricarica, la tipologia di allaccio già disponibile e

la relativa potenza, la compresenza di altri carichi e, non per ultimi, i costi per il SdA che possono determinare un investimento iniziale non trascurabile.

Tornando all'oggetto di questo studio, quando si parla di stazioni HPC integrate con sistemi di accumulo stazionari sono previste due principali architetture: bus in AC (Alternative Current) o bus in DC (Direct Current). L'architettura con bus AC, come si osserva dalla Figura 2.1, richiede due stadi di conversione, AC/DC seguito da un DC/DC, per interfacciare al bus AC gli elementi in DC che compongono il sistema.

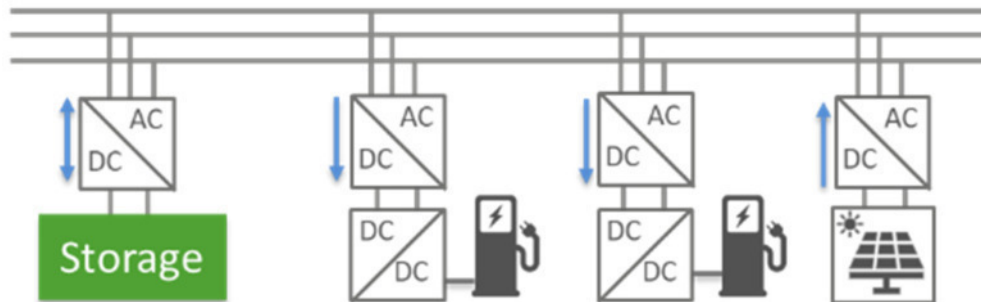


Figura 2.1 Architettura con bus AC.

Nel caso di bus in DC, in Figura 2.2, gli elementi della stazione sono tutti collegati a un bus DC comune, che consente di ridurre gli stadi di conversione, poiché sono necessari solo dei convertitori DC/DC tra il bus e gli elementi in DC del sistema. Rispetto a un bus AC, questa configurazione richiede meno stadi di conversione dell'alimentazione, il che è vantaggioso in termini di efficienza, costo dell'hardware e spazio.

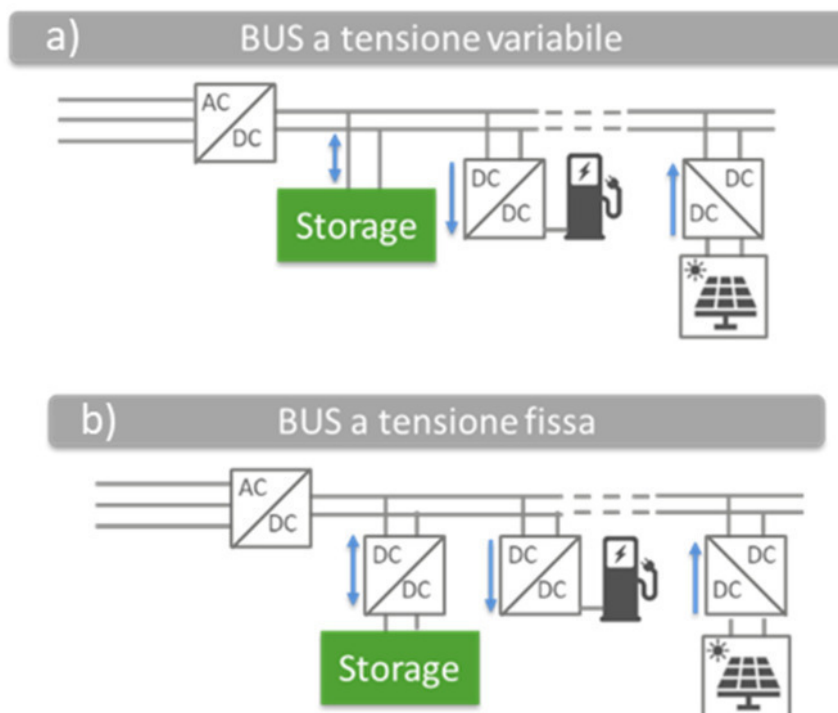


Figura 2.2 Architettura con bus DC. Configurazione a) bus a tensione variabile, pari a quella di batteria. Configurazione b) bus esercito a tensione costante.

Focalizzandosi sull'esercizio del bus DC, il SdA può essere connesso al bus in modo diretto o attraverso un convertitore DC/DC dedicato. Nel caso di connessione diretta, Figura 2.2a), il livello di tensione del bus DC varierà in base alla tensione del SdA. Di conseguenza, i convertitori DC/DC che connettono i *charger* HPC al bus DC dovranno sostenere un ampio *range* di variazione della tensione sia in ingresso che in uscita. Al contrario, nel caso in cui la batteria si interfaccia al bus DC tramite un convertitore, Figura 2.2b), la tensione del bus DC rimane fissa, facilitando il *design* e la gestione degli altri convertitori. Tuttavia, quando le potenze richieste all'accumulo risultano elevate, la dimensione e il costo del convertitore possono diventare significative.

A completare il sistema, vista la presenza del SdA e al fine di promuovere una migliore percezione del suolo occupato dalla stazione, si può prevedere l'introduzione di una pensilina con tettoia fotovoltaica a copertura dell'intera area di ricarica. La dimensione circoscritta dell'impianto fotovoltaico (FV) non darà un apporto significativo alla richiesta di ricarica, ma può contribuire positivamente alla alimentazione dei sistemi ausiliari della stazione.

4 Modellazione di un sistema HPC connesso alla rete in bassa tensione

Al fine di valutare le varie configurazioni e le possibili modalità di gestione energetica di una stazione HPC connessa in BT e integrata con SdA, è stato sviluppato un modello di simulazione in ambiente *opensource* OpenModelica (OM) che supporta il linguaggio standardizzato Modelica³. L'obiettivo dell'attività di modellazione è creare uno strumento semplice ma accurato, in grado di replicare il comportamento dei diversi componenti della stazione di ricarica in modo puntuale, mantenendo un buon livello di accuratezza. Un altro elemento fondamentale è garantire la flessibilità del modello al fine di poter scalare i componenti e variarne i parametri a seconda dei diversi scenari di simulazione.

Lo schema concettuale del sistema modellato è mostrato in Figura 2.3. Il convertitore AC/DC trifase adatta l'alimentazione, limitata a 100 kW, commissionando il bus DC. I punti di ricarica e il sistema di accumulo stazionario della batteria sono poi collegati al bus DC tramite dedicati convertitori DC/DC. Il blocco *Energy Management System* (EMS) stabilisce, attraverso logiche euristiche, i flussi di energia e potenza tra gli elementi del sistema, impostando il processo di carica/scarica dell'accumulo sulla base dei prezzi dell'energia.

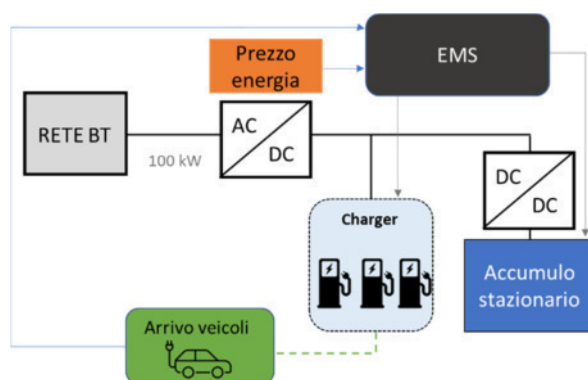


Figura 2.3 Architettura del sistema modellato in ambiente OpenModelica.

³ Linguaggio standardizzato sviluppato per la modellazione di sistemi fisici. È costruito sulla modellazione a causale con equazioni e costrutti orientati agli oggetti, per facilitare il riutilizzo e lo scambio di conoscenze di modellazione.

Il sistema di accumulo è modellato secondo il circuito elettrico equivalente di Figura 2.4, ripreso da [14]. In particolare, il circuito è composto da una resistenza di ingresso R_0 che modella il comportamento algebrico della batteria e un ramo RC che ne riproduce i comportamenti transitori. Tutti gli elementi del circuito sono dipendenti dallo stato di carica (SOC) dell'accumulatore, nonché dalla sua temperatura interna. Tuttavia, fra tutti gli elementi la dipendenza più importante dal SOC è quella della forza elettromotrice, che è stato pertanto modellato.

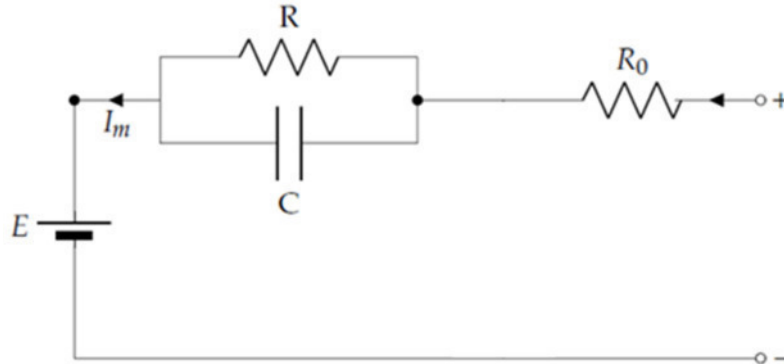


Figura 2.4 Circuito equivalente impiegato per la modellazione del sistema di accumulo [14].

Per semplicità, si assume una relazione lineare tra la forza elettromotrice (E) e lo stato di carica (SOC), che in OM si può ottenere per mezzo di un elemento condensatore secondo l'equazione 4.1:

$$C = \frac{C_n}{E_{max} - E_{min}} \quad 4.1$$

dove C_n è la capacità della batteria in Ah. Il SOC è derivato dalla sua formulazione standard con l'ipotesi aggiuntiva di dipendenza E-SOC lineare come in equazione 4.2, dove Q_e rappresenta la carica estratta e Q_n la capacità nominale della batteria.

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{Q_n} \quad 4.2$$

L'arrivo dei veicoli elettrici è modellato attraverso una curva che ne definisce la probabilità di arrivo in ogni ora del giorno (come mostrato in Figura 2.5). Profili di questo tipo sono disponibili sia su pagine online di settore che in letteratura, dove vengono simulati o ricostruiti sulla base di dati raccolti sul campo. In questo caso si è scelto di far riferimento alla curva di distribuzione delle ricariche pubblicata da uno dei principali operatori di stazioni di ricarica ad alta potenza che viene di seguito mostrata in Figura 2.5.

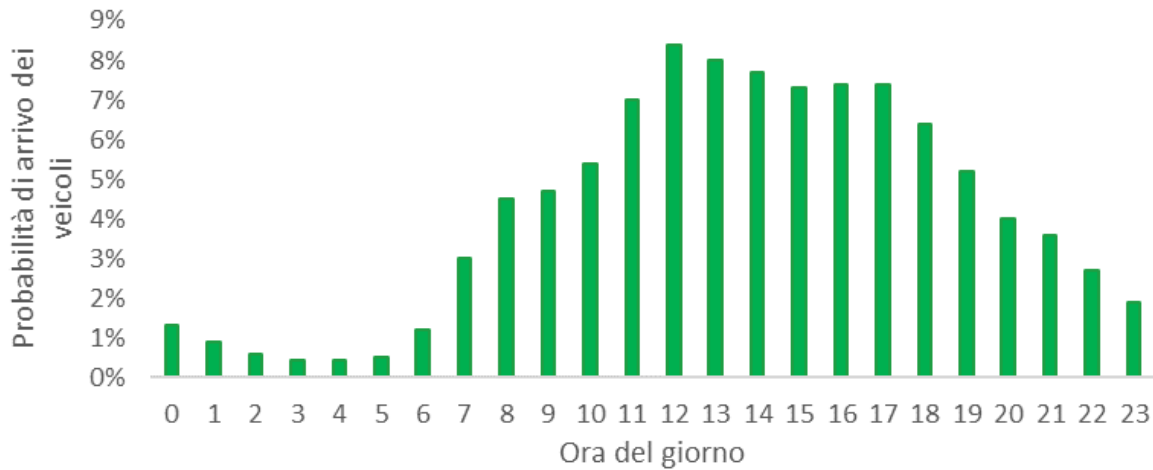


Figura 2.5 Distribuzione delle sessioni di ricarica durante il giorno [16].

La richiesta di ricarica di un veicolo elettrico dipende da molti fattori, come il chilometraggio giornaliero, il SOC all'arrivo e il valore finale desiderato, nonché il tempo di attesa accettato dall'utente. In questa modellazione al fine di determinare la richiesta di ricarica, il SOC in arrivo viene generato in modo casuale, con un *range* compreso tra il 20% e il 70%. La potenza di ricarica richiesta dai veicoli varia in base al SOC seguendo la curva di Figura 2.6 e termina al raggiungimento dell'80% di SOC.

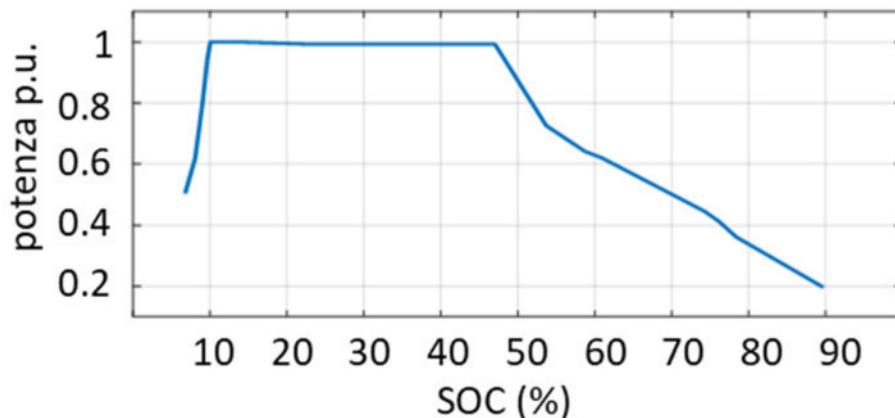


Figura 2.6 Curva di potenza di ricarica in funzione del SOC.

Il blocco EMS, ovvero l'*Energy Management System*, decide come gestire i flussi di potenza tra gli elementi del sistema, garantendo al tempo stesso la ricarica dei veicoli elettrici. Come mostrato in Figura 2.3, l'EMS riceve dagli altri sotto-modelli i seguente input:

- il SOC del sistema di accumulo
- la richiesta di ricarica da parte dei mezzi in arrivo
- il profilo tariffario dell'energia elettrica, con periodi di *peak* e *off-peak*.

L'EMS restituisce poi in uscita la potenza del sistema di accumulo, sia in fase di scarica verso i veicoli, che di ricarica dalla rete, nel rispetto dei vincoli di sistema. Al fine di minimizzare il costo per il prelievo di energia dalla rete, l'EMS imposta la ricarica dell'accumulo durante i periodi

off-peak, scaricandolo, con una profondità di scarica massima dell'80%, durante i periodi di picco per supportare la ricarica dei veicoli.

4.1 Caso d'uso: ricarica pubblica

Il modello appena descritto è stato impiegato per approfondire il caso studio di una stazione di ricarica pubblica. Si assume che la stazione sia composta da tre punti di ricarica da 150 kW ciascuno, con una potenza di connessione alla rete limitata a 100 kW. Il sistema di accumulo integrato nella stazione di ricarica potrà svolgere funzioni diverse a seconda delle sue dimensioni:

- accumulo di grossa taglia, denominato *High-capacity*: può accumulare, durante i periodi *off-peak*, tutta l'energia necessaria per ricaricare i veicoli elettrici nei periodi di picco, traslando di fatto i prelievi di energia nei momenti in cui il costo è più conveniente. Il concetto è illustrato in Figura 2.7. Questa opzione richiede un'elevata capacità di accumulo, a cui da un lato è associato un significativo investimento iniziale, dall'altro l'opportunità di ridurre i costi operativi legati all'acquisto di energia. L'EMS imposta la ricarica del SdA alla massima potenza disponibile quando il prezzo dell'elettricità è basso. Poi nei periodi di picco l'EMS fornisce tutta l'energia accumulata dal SdA per ricaricare i veicoli elettrici;
- accumulo di taglia più piccola destinato a coprire solo i picchi della ricarica, denominato *Peak-shaving*: fornisce la differenza tra la potenza richiesta dai veicoli e quella cedibile dalla rete, come mostrato in Figura 2.7. Questa configurazione consente un minore investimento iniziale, in quanto la dimensione richiesta per l'accumulo è inferiore al caso precedente. Al contrario, il costo operativo aumenta, in quanto la rete contribuisce alla ricarica dei veicoli anche durante i periodi di punta.

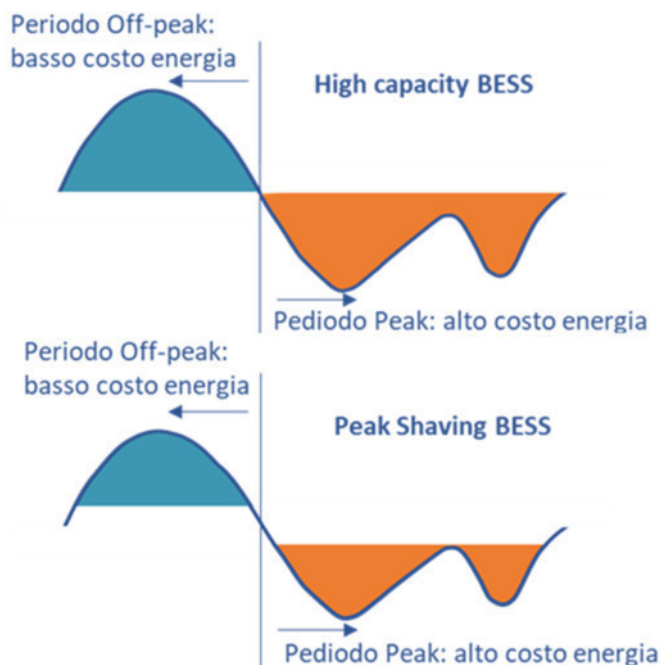


Figura 2.7 Logica di funzionamento dei due sistemi di accumulo considerati. L'*High-capacity* raccoglie durante la notte tutta l'energia per alimentare di giorno i veicoli, annullando il prelievo di energia dalla rete nelle ore giornaliere, quando il costo dell'energia è maggiore. Il *Peak shaving*, copre solo una parte della ricarica dei veicoli, quella corrispondente ai picchi di potenza.

In base alle due configurazioni sopra menzionate, il costo complessivo per l'investimento iniziale e il funzionamento della stazione può variare indicando quale è la soluzione più

competitiva. A tal fine, utilizzando il modello sviluppato, per ciascuna configurazione è stata regolata la taglia di SdA, fino a raggiungere la condizione auspicabile, che nel caso di *High-capacity*, consiste nel ridurre al minimo i costi operativi. Nel caso delle configurazioni *Peak-shaving*, invece, si è cercata la taglia più piccola in grado di coprire i picchi di ricarica dei veicoli. Il contenuto energetico richiesto per il SdA sarà inferiore rispetto al caso precedente, limitando il costo dell'investimento iniziale. Nella definizione delle taglie di accumulo, si è inoltre tenuto conto della vita dell'accumulo, che deve essere operativo per almeno 10 anni.

La Figura 2.8 illustra il funzionamento della stazione HPC integrata con *High-capacity* da 830 kWh. L'accumulo stazionario viene ricaricato alla massima capacità di rete durante le ore notturne, quando il prezzo dell'energia è più contenuto, fino a quando non è completamente carico. All'arrivo dei veicoli, l'accumulo fornisce tutta la potenza di ricarica richiesta dai veicoli (curva verde). Dopo le 20:00, orario tipicamente *off-peak*, la rete ricarica il sistema di accumulo. In questo modo il prelievo dalla rete viene spostato nei periodi *off-peak*, mentre nei periodi di punta l'accumulo fornisce tutta l'energia, riducendo i costi di esercizio.

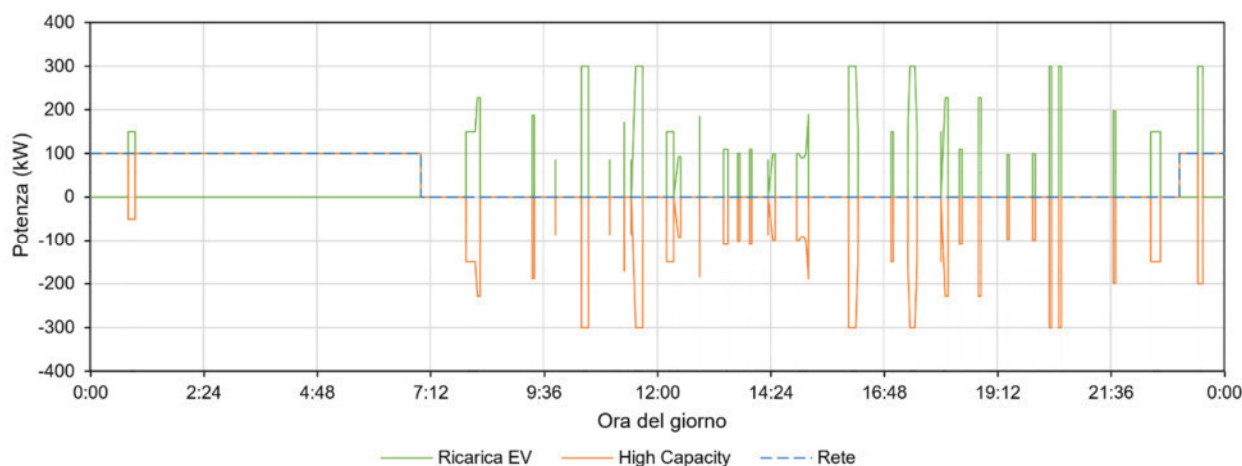


Figura 2.8 Funzionamento giornaliero della stazione HPC integrata con accumulo *High-capacity*.

La Figura 2.9 descrive il funzionamento nel caso del *Peak-shaving* da 430 kWh, che rappresenta la dimensione minima per coprire la ricarica dei veicoli elettrici, rispondendo al vincolo di vita utile di 10 anni. Si può osservare che finché la potenza di rete è inferiore alla potenza di ricarica dei veicoli elettrici, l'EMS copre il carico con la rete. Quando la capacità della rete risulta insufficiente, l'accumulo fornisce il *surplus* di potenza, mentre durante i periodi *off-peak* a basso costo dell'energia, si ammette la ricarica dell'accumulo stazionario.

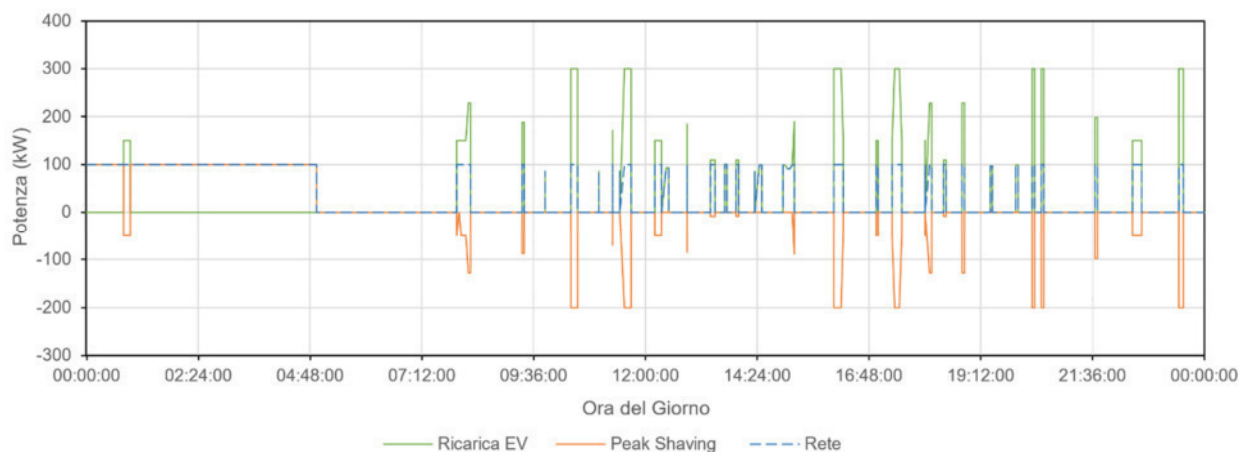


Figura 2.9 Funzionamento giornaliero della stazione HPC integrata con accumulo *Peak-Shaving*.

4.2 Analisi economica

Come visto precedentemente, uno dei principali vantaggi di una stazione di ricarica integrata con sistema di accumulo, risiede nella possibilità di ridurre la spesa per i costi di connessione e di assorbire energia nei periodi *off-peak*. In questa sezione ci si propone dunque di analizzare le varie componenti che compongono il CAPEX e l'OPEX per le due configurazioni con accumulo (*High-capacity* e *Peak-shaving*) identificate, confrontandole con i costi da sostenere in caso di connessione diretta alla rete MT. I risultati dell'analisi di confronto impostata sul caso studio di una stazione di ricarica HPC pubblica evidenzieranno in che misura una connessione in BT con integrazione di un sistema di accumulo possa offrire dei vantaggi economici rispetto ad una connessione diretta in MT.

Relativamente ai CAPEX, si andranno a considerare i contributi per la realizzazione delle connessioni, computando quota distanza (fissa e aggiuntiva per 300 m) e quota potenza così come regolamentate da ARERA. Nel caso di connessione alla rete MT, inoltre, si computano gli interventi di adeguamento impianto volti a ricevere la rete MT attraverso una cabina MT/BT. Si escludono i costi dei *charger* che non costituiscono un discriminante nell'analisi di confronto. Le voci di costi associate all'investimento iniziale sono raccolte in Tabella 2.3. Come si osserva, la connessione in MT presenta nella quota distanza una componente fissa superiore, mentre la quota aggiuntiva è circa la metà rispetto al caso BT. La quota potenza risulta invece superiore nel caso BT.

Tabella 2.3 Parametri di costo utilizzati per la valutazione dei costi di investimento.

Realizzazione della connessione	Quota distanza		Quota potenza (€/kW)
	Quota fissa (€)	Quota Aggiuntiva da applicare per ogni 100 metri eccedenti la distanza di 200 metri dalla cabina di riferimento (€)	
Media Tensione	466,52	46,66	55,71
Bassa Tensione	186,14	93,31	69,99
Realizzazione cabina MT/BT	80.000 € + 50.000 €/MW		
Accumulo	345 €/kWh		
Charger (150 kW)	90.000 € cad.		

Per i costi operativi, si è fatto riferimento alla spesa da sostenere per la fornitura di energia, considerando le componenti⁴: materia energia, Trasporto e gestione del contatore e Oneri di sistema. In caso di ordinaria tariffazione per la fornitura in MT e BT, entrambe le voci Trasporto e Oneri presentano una struttura trinomia, con quota fissa, quota potenza (€/kW) e quota energia (€/kWh).

Oltre a queste ordinarie tipologie contrattuali, ARERA ha introdotto dal 2010 la tariffa BTVE dedicata esclusivamente a punti di ricarica pubblici connessi in bassa tensione (BT). Le tariffe per Trasporto e gestione del contatore e per Oneri di sistema applicati nella BTVE sono caratterizzate da una struttura monomia in energia e quindi prive di quote fisse e di quote potenza. La BTVE vuole infatti agevolare le infrastrutture di ricarica in fase di avvio, consentendo di godere di una riduzione della spesa tariffaria tanto maggiore quanto più bassi sono i volumi di energia prelevata (quindi, quanto minori sono gli incassi del gestore di un punto di ricarica). A fronte dell'azzeramento delle quote fisse, tuttavia, sono stati maggiorati i corrispettivi tariffari espressi in energia. Vista l'applicabilità della BTVE al presente caso studio, si è impostato il confronto andando a considerare anche questa tariffazione per i casi con accumulo stazionario.

Per tutte le tipologie contrattuali, sia per la materia energia che per Trasporto e Oneri, si è fatto riferimento ai costi relativi all'anno 2019 (Tabella 2.4), cercando così di evitare l'influenza della pandemia e del conflitto in Ucraina.

Tabella 2.4 Tariffe delle componenti Trasporto e Gestione del contatore e Oneri di sistema (anno 2019) [17] [18].

	Trasporto e Gestione del contatore			Oneri di sistema		
	Quota fissa €/punto/anno	Quota potenza €/kW per anno	Quota energia €/kWh	Quota fissa €/punto/anno	Quota potenza €/kW per anno	Quota energia €/kWh
Tariffa MT	634,29	30,29	0,00052	778,01	31,95	0,0497
Tariffa BT	24,64	30,16	0,00117	794,40	36,43	0,04981
Tariffa BTVE	-	-	0,05806	-	-	0,103503

Partendo dall'analisi dei CAPEX, si osserva dalla Figura 2.10 che i costi di connessione alla rete costituiscono la parte più marginale della spesa iniziale, sia nel caso MT che BT. Per contro i *charger* rappresentano l'investimento più significativo in ogni configurazione. Come ci si aspettava, i sistemi di accumulo nelle configurazioni in BT coprono una parte importante del capitale iniziale, ben il 49% per l'accumulo *High-capacity* e il 35% per il *Peak-shaving*. La realizzazione della cabina di trasformazione per l'allaccio alla rete MT, presenta dei costi non trascurabili, ma comunque inferiori a quelli dei sistemi di accumulo. Complessivamente, infatti, la connessione in MT si dimostra la più conveniente dal punto di vista dell'investimento iniziale. Se in caso di accumulo *Peak-shaving* il divario non si dimostra così elevato, (con uno scarto di 40 k€), il cospicuo investimento per l'accumulo di grossa taglia, l'*High-capacity*, comporterebbe un incremento del capitale iniziale di circa il 43%, rispetto alla configurazione MT.

⁴ Le accise sono escluse in quanto costituiscono discriminante nell'analisi di confronto.

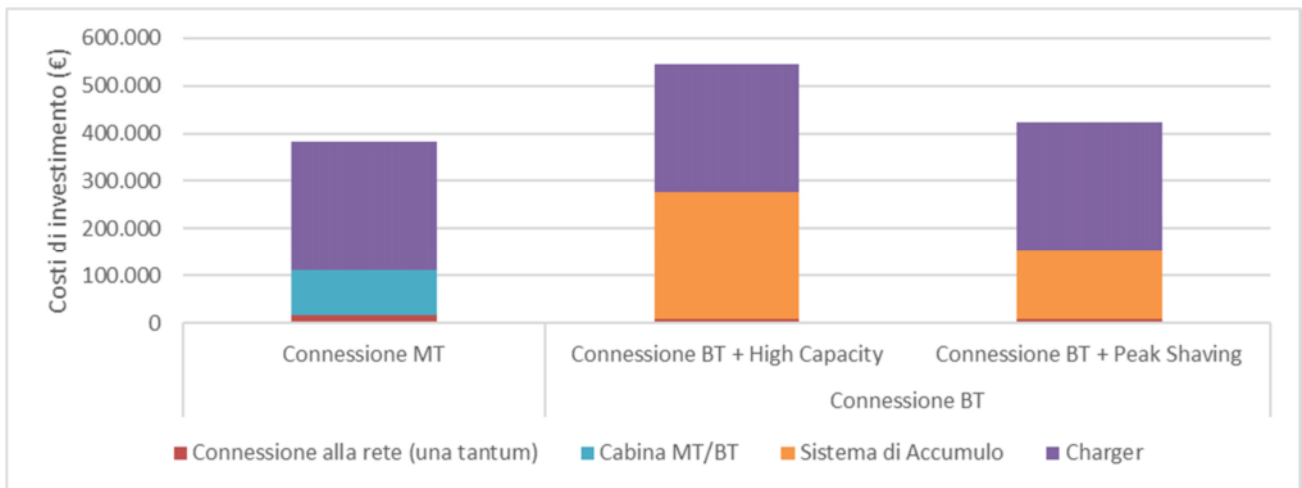


Figura 2.10 Confronto sui costi di investimento tra connessione in MT e connessione in BT.

La Figura 2.11, mostra il risultato dell'analisi di confronto sui costi operativi annuali. Si osserva che dal punto di vista degli OPEX la connessione in MT risulta complessivamente la più sconsigliata. Andando nel dettaglio delle varie componenti si nota che nei casi con sistemi di accumulo la spesa per la materia energia è ridotta, grazie alla possibilità di mettere in atto strategie di *energy shifting*, che permettono di stoccare energia a basso costo, per poi rierogarla durante gli orari più costosi. In tal senso, la configurazione con l'accumulo di grossa taglia, l'*High-capacity*, può spostare maggiori volumi di energia, incrementando il risparmio. Confrontando le soluzioni con tariffa MT e tariffa BT, risulta evidente il vantaggio conseguito dalle configurazioni con sistemi di accumulo in riferimento alla componente di Trasporto e Misura. Nel caso di connessione BT con accumulo, infatti, la riduzione della potenza di connessione limita significativamente il contributo della quota potenza, portando ad una riduzione totale della componente Trasporto di circa il 75%. Analogamente, la componente Oneri di sistema, penalizza la connessione in MT rispetto alla connessione in BT (tariffa BT), sempre in ragione della maggiore quota potenza. Soffermandosi sul caso della BTVE, gli ingenti volumi di energia erogati dalla stazione di ricarica nel presente caso studio, determinano dei costi piuttosto elevati sia per la componente Trasporto che Oneri (entrambe valorizzate con il corrispettivo in energia maggiorato), sfavorendo di fatto questa tariffazione, che come prima accennato si presta più a stazioni di ricarica in fase di avvio, con prelievi di energie più contenuti.

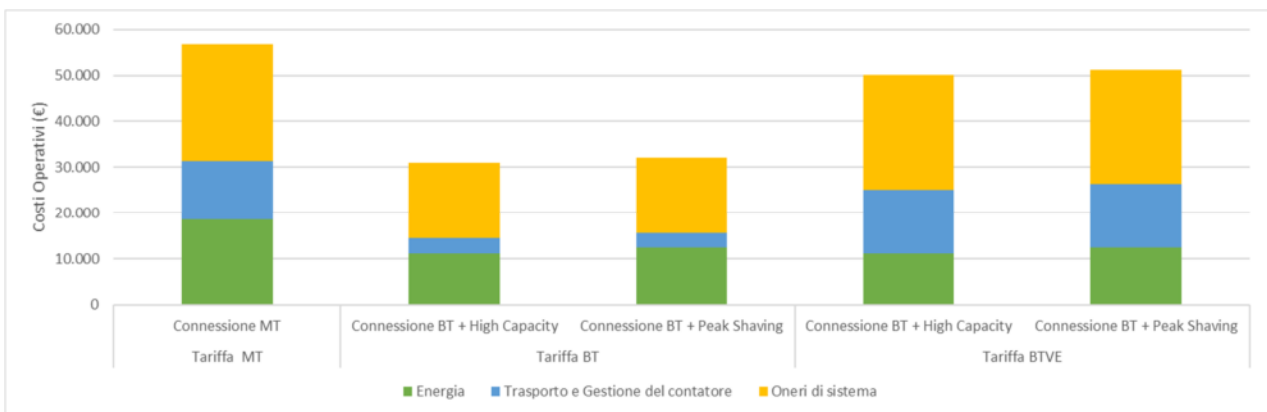


Figura 2.11 Confronto sui costi operativi tra connessione in MT e connessione in BT con tariffa BT e BTVE.

5 La stazione HPC sperimentale di RSE

RSE ha già approfondito le tematiche legate alla realizzazione e gestione dell'infrastruttura di ricarica a supporto della flotta elettrica aziendale, dotandosi di 24 punti di ricarica da 22 kW. Visti i recenti sviluppi tecnologici, nel corso del triennio di ricerca 2022-2024 si è concretizzato l'interesse di completare l'infrastruttura esistente con un sistema di ricarica HPC. Il fine è quello di analizzare le opportunità e criticità legate all'implementazione e l'esercizio di questa tipologia di infrastruttura, condividendo l'esperienza maturata nel corso dell'attività. In questo scenario si delinea inoltre la possibilità di sviluppare nuove soluzioni sia per l'architettura della stazione di ricarica HPC, che per la gestione delle ricariche, in relazione alla disponibilità della rete e della presenza di accumuli stazionari ed una sistema di generazione PV.

Si sottolinea infine che questo sistema di ricarica presenta delle sinergie con il Progetto di Ricerca di Sistema sull' "Evoluzione, pianificazione, gestione ed esercizio delle reti elettriche", nell'ambito del quale RSE sta sviluppando una micro-rete ibrida AC/DC. In quest'ottica si prevede che il sistema di ricarica, vista la presenza di numerosi elementi in DC (i *charger*, il SdA e i pannelli PV), potrà essere in futuro integrato nella micro-rete DC di RSE.

5.1 Definizione dell'architettura per la stazione di ricarica

L'architettura desiderata per il sistema in oggetto è rappresentata in Figura 2.12. Partendo da sinistra, si prevede una connessione alla rete di bassa tensione (400 V trifase) con massimo livello di potenza prelevabile di 100 kW.

La trasformazione AD/DC della alimentazione è assegnata ad un convertitore bidirezionale che andrà a commissionare un bus in DC a tre fili. Il bus esercito in DC, come precedentemente discusso, garantisce di eliminare gli stadi di conversione AC/DC a interfaccia degli elementi previsti, con una conseguente riduzione di ingombri, costi e perdite. La configurazione a tre conduttori, con un polo positivo, uno negativo e il punto medio, è stata adottata per facilitare l'integrazione del sistema nella micro-rete DC RSE, per la quale è previsto un potenziamento a tre conduttori [16]. Tale configurazione è particolarmente adatta ad applicazioni di medio/alta potenza, facilita la messa a terra e mostra una maggiore flessibilità rispetto alla tradizionale distribuzione a due fili. La presenza del punto medio neutrale, infatti, fornisce tre livelli di tensione: i carichi più importanti possono essere connessi a piena tensione tra il terminale positivo e quello negativo; mentre i carichi più piccoli possono essere collegati tra terminale positivo, o negativo, e il punto medio con livelli di tensione inferiori. Tuttavia, una rete DC a tre fili presenta una maggiore complessità, in quanto le unità connesse ad ogni polo possono assorbire o iniettare livelli di potenza diversi, che possono sbilanciare le tensioni dei due poli rispetto al neutro. Si rende quindi necessaria l'introduzione di un dispositivo, noto con il termine di *Voltage Balancer*, in grado di gestire gli sbilanciamenti tra il polo positivo e il polo negativo.

Il bus DC sarà infine esercito a tensione costante regolata in condizioni di parallelo alla rete dal convertitore AC/DC e in caso di isola dai convertitori DC/DC di interfaccia ai singoli componenti.

A completamento del sistema, per fornire una zona di ombra alle auto parcheggiate, si prevede di realizzare una pensilina di copertura e di sfruttarne la superficie per l'installazione di un sistema fotovoltaico. La dimensione dell'impianto FV sarà circoscritta dall'area occupata dai componenti della stazione di ricarica e dai posti auto; pertanto, si prevede che l'energia generata non darà un apporto significativo alla richiesta di ricarica. Tuttavia, l'installazione dei pannelli PV trova una razionale applicazione in ragione dello sfruttamento ottimale del suolo occupato e della possibilità di alimentare i carichi ausiliari del sistema.

Al fine di poter usare il sistema come *test-bed* a scopi di ricerca è inoltre fondamentale poter sperimentare diverse modalità di gestione, che passando attraverso la lettura delle grandezze elettriche, permettano di controllare i parametri dei convertitori e le loro modalità di funzionamento (scelta tra modalità controllo in potenza, in tensione, in tensione con droop). A questo scopo è stata prevista una apposita architettura di misura per rilevare i parametri di funzionamento nelle varie sezioni dell'impianto, sia AC che DC. I punti di misura sono identificati in Figura 2.12 con la lettera P e contornati in verde. L'intera stazione sarà poi gestita da un apposito SCADA, che consentirà il telecontrollo della stazione e l'acquisizione di tutti i parametri di funzionamento.

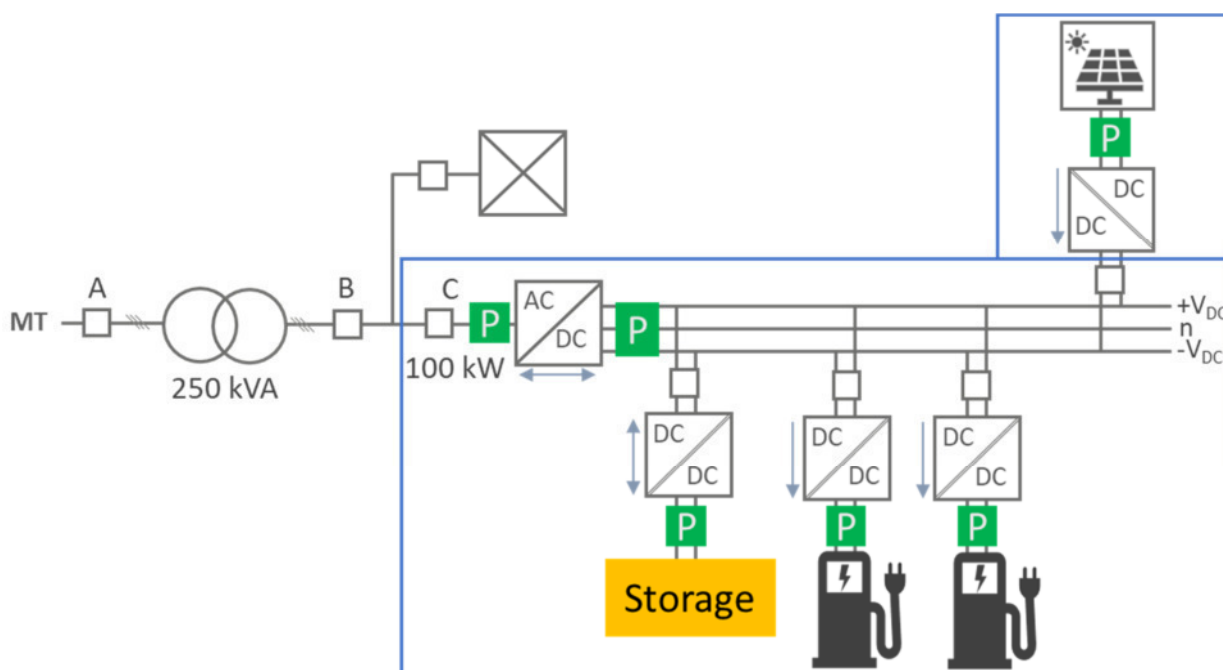


Figura 2.12 Architettura del sistema HPC integrato con accumulo e pensilina fotovoltaica da realizzare in RSE. I rettangoli in blu delimitano il sistema in oggetto, che sarà alimentato da una cabina MT/BT attraverso una connessione limitata a 100 kW. I quadrati verdi evidenziano i punti di misura.

Infine, l'intero sistema deve essere progettato in modo da garantire l'isolamento galvanico tra rete AC e DC.

5.2 Definizione dei requisiti per gli elementi del sistema

La stazione di ricarica si compone di diversi elementi che per essere integrati nell'architettura prescelta e poter svolgere attività sperimentali devono presentare caratteristiche ben precise. In questo paragrafo definiscono i requisiti per i componenti della stazione di ricarica, con particolare riferimento alle funzionalità richieste, le specifiche tecniche e tecnologiche.

Il convertitore AC/DC previsto a monte del sistema di ricarica dovrà garantire la bidirezionalità dei flussi con livelli di potenza fino a 100 kW. Ulteriori specifiche sono dettagliate di seguito:

- per la modalità raddrizzatore AC/DC: correzione del *Power Factor* auspicabile >0.99 ;
- per la modalità inverter DC/AC: controllo della potenza attiva e reattiva lato AC;
- possibilità di integrazione di controlli ad hoc in caso di erogazione di servizi alla rete;
- efficienza minima nominale 97%.

Il Bus DC sarà realizzato in configurazione a tre fili con conduttore positivo (+375 V), negativo (-375 V) e conduttore mediano. La tensione nominale tra conduttore positivo e negativo sarà di $750\text{ V} \pm 10\%$, con valore massimo di 850 V. Questa configurazione, oltre alle opportunità evidenziate in precedenza, determina la necessità di gestire gli sbilanciamenti tra il polo positivo e il polo negativo. Questa funzione deve essere assolta da un dispositivo denominato *Voltage Balancer* che ha il compito di ripristinare la tensione tra i poli e il neutro anche in presenza di sbilanciamenti di carico [17].

Per il Sistema di Accumulo, connesso al bus tramite dedicato convertitore DC/DC bidirezionale, si ritiene preferibile una chimica LFP, che offre una migliore stabilità termica e una buona competitività sui costi. Altri dettagli prestazionali sono elencati di seguito:

- potenza di scarica massima: 220 kW;
- potenza di ricarica massima (vincolata dalla rete): 100 kW;
- cicli di vita all'80% di scarica > 3000;
- efficienza di carica e scarica > 85%;

In base all'architettura definita nel precedente paragrafo il sistema di accumulo sarà connesso al bus DC tramite un dedicato convertitore DC/DC bidirezionale, le cui caratteristiche da un lato saranno asservite alle esigenze del sistema di accumulo (tensione lato accumulo e potenze), dall'altro dovranno essere coerenti con i livelli di tensione stabiliti per il bus DC. Per la presente applicazione, si ritiene ragionevole una struttura BB3L (Bipolar Bidirectional Three-Level).

Per il *charger*, che andrà a ricaricare le auto, sono richiesti due prese CCS Combo 2 standard EN 62196-3:2014. Ciascun connettore di ricarica, in caso di ricarica singola, deve essere in grado di erogare fino a 320 kW. Ai fini delle attività sperimentali sarà fondamentale poter intervenire sul processo di ricarica andando a variare dinamicamente la corrente erogata al veicolo. A completamento dei requisiti per l'elemento *charger* si richiede:

- tensione variabile di uscita nel *range*: 150 V_{dc} e 920 V_{dc} ;
- corrente di uscita almeno fino a 500 A;
- protocollo di comunicazione almeno OCPP 1.6, preferibile superiore;
- connessione tramite Router Wireless 3G/4G e ethernet.

La pensilina fotovoltaica dovrà offrire riparo da pioggia e sole alle auto parcheggiate, coprendo una superficie minima di circa 30 m², corrispondenti a due posti auto. L'infrastruttura a supporto della pensilina dovrà essere progettata in modo da garantire facilità di manovra e parcheggio delle auto. Per i pannelli fotovoltaici allocati sulla tettoia si richiede una efficienza superiore al 21%.

L'architettura di misura sarà fondamentale per conoscere gli stati di funzionamento dei singoli componenti e sulla base di questi sperimentare funzioni di gestione e controllo della stazione di ricarica. Le principali richieste per la parte di misura seguono:

- il punto di misura al nodo C in ingresso al convertitore AD/DC deve prevedere 3 misure AC di tensione e tre AC di corrente. Si richiede in questo nodo un analizzatore di rete (Janitza) con misura di corrente tramite bobine di Rogowsky;
- misure di corrente, tensione ed energia in uscita dai convertitori, lato DC, per ogni elemento connesso al bus DC. Precisione 1% del valore nominale o migliore;
- misure di corrente, tensione ed energia sul bus DC (positiva, negativa e di neutro rispetto a terra). Precisione 1% del valore nominale o migliore.

Gli strumenti di misura dovranno poter essere collegati a un server per l'acquisizione delle sue misure in modalità IEC 61850 o se non disponibile Modbus.

Infine, si dettagliano le richieste per il sistema di supervisione (misura comando), che dovrà essere basato sull'architettura messa a disposizione dalla piattaforma FINGER (Fog INtelliGent Edge Reactive) di RSE e mostrata in Figura 2.13. Il sistema dovrà supervisionare interruttori sia motorizzati che a stato solido utilizzando protocolli IEC 61850 o, se non disponibile, Modbus. Il sistema dovrà interfacciarsi con lo SCADA della Test Facility di Milano di RSE usando protocolli standard IEC 61850. Nello specifico, l'interfacciamento dovrà avvenire utilizzando una rete a fibre ottiche.

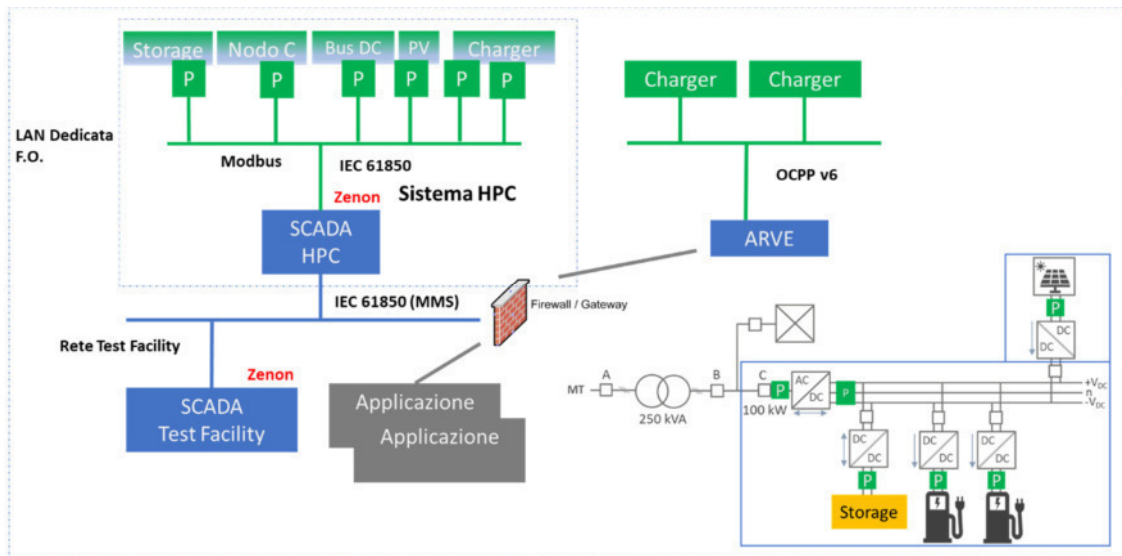


Figura 2.13 Architettura del Sistema di Supervisione.

Conclusioni

L'accettazione della mobilità elettrica è in continua crescita, e i sistemi High Power Charging (HPC) rappresentano un importante passo avanti per garantire tempi di ricarica rapidi e praticità agli utenti di veicoli elettrici. Con l'implementazione delle misure regolatorie a livello europeo e gli incentivi previsti nel PNRR, ci si aspetta una diffusione significativa dell'infrastruttura di ricarica HPC nei prossimi anni.

Tuttavia, l'integrazione dei sistemi HPC nell'attuale sistema elettrico richiederà una valutazione attenta, considerando le elevate potenze coinvolte. La connessione in media tensione (MT), come richiesta per potenze superiori a 200 kW, potrebbe non essere sempre disponibile. Inoltre, lo sviluppo della rete elettrica potrebbe richiedere più tempo rispetto alle necessità di installare infrastrutture di ricarica veloci. In questo contesto, l'utilizzo di sistemi HPC accoppiati con sistemi di accumulo locale offrono una valida soluzione, mitigando la necessità di nuove connessioni in media tensione. La presenza di un sistema di accumulo consente di gestire i picchi di potenza di ricarica, mantenendo una connessione in bassa tensione (BT), generalmente più diffusa e accessibile, aprendo alla possibilità di sfruttare le fonti di energia rinnovabile locali.

Al fine di investigare le prestazioni e i vantaggi di sistemi HPC integrati con sistemi di accumulo e connessi in BT è stato sviluppato e presentato un modello di simulazione che ha permesso di valutare diverse possibili configurazioni e logiche di gestione dei flussi energetici. Particolare attenzione è stata posta alla necessità di sviluppare un modello sufficientemente semplice ma anche sufficientemente accurato, in grado di replicare il comportamento dei vari elementi della stazione di ricarica. Lo strumento sviluppato modella l'arrivo dei veicoli e la loro richiesta di ricarica, il sistema HPC e la curva di potenza di ricarica, l'accumulo stazionario e la connessione ad una rete in BT. Nel modello sono inoltre implementate le logiche di gestione dei flussi di potenza che mirano a soddisfare la richiesta di ricarica dei veicoli sfruttando l'accumulo stazionario, che sopperisce ai picchi di potenza, tramite un'azione di *Peak-shaving*, e trasla i prelievi di energia nei momenti in cui il costo dell'energia è più basso – azione di *energy-shifting*.

Grazie alla scalabilità del modello, sono state poi messe a confronto due diverse configurazioni di sistemi di accumulo: un accumulo di grossa taglia, denominato *High-capacity*, che immagazzina di notte tutta l'energia per alimentare di giorno i veicoli, e un accumulo denominato *Peak-shaving*, che copre solo una parte della potenza di ricarica dei veicoli, ovvero quella eccedente rispetto alla potenza erogabile in rete. Simulando i profili di funzionamento giornaliero della stazione HPC, è stato possibile identificare le rispettive taglie di accumulo, per poi andare ad analizzare i costi capitale e i costi operativi legati alla fornitura di energia.

Le due soluzioni di stazioni HPC connesse in BT e integrate con accumulo sono state inoltre messe a confronto sul piano economico con una stazione HPC connessa direttamente in MT, che non prevede quindi l'accumulo, ma necessita di una stazione secondaria MT/BT.

I risultati mostrano che, seppur i sistemi di accumulo non costituiscano la quota maggioritaria del capitale iniziale, contribuiscono ad aumentare i costi rispetto alla soluzione con connessione in MT, che si dimostra la soluzione più conveniente dal punto di vista degli investimenti iniziali. Si riscontra tuttavia che questo vantaggio è veramente limitato se confrontato con il caso *Peak-shaving*, dove l'accumulo di taglia più piccola non comporta un significativo aumento del capitale iniziale. Dal punto di vista operativo invece emerge nettamente il vantaggio delle configurazioni con sistema di accumulo stazionario, che rispetto alla soluzione MT abbattano i costi legati alla fornitura di energia di circa il 45%. Questi, infatti, limitando la potenza di connessione alla rete, riducono significativamente le componenti della bolletta relative al "Trasporto e misura" e "Oneri di sistema" entrambe valorizzate con una quota potenza. Inoltre, si contrae, anche se in misura minore, la spesa per la materia energia grazie alle azioni di *energy shifting* svolte dagli accumuli.

Complessivamente, la configurazione HPC con accumulo *Peak-shaving* risulta la più conveniente in quanto presenta un investimento iniziale più contenuto, vista la minore taglia dell'accumulo, e consente quasi di dimezzare i costi operativi rispetto alla soluzione con connessione in MT.

In conclusione, grazie alle analisi svolte è possibile affermare che i sistemi di ricarica HPC connessi in BT e integrati con sistemi di accumulo sono una valida soluzione per favorire lo sviluppo dell'infrastruttura di ricarica veloce, sfruttando al meglio le connessioni già esistenti e garantendo al tempo stesso delle ottime prestazioni di sistema ed economiche.

Bibliografia

- [1] European Commission, «Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council,» 2021.
- [2] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, «Colonnine di ricarica per veicoli elettrici: al via la consultazione sulla misura PNRR,» [Online]. Available: <https://www.mase.gov.it/notizie/colonnine-di-ricarica-veicoli-elettrici-al-la-consultazione-sulla-misura-pnrr>.
- [3] KIA, «The EV6 Specifications,» [Online]. Available: <https://www.kia.com/content/dam/kwcms/kme/uk/en/assets/vehicles/EV6/Specification/EV6-specification.pdf>.
- [4] Lotus, «LOTUS ELETRE,» [Online]. Available: <https://media.lotuscars.com/en/news-articles/lotus-eletre-the-world%E2%80%99s-first-electric-hyper-suv.html>.
- [5] Porsche, «Sofisticata gestione termica, tensione di sistema di 800 volt,» [Online]. Available: <https://media.porsche.com/mediakit/taycan/it/porsche-taycan/die-batterie>.
- [6] Porche, «Taycan Turbo,» [Online]. Available: <https://www.porsche.com/italy/models/taycan/taycan-models/taycan-turbo/>.
- [7] Autorità di regolazione per energia reti e ambiente, «iniziative regolatorie a supporto della progressiva decarbonizzazione dei consumi e per l'attuazione delle disposizioni contenute nel D.lgs. 210/2021 e nel D.lgs. 199/2021 in tema di mobilità elettrica,» 2022.
- [8] ADS-TEC, «High Power Charging n the power-limited grid,» [Online]. Available: https://www.ads-tec.de/fileadmin/download/doc/brochure/Brochure_HPC_EN.pdf.
- [9] Numbat, «Fast charging infrastructure with battery storage,» [Online]. Available: <https://numbat.energy/en/corporate-customers/fast-charging-infrastructure-with-battery-storage>.
- [10] NIDEC, «EV Charging System,» [Online]. Available: <https://www.nidec-industrial.com/wp-content/uploads/2021/03/Brochure-EV-Charging-Infrastructure.pdf>.
- [11] FCS Mobility, «Experience Power Zone,» [Online]. Available: <https://www.mobilityfcs.com/epz-experience-power-zone/>.
- [12] Ingeatam, «The ULTRA-RAPID chargign station,» [Online]. Available: <https://www.ingeatam.com/Download/4248/attachment/ingerev-rapidst-en.pdf.aspx>.
- [13] Kreisel, «Chimero 240,» [Online]. Available: <https://online.anyflip.com/asdjp/poks/mobile/>.
- [14] Ionity, «New Year, Same Electric Commitment,» [Online]. Available: <https://ionity.eu/en/stories/new-year-same-electric>.
- [15] M. Ceraolo, G. Lutzemberger e T. Huria, «Experimentally-Determined Models for High-Power Lithium Batteries,» *SAE International*, 2011.
- [16] Fastned, «Why fast charging stations are good for the grid,» 2020. [Online]. Available: <https://fastnedcharging.com/hq/why-fast-charging-stations-are-good-for-the-grid/>.
- [17] ARERA, «Tariffe di distribuzione,» [Online]. Available: <https://www.arera.it/it/elettricit/a/distr.htm>.
- [18] ARERA, «Oneri generali di sistema e ulteriori componenti,» [Online]. Available: <https://www.arera.it/it/elettricit/a/uc.htm>.
- [19] L. Barbieri, D. Cavaliere, G. D'Avanzo, C. Gandolfi, R. Lazzari, R. Malgesini, D. Palladini e M. Zanoni, «Progettazione di un sistema di misura e protezione del dimostratore MT/BT e integrazione della rete ibrida,» Report Mission Innovetion, 2022.

Analisi tecnico-economica dell'integrazione di strutture di ricarica per veicoli elettrici in reti di distribuzione

Autori: *Mauro Tarraran, Fabio Bignucolo*

1 Mobilità elettrica

Il settore dei trasporti è ritenuto essere una delle principali fonti di emissioni inquinanti. I veicoli elettrici hanno attirato un crescente interesse come soluzione per ridurre l'inquinamento, in abbinamento alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, di conseguenza il mercato globale dei veicoli elettrici è in piena espansione. Tale soluzione risulta essere valida se si considerano i dati emersi relativi alle emissioni dei gas serra (GHG): nel 2019 il numero di gas serra totali emessi a causa dell'elettricità generata per il consumo dai veicoli elettrici è stato di 51 Mt-CO₂-eq¹, ovvero circa la metà dei GHG totali emessi da altrettanti veicoli a combustione interna in quell'anno [1].

La transizione dei veicoli verso l'alimentazione elettrica si traduce però in una serie di problematiche che devono essere affrontate. Se da un lato l'elettrificazione della mobilità comporta molte conseguenze positive per l'ambiente, dall'altro introduce un aumento della domanda elettrica e, potenzialmente, tematiche di stabilità e regolazione dei sistemi di trasmissione e distribuzione conseguenti alle elevate potenze necessarie per garantire tempi di ricarica non troppo lunghi. Queste problematiche non sono banali e le soluzioni per affrontarle sono numerose e complesse. Ovviamente risulta essere necessario un aumento della produzione di elettricità per il previsto aumento dei consumi, nonché uno sviluppo di un'infrastruttura sufficientemente grande per la ricarica di tali mezzi. Inoltre, affinché i veicoli elettrici possano raggiungere il loro pieno potenziale di mitigazione delle emissioni di carbonio, sono necessari grandi progressi per la decarbonizzazione della produzione di elettricità, per la costruzione e l'integrazione nelle reti elettriche di infrastrutture di ricarica e per la produzione sostenibile di batterie, nonché per il loro riciclaggio. Infine, per rendere i veicoli elettrici competitivi sul mercato, è necessario risolvere una serie di sfide, come la riduzione del costo della batteria, strategie di ricarica efficienti, l'interoperabilità delle stazioni di ricarica e l'impatto dell'integrazione dei veicoli elettrici nella rete [2].

Si sente parlare sempre più spesso del concetto di "veicolo verso la rete" (*Vehicle to Grid, V2G*), per risolvere gli attuali ostacoli e problemi di gestione della rete elettrica regolando la domanda e l'offerta di energia contemporaneamente, anche come una delle possibili soluzioni in caso di energia prodotta da fonti rinnovabili non programmabili. In particolare, il termine V2G è usato in generale per indicare il flusso di elettricità in entrambe le direzioni (sia da che verso la rete). Tale concetto risulta essere di particolare interesse, soprattutto se si considera che in media le automobili viaggiano solo per il 5% della giornata, mentre per circa il 90% del tempo sono inutilizzate e parcheggiate in lotti [3]. I veicoli elettrici inutilizzati possono potenzialmente aiutare a supportare la rete, se pensati come dei "sistemi di stoccaggio su ruote" in grado di

¹1 Mt è un milione di tonnellate mentre CO₂-eq è una misura che esprime l'impatto sul riscaldamento globale di una certa quantità di gas serra rispetto alla stessa quantità di anidride carbonica.

assorbire e fornire energia quando connessi alla rete. È interessante investigare, da un punto di vista tecnico ed economico, i vantaggi conseguibili sia dai gestori della rete di distribuzione (in particolare i distributori in Media e Bassa Tensione, DSO²) che dai proprietari dei veicoli elettrici, nello sfruttare una flotta di auto connesse alla rete e abilitate al V2G.

In questo articolo si descrivono brevemente i principali risultati ottenuti dal lavoro di ricerca dal titolo “Analisi tecnico-economica dell’integrazione di strutture di ricarica per veicoli elettrici in reti di distribuzione” condotto da Mauro Tarraran durante il percorso di tesi magistrale in Ingegneria dell’Energia Elettrica presso l’Università degli Studi di Padova. La tesi, che riprende e sviluppa una ricerca precedente [5], ha avuto come relatore il prof. Fabio Bignucolo [4], che svolge diverse attività di ricerca nell’ambito dello sviluppo delle *smart grids* e dell’interazione ottimizzata, sul piano tecnico ed economico, tra il sistema elettrico e le infrastrutture di ricarica.

2 Analisi economica V2G

Approfondendo il concetto del V2G con un occhio di riguardo agli aspetti economici, è possibile definire tre modalità di ricarica: semplice, intelligente senza V2G e intelligente con V2G. Queste tipologie di ricarica sono illustrate nei prossimi paragrafi.

2.1 Ricarica semplice

La ricarica avviene appena l’utente collega l’auto alla colonnina. L’utente deve riconoscere il costo per l’acquisto dell’energia per la ricarica dell’auto, maggiorato di un coefficiente per tenere in considerazione l’ammortamento del costo dell’infrastruttura di ricarica. L’auto sarà ricaricata il prima possibile, in modo da raggiungere uno stato di carica finale desiderato dall’utente, a partire dallo stato di carica rilevato dalla colonnina al momento della connessione.

2.2 Ricarica intelligente

Rispetto alla ricarica semplice, che è quella che richiede il minore tempo, l’utente si rende disponibile ad accettare una ricarica più lenta e dilazionata nel tempo. A questo corrisponde uno sconto sul costo dell’energia per la ricarica, in particolare una riduzione dei costi attribuiti alla realizzazione dell’infrastruttura di ricarica. Un approccio di questo tipo consente al distributore di modulare la ricarica riducendo la qualità di potenza richiesta istantaneamente alla rete, mentre si traduce in un contenimento dei costi di ricarica per l’utente. È quindi possibile applicare agevolmente questa logica di funzionamento ai contesti dove non è richiesta una elevata ed immediata ricarica del veicolo, ad esempio se l’auto è lasciata sul luogo di lavoro ed è sufficiente che l’utente la ritrovi carica al termine del suo turno lavorativo, eventualmente imponendo uno stato minimo di ricarica qualora ci fosse un’emergenza che richiede di anticipare l’utilizzo dell’auto.

² Il DSO (Distribution System Operator) è il gestore della rete elettrica, in questo articolo è considerato essere anche il gestore dell’infrastruttura di ricarica.

2.3 Ricarica intelligente con V2G

L'utente mette a disposizione della rete la propria batteria, a condizione che il veicolo sia effettivamente caricato al livello desiderato all'ora impostata per la sconnessione. L'infrastruttura di ricarica può gestire il processo di carica nella finestra di tempo indicata dall'utente e può anche scaricare la batteria qualora la rete ne abbia necessità, ad esempio per fronteggiare un improvviso picco di carico oppure una perdita imprevista di generazione fotovoltaica. Se la batteria del veicolo viene scaricata per erogare servizi di rete, l'utente riceve una extra-remunerazione che sovra-compensa il suo costo correlato con l'invecchiamento della batteria. Questo approccio comporta un costo addizionale per il distributore, che però gli consente di risolvere alcuni problemi di gestione del sistema di distribuzione che altrimenti richiederebbero costosi investimenti che in questo modo possono essere differiti o evitati. È quindi questa la configurazione che, da un lato, minimizza l'impatto sulla rete dell'infrastruttura di ricarica, che diventa una risorsa di regolazione per il sistema elettrico e non un mero aggravio di carico, dall'altro, consente di ridurre in modo marcato i costi di ricarica per l'utente. In questa tipologia di ricarica si garantisce agli stessi utenti la possibilità di esprimere la propria volontà a far scaricare o no la propria auto durante il tempo di connessione. Ciò è possibile tramite un parametro denominato *Incentivo* che di fatto è semplicemente un fattore moltiplicativo del costo del degrado della batteria e il cui valore è definito inizialmente dall'utente. Alcuni approfondimenti sono riportati nel prossimo paragrafo.

3 Problema di ottimizzazione

Senza entrare in troppi dettagli tecnici, è stato implementato questo problema della ricarica in un risolutore numerico per verificare se il metodo di remunerazione descritto in precedenza risulta essere valido. Tale problema presenta una funzione obiettivo da minimizzare considerando i vincoli tecnici necessari per rispettare le leggi dell'elettrotecnica. Relativamente alla funzione obiettivo, questa può essere il costo globale o il costo del solo DSO. Il costo del DSO comprende le perdite in rete, i vari costi per la gestione e funzionamento della rete e lo sconto nel prezzo di ricarica per i clienti che, partecipando al V2G, vanno incontro a un maggiore degrado della batteria e a un tempo aggiuntivo di ricarica. Nel costo globale, oltre il costo del DSO, si aggiunge il costo della ricarica di tutti gli utenti.

Relativamente alla minimizzazione del costo globale, è possibile considerare che il DSO vende il servizio di ricarica ad un costo costante per ogni Wh di energia, al contempo, in relazione ai vincoli di ricarica (ora di inizio e fine connessione, SoC³ iniziale e finale) e conoscendo il profilo giornaliero di costo dell'energia, esso tenta contestualmente di effettuare le ricariche quando il costo dell'energia è minore e usa i veicoli per regolarsi la rete, ove possibile. Ciò si tramuta economicamente nella disponibilità della batteria a rimanere connessa e disponibile per un tempo maggiore del tempo minimo di ricarica ed eventualmente nella disponibilità della batteria a farsi scaricare/caricare (aumentandone il degrado rispetto alla carica semplice). La disponibilità dell'utente a rimanere connesso e a far scaricare/caricare la batteria maggiormente rispetto alla carica minima necessaria per raggiungere il SoC richiesto si tramuta in un costo che il DSO sostiene e riversa all'utente come sconto sulla ricarica rispetto al prezzo fisso dell'energia. Così il DSO fa business sulla ricarica (garantendo all'utilizzatore un costo fisso dell'energia) e ottimizza al contempo la gestione delle reti. In questo approccio non è necessario

³ SoC (State of Charge): indica lo stato di carica della batteria, è pari a 1 se la batteria è completamente carica, 0 se completamente scarica.

conoscere quale è il costo fisso assicurato all'utente per la ricarica, in quanto sarebbe semplicemente un delta da sommare a tutte le configurazioni ottimizzate.

Riguardo la minimizzazione del solo costo del DSO, l'ottimizzatore imporrà la scarica delle auto solo quando necessario per la risolvibilità del problema (ad esempio, per rispettare i vincoli di variazione della tensione imposti ai nodi della rete). Ciò perché il degrado della batteria è un costo a spese del DSO di cui l'utente beneficia come sconto nel prezzo della ricarica.

Da quanto appena spiegato si capisce come il termine *Incentivo* va ad influenzare la scarica del veicolo durante il tempi di connessione. Ricordandoci che tale termine è il coefficiente moltiplicativo del costo relativo all'invecchiamento della batteria, se si imposta come funzione obiettivo il costo del DSO, l'ottimizzatore tende a scaricare veicoli che presentano un *Incentivo* basso al fine di ridurre il costo del degrado della batteria. Pertanto se un proprietario di un veicolo elettrico non è disponibile a far scaricare il proprio veicolo, esso imposterà al momento della connessione un valore elevato di *Incentivo*. Tra gli altri parametri che entrano in gioco nella programmazione della carica e scarica dei veicoli ci sono appunto il costo del degrado della batteria dovuto ai cicli di carica e scarica, il tempo di connessione e il prezzo giornaliero dell'energia che definisce gli orari ottimali per lo scambio di energia tra i veicoli e la rete.

La rete elettrica utilizzata è ricavata dal documento Cigré di luglio 2009 relativo all'integrazione in rete di risorse energetiche rinnovabili e distribuite [6]. In particolare, da tale documento, è stato utilizzato lo schema, leggermente modificato, della rete di distribuzione in media tensione europea. Il dettaglio inedito della rete studiata in questo lavoro di tesi riguarda l'aggiunta dell'infrastruttura di ricarica che, tramite i suoi componenti (trasformatori, inverter e bus in continua), costituisce una sorta di magliatura nella rete. Lo schema della rete utilizzata è riportato nella Figura 3.1.

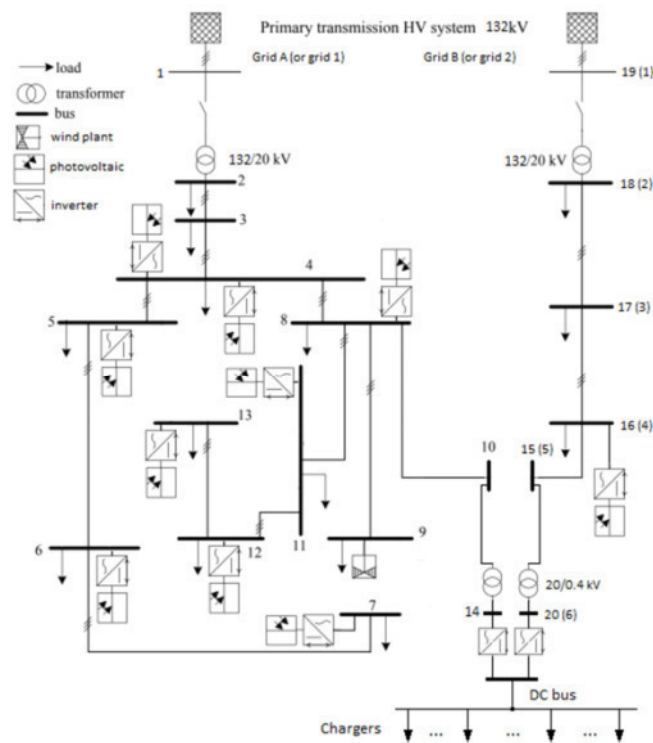


Figura 3.1 Rete elettrica utilizzata nelle simulazioni con configurazione magliata

Come si nota nella Figura 3.1 l'impianto di ricarica dei veicoli elettrici connette due reti distinte, a cui ci si riferirà nel corso di questo articolo come "rete di sinistra" e "rete di destra". Nelle

simulazioni svolte si studieranno anche i casi con l'infrastruttura di ricarica connessa solamente alla rete di sinistra o solamente a quella di destra e il caso con due infrastrutture di dimensioni dimezzate connesse radialmente nelle due reti. Gli schemi di queste reti sono riportati in Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4.

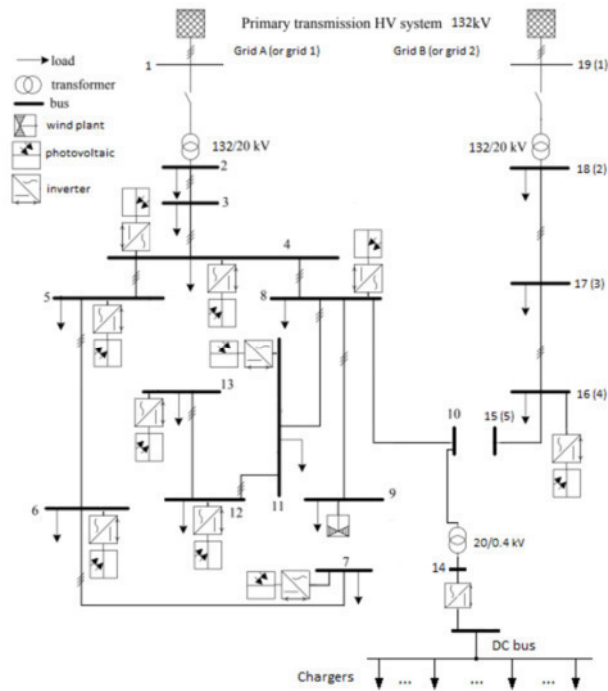


Figura 3.2 Rete elettrica utilizzata nelle simulazioni con configurazione radiale con auto connesse nella rete di sinistra

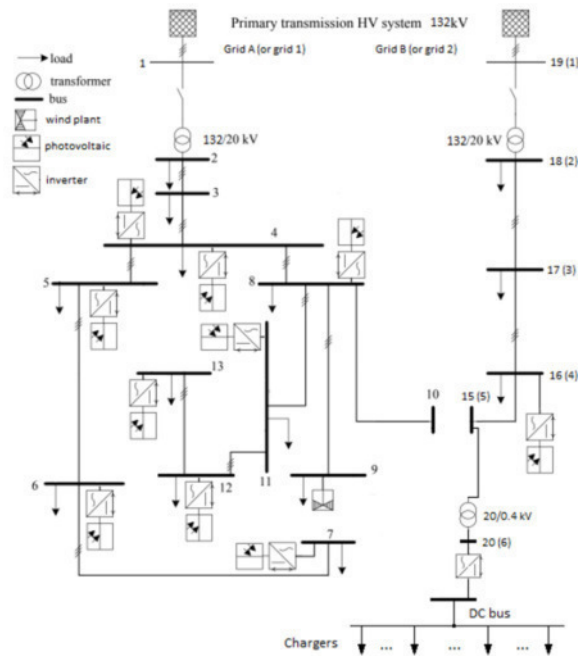


Figura 3.3 Rete elettrica utilizzata nelle simulazioni con configurazione radiale con auto connesse nella rete di destra

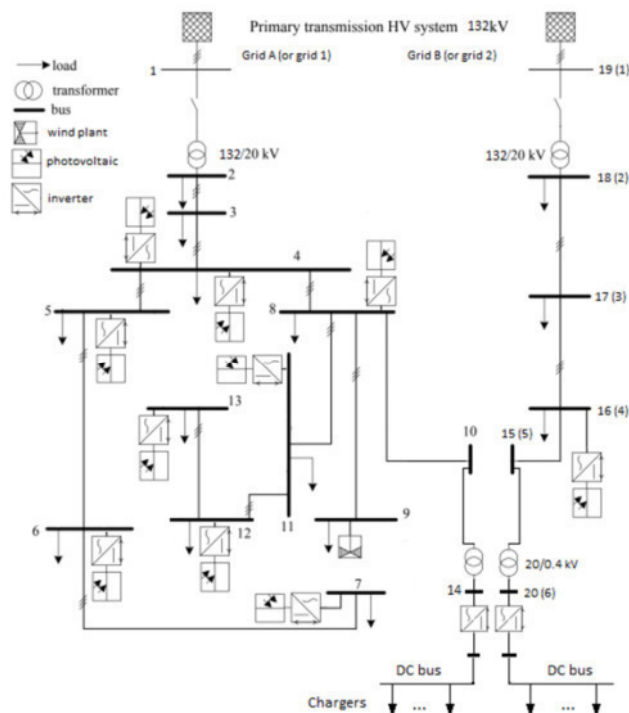


Figura 3.4 Rete elettrica utilizzata nelle simulazioni con configurazione radiale con auto connesse metà nella rete di sinistra e metà nella rete di destra

Per quanto riguarda l'infrastruttura di ricarica, essa necessita la connessione di un trasformatore MT/BT (media tensione/bassa tensione) in un nodo della rete, nel secondario di tale trasformatore vi è poi connesso un raddrizzatore bidirezionale. Le colonnine sono poi connesse tramite una linea in continua (DC bus). Nella Figura 3.5 è rappresentato uno schema della connessione dell'infrastruttura di ricarica alla rete di distribuzione.

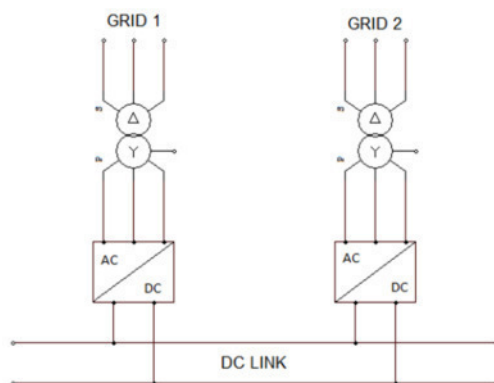


Figura 3.5 Schema di connessione all'infrastruttura di ricarica [5]

Nelle simulazioni viene variato il limite di tensione ammesso per verificare i vantaggi della configurazione magliata rispetto a una configurazione radiale. Le simulazioni sono eseguite in un orizzonte temporale totale di 24 ore, suddiviso in intervalli di tempo di 15 minuti.

3.1 Caricatori e veicoli elettrici

Si è considerato che ogni colonnina, con potenza nominale di carica e scarica di 100kW, permetta la connessione di al massimo 4 veicoli. Ci sono in totale 10 colonnine e ciascuna di esse permette la carica o scarica di un veicolo alla volta. I veicoli elettrici, che presentano tutti una batteria di capacità pari a 90kWh, sono in totale 40. In questo modo si ha una taglia dell'infrastruttura di 1MW (potenza massima di ricarica dei veicoli è 100kW e al massimo è possibile ricaricare 10 veicoli contemporaneamente). La realtà rappresentata si avvicina quindi a quello che può essere il parcheggio di un grande centro commerciale o di una grande azienda. Per una maggiore comprensione dei risultati ottenuti dalle simulazioni e riportati nei prossimi paragrafi, nella Tabella 3.1 sono elencati i parametri della ricarica dei 40 veicoli elettrici.

Tabella 3.1 Parametri di ricarica dei veicoli elettrici

Veicolo	SoC iniziale	SoC finale	Inizio connessione [h]	Fine connessione [h]	Delta SoC	Tempo di sosta [h]	Tempo minimo di carica [h]	Tempo aggiuntivo di sosta [h]	Incentivo
1	0,5	0,9	6,25	21,75	0,4	15,5	0,38	15,12	2
2	0,3	1	21,25	22,5	0,7	1,25	0,66	0,59	1
3	0,5	1	17,5	19,75	0,5	2,25	0,47	1,78	2
4	0,3	1	14,25	20,25	0,7	6	0,66	5,34	2
5	0,5	1	5,5	13,25	0,5	7,75	0,47	7,28	2
6	0,3	0,7	18,5	21,5	0,4	3	0,38	2,62	1
7	0,3	0,7	7	23,5	0,4	16,5	0,38	16,12	1
8	0,2	0,9	12,25	13	0,7	0,75	0,66	0,09	1
9	0,3	0,7	11,25	18,75	0,4	7,5	0,38	7,12	2
10	0,4	0,9	19,5	22,25	0,5	2,75	0,47	2,28	2
11	0,5	0,9	13,25	22,25	0,4	9	0,38	8,62	1
12	0,5	1	15,75	16,75	0,5	1	0,47	0,53	2
13	0,5	1	16	22,25	0,5	6,25	0,47	5,78	2
14	0,4	0,9	5,25	8,75	0,5	3,5	0,47	3,03	2
15	0,5	1	20	22	0,5	2	0,47	1,53	2
16	0,3	0,9	20,25	21,25	0,6	1	0,57	0,43	1
17	0,1	0,8	19,5	21,25	0,7	1,75	0,66	1,09	1
18	0,4	0,9	19,25	21,75	0,5	2,5	0,47	2,03	2
19	0,6	0,9	16,25	19	0,3	2,75	0,28	2,47	2
20	0,3	0,8	21,75	23,25	0,5	1,5	0,47	1,03	2
21	0,5	0,9	10,5	12,75	0,4	2,25	0,38	1,87	1
22	0,3	0,9	4,25	20,5	0,6	16,25	0,57	15,68	2
23	0,6	1	11,75	15,25	0,4	3,5	0,38	3,12	2
24	0,4	0,8	4,75	13	0,4	8,25	0,38	7,87	1
25	0,2	0,6	9	15,75	0,4	6,75	0,38	6,37	1
26	0,6	0,9	11,75	21,5	0,3	9,75	0,28	9,47	1

Veicolo	SoC iniziale	SoC finale	Inizio connessione [h]	Fine connessione [h]	Delta SoC	Tempo di sosta [h]	Tempo minimo di carica [h]	Tempo aggiuntivo di sosta [h]	Incentivo
27	0,1	0,9	0,5	10	0,8	9,5	0,76	8,74	2
28	0,1	0,5	8,75	10	0,4	1,25	0,38	0,87	1
29	0,1	0,6	0,25	18,25	0,5	18	0,47	17,53	2
30	0,3	0,9	7,75	14,75	0,6	7	0,57	6,43	1
31	0,3	0,8	3,25	8,75	0,5	5,5	0,47	5,03	1
32	0,2	0,8	20	22,5	0,6	2,5	0,57	1,93	1
33	0,4	0,8	12,5	21,25	0,4	8,75	0,38	8,37	2
34	0,5	0,8	19,25	19,75	0,3	0,5	0,28	0,22	1
35	0,5	0,8	5,75	12	0,3	6,25	0,28	5,97	1
36	0,4	1	2,5	4,25	0,6	1,75	0,57	1,18	1
37	0,2	0,6	1,5	19,5	0,4	18	0,38	17,62	2
38	0,4	0,8	6,25	10,75	0,4	4,5	0,38	4,12	1
39	0,3	0,6	6,5	12,25	0,3	5,75	0,28	5,47	2
40	0,2	0,7	1	14,5	0,5	13,5	0,47	13,03	1

4 Simulazioni

Sono state eseguite varie simulazioni. Riassumendo quanto detto in precedenza, le configurazioni studiate sono le seguenti:

- magliata: dove l'infrastruttura di ricarica è connessa tramite le coppie inverter/trafi sia alla rete di sinistra che a quella di destra;
- radiale sinistra: dove l'infrastruttura di ricarica è connessa solo alla rete di sinistra;
- radiale destra: dove l'infrastruttura di ricarica è connessa solo alla rete di destra;
- radiale sinistra e destra: dove sono presenti due infrastrutture di ricarica, una connessa alla rete di sinistra e una alla rete di destra. In questo caso ciascuna rete ha connessi metà colonnine e metà veicoli elettrici (le due infrastrutture di ricarica presentano metà colonnine rispetto l'infrastruttura delle prime tre configurazioni).

Per ogni configurazione sono stati impostati limiti ammessi di variazione di tensione nei nodi della rete di distribuzione sempre più stringenti, partendo dal $\pm 5\%$ e arrivando fino al $\pm 1\%$. Sono state condotte altre simulazioni variando i dati in ingresso come l'andamento del prezzo giornaliero dell'energia e il valore dei termini *Incentivo*. Nei prossimi paragrafi sono riportati i vari risultati con le relative considerazioni.

4.1 Confronto risultati configurazioni con minimizzazione costo globale

Nella Tabella 3.2 è indicata la risolubilità delle varie configurazioni eseguite con minimizzazione costo globale.

Tabella 3.2 Confronto tra le varie configurazioni. Minimizzazione costo globale, *Incentivo* pari a 1 o 2

	Tensione $\pm 5\%$	Tensione $\pm 3\%$	Tensione $\pm 2\%$	Tensione $\pm 1\%$
Magliata	Risolubile	Risolubile	Risolubile	Non Risolubile
Radiale auto a	Risolubile	Risolubile	Risolubile	Non Risolubile
Radiale auto a	Risolubile	Risolubile	Non Risolubile	Non Risolubile
Radiale auto	Risolubile	Risolubile	Risolubile	Non Risolubile

Nella Figura 3.6 è presente un confronto del costo giornaliero del DSO nelle varie configurazioni, mentre nella Figura 3.7 è riportato l'ammontare delle perdite in rete.

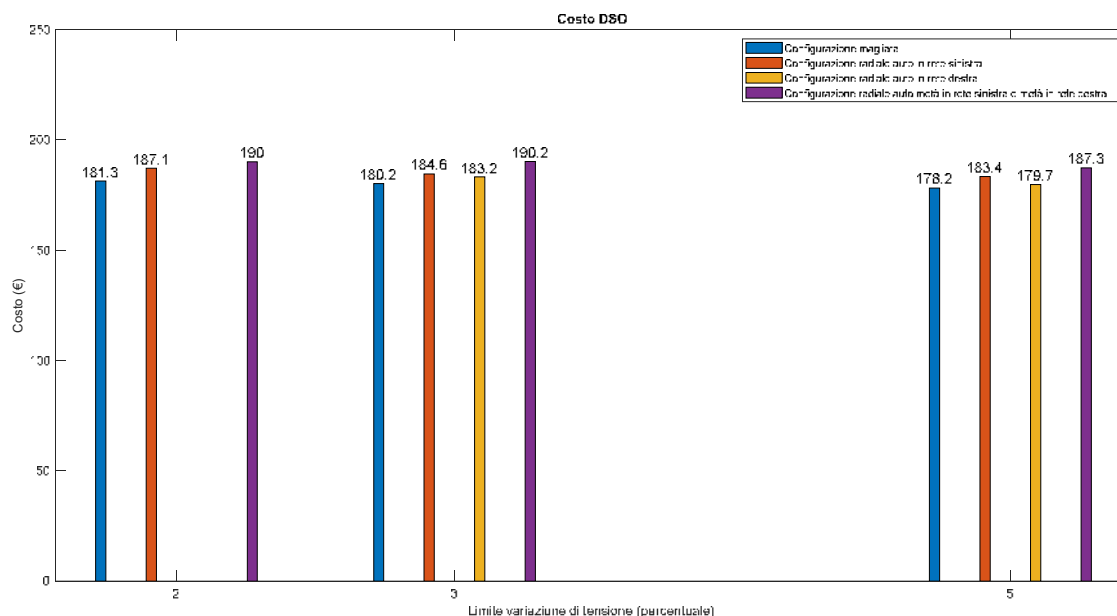


Figura 3.6 Confronto costo del DSO nelle varie configurazioni. Minimizzazione costo globale, *Incentivo* pari a 1 o 2

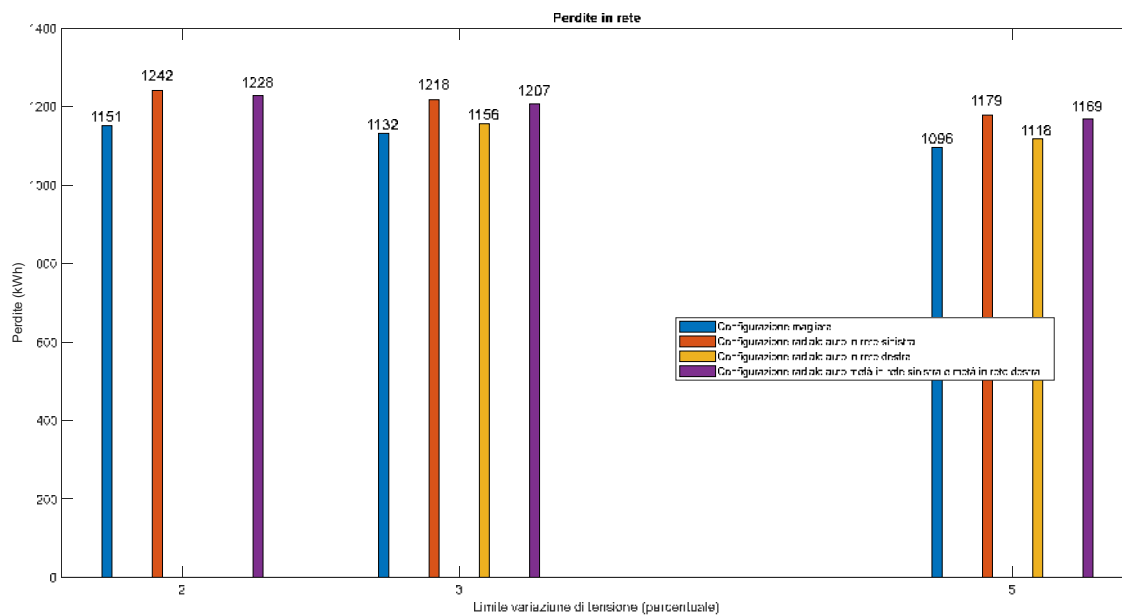


Figura 3.7 Confronto perdite in rete nelle varie configurazioni. Minimizzazione costo globale, Incentivo pari a 1 o 2

In conclusione, si nota che la configurazione radiale con auto connesse alla rete destra non è risolvibile nel caso di limite di variazione della tensione del $\pm 2\%$ in quanto non si è in grado di far rispettare tale vincolo nei nodi della rete sinistra. Da un punto di vista economico si può affermare che la configurazione magliata è quella più vantaggiosa da parte del DSO. Il costo inferiore del DSO nella configurazione a doppia connessione rispecchia anche le minori perdite in rete di tale configurazione. Ciò è un valore aggiunto alla configurazione magliata e ne giustifica il maggiore costo di realizzazione.

4.2 Confronto tra configurazione magliata e radiale

È stato svolto nello specifico un confronto tra la configurazione magliata e radiale con auto connesse a sinistra. Le simulazioni sono state eseguite con limite di variazione della tensione del $\pm 3\%$, *Incentivo* pari a 2 per tutti i veicoli e minimizzazione del solo costo del DSO. I risultati e le considerazioni sono riportati nei prossimi paragrafi.

4.2.1 Configurazione magliata

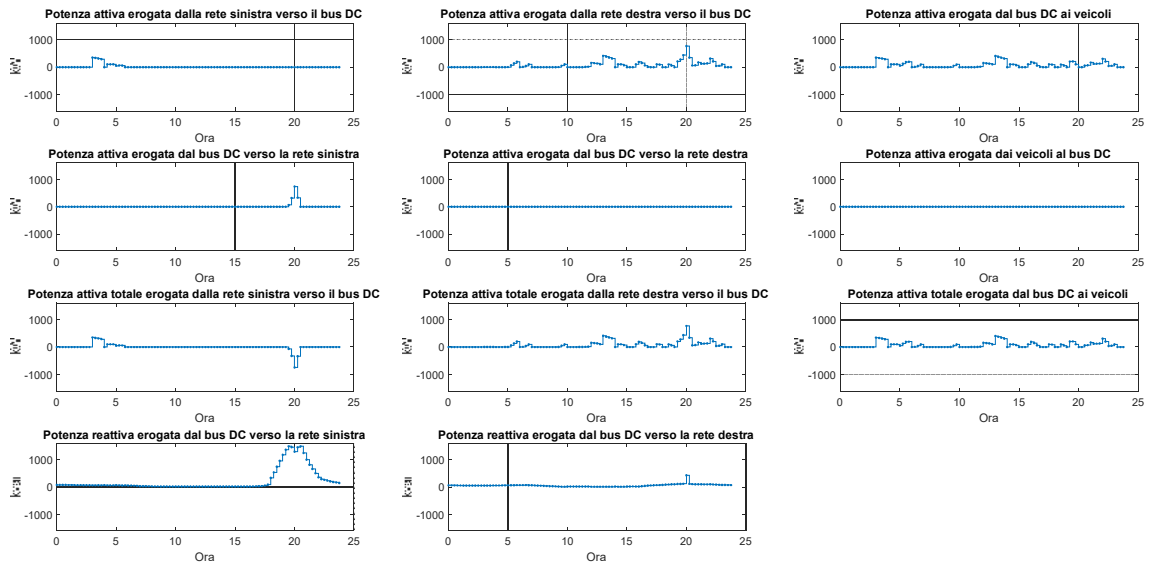


Figura 3.8 Scambi di potenza nel bus DC. Configurazione magliata, minimizzazione costo DSO, *Incentivo* pari a 2, limite di tensione del $\pm 3\%$

Tabella 3.3 Costi del DSO. Configurazione magliata, minimizzazione costo DSO, *Incentivo* pari a 2, limite di tensione del $\pm 3\%$

Perdite totali [kWh]	Totale energia aggiuntiva caricata	Totale tempo aggiuntivo di carica
1184.73	0.00	225.72
Costo totale perdite e gestione	Costo totale degrado batterie	Costo totale tempo aggiuntivo di
66.15 €	0.00 €	10.60 €

Tabella 3.4 Costi complessivi. Configurazione magliata, minimizzazione costo DSO, *Incentivo* pari a 2, limite di tensione del $\pm 3\%$

Costo totale del DSO	Costo di ricarica di tutti gli utenti	Costo globale
76.75 €	118.35 €	195.09 €

4.2.2 Configurazione radiale con auto connesse a sinistra

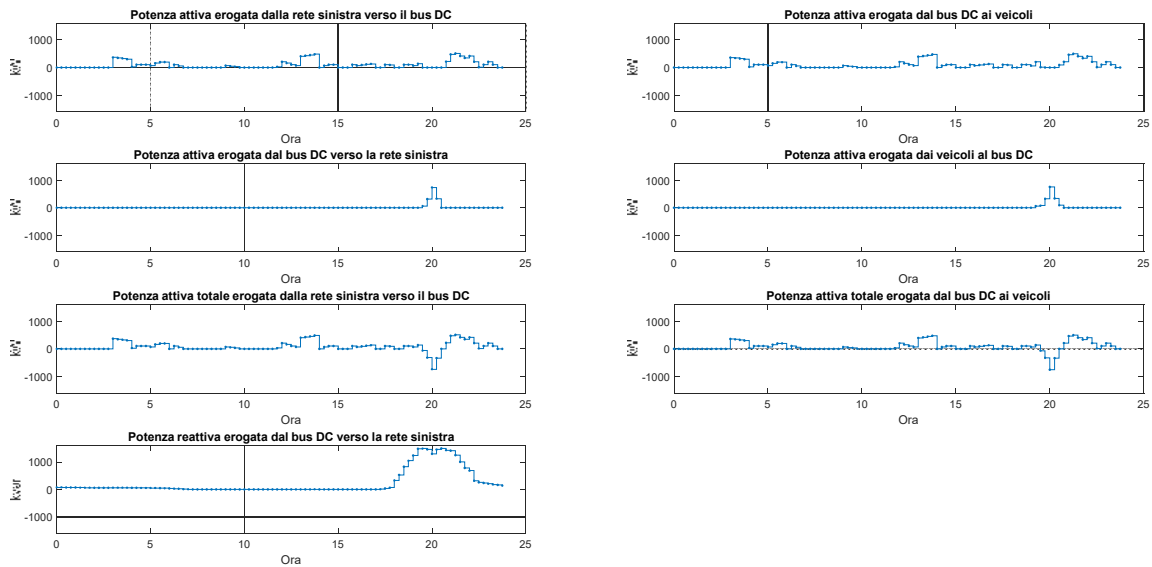


Figura 3.9 Scambi di potenza nel bus DC. Configurazione radiale sinistra, minimizzazione costo DSO, *Incentivo* pari a 2, limite di tensione del $\pm 3\%$

Tabella 3.5 Costi del DSO. Configurazione radiale sinistra, minimizzazione costo DSO, *Incentivo* pari a 2, limite di tensione del $\pm 3\%$

Perdite totali [kWh]	Totale energia aggiuntiva caricata	Totale tempo aggiuntivo di carica
1261.51	446.79	225.72
Costo totale perdite e gestione	Costo totale degrado batterie	Costo totale tempo aggiuntivo di
70.42 €	49.64 €	9.76 €

Tabella 3.6 Costi complessivi. Configurazione radiale sinistra, minimizzazione costo DSO, *Incentivo* pari a 2, limite di tensione del $\pm 3\%$

Costo totale del DSO	Costo di ricarica di tutti gli utenti	Costo globale
129.83 €	65.65 €	195.48 €

4.2.3 Confronto tra le due configurazioni

Tabella 3.7 Confronto tra la configurazione magliata e la configurazione radiale con auto connesse a sinistra. Minimizzazione costo DSO, *Incentivo* pari a 2, limite di tensione del $\pm 3\%$

Limite di tensione pari a $\pm 3\%$, <i>Incentivo</i> pari a 2 per tutti i veicoli, minimizzazione del solo costo del DSO	
Configurazione magliata	Configurazione radiale con auto connesse a sinistra
Risolvibile, nessuna scarica dei veicoli. C'è passaggio di	Risolvibile, alcuni veicoli si scaricano per caricarne

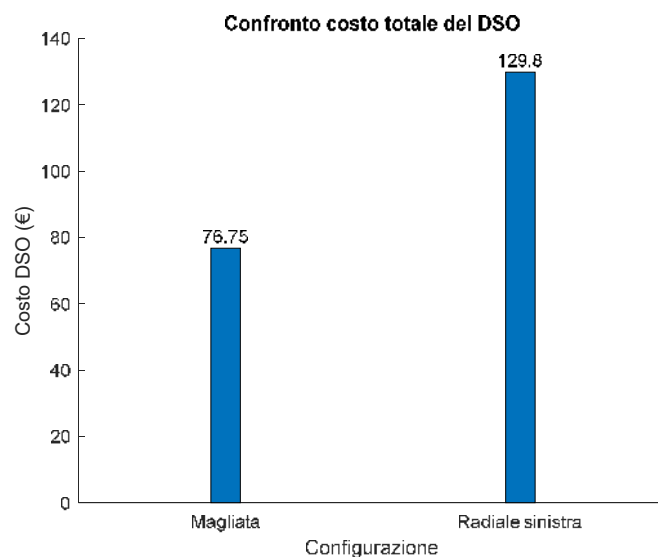


Figura 3.10 Confronto del costo del DSO nella configurazione magliata e nella configurazione radiale con auto connesse a sinistra. Minimizzazione costo DSO, Incentivo pari a 2, limite di tensione del $\pm 3\%$

Dai risultati precedenti si nota che la configurazione magliata presenta un costo da parte del DSO minore rispetto all'analogo costo relativo alla configurazione radiale (Figura 3.10) e pertanto l'aggravio di costi di realizzazione della configurazione magliata può essere giustificato. Ciò è un altro esempio del valore aggiunto dell'architettura a doppia connessione su rete di media tensione. Si nota in particolare che quando è minimizzato il solo costo del DSO, non si registra la scarica di nessun veicolo se la risolvibilità del problema è ugualmente garantita (configurazione magliata), ciò perché la scarica dei veicoli aumenta il costo del DSO.

4.3 Variazione della curva di prezzo dell'energia

Per evidenziare il fatto che il modello tiene in considerazione l'input dell'andamento giornaliero del prezzo dell'energia, sono state eseguite alcune simulazioni utilizzando la curva del PUN (prezzo unico nazionale dell'energia) di tre giorni differenti. In particolare qui di seguito sono riportati i risultati della configurazione magliata con limite di variazione della tensione del $\pm 5\%$, *Incentivo* pari a 1 o 2, minimizzazione del costo globale e curva del prezzo del giorno:

- primo lunedì di maggio 2019 (06/05/2019) (condizione ante-covid e ante-guerra);
- primo lunedì di maggio 2020 (04/05/2020) (situazione inizio pandemia);
- primo lunedì di maggio 2022 (02/05/2022) (scenario bellico).

È interessante soprattutto notare che il costo di ricarica può essere negativo se il prezzo massimo è contenuto, tenuto conto che alcuni veicoli ricaricheranno necessariamente nei momenti di prezzo massimo perché limitati dal tempo di connessione.

4.3.1 Confronto variazione della curva di prezzo dell'energia

Nella Figura 3.11 sono riportati gli andamenti giornalieri del prezzo energia del primo lunedì di maggio degli anni 2019, 2020 e 2022, mentre nella Figura 3.12 sono graficati la somma del costo di ricarica di tutti gli utenti e il costo di ricarica dell'utente che possiede il veicolo 9, veicolo preso arbitrariamente. Si nota come il costo della ricarica varia in funzione del prezzo energia, se quest'ultimo è contenuto i costi della ricarica, oltre che ridotti, possono essere negativi.

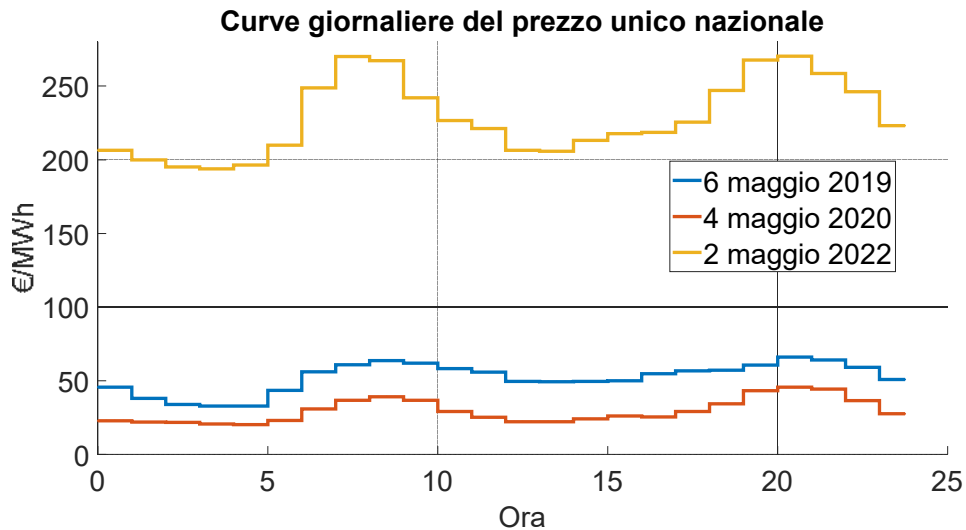


Figura 3.11 Andamento prezzo dell'energia del primo lunedì di maggio degli anni 2019, 2020 e 2022

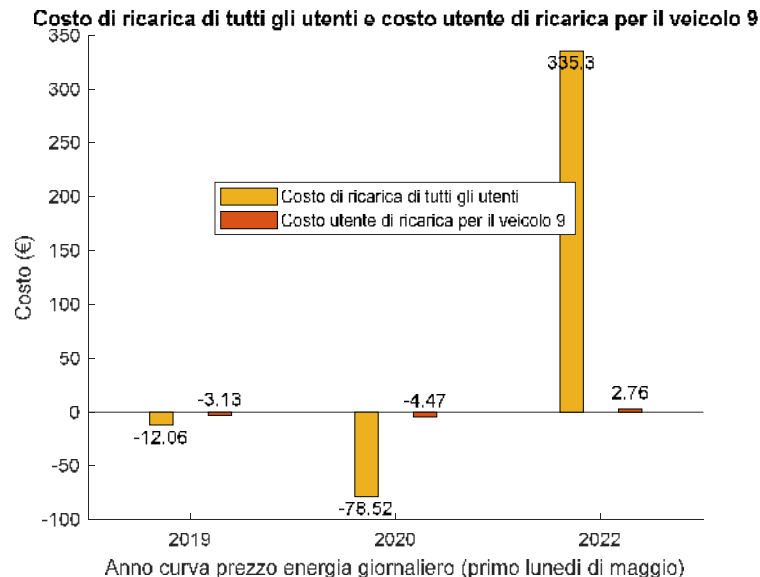


Figura 3.12 Costo di ricarica di tutti gli utenti e costo utente di ricarica per il veicolo 9 nel primo lunedì di maggio 2019, 2020 e 2022. Configurazione magliata, minimizzazione costo globale, *Incentivo* pari a 1 o 2, limite di tensione del ± 5

4.4 Variazione del termine *Incentivo*

Qui di seguito sono riportati i risultati di simulazioni con valori diversi di *Incentivo* per il veicolo 1 per vedere come questo parametro possa influenzare la ricarica di quel veicolo e degli altri. Ci si aspetta che aumentando il termine *Incentivo* per il solo veicolo 1, questo dovrebbe essere via via escluso dalla scarica/carica a favore di altri con *Incentivo* inferiore. Le simulazioni sono svolte nella configurazione radiale con auto connesse nella rete sinistra con limite di variazione della tensione del $\pm 3\%$ e minimizzazione del solo costo del DSO.

È da considerare che svolgere delle analisi su come il termine *Incentivo* impatti nella carica e scarica dei veicoli ha senso solo se è minimizzato il solo costo del DSO. Minimizzando infatti il costo globale, la differenza nel costo del DSO dovuta a diversi valori di *Incentivo* viene annullata nel costo globale dal costo degli utenti. Nel costo della ricarica a spese degli utenti, infatti, l'impatto del termine *Incentivo* è uguale con segno opposto rispetto al suo impatto nel costo del DSO.

Come si nota dai risultati riportati qui di seguito, all'aumentare del valore di *Incentivo* del veicolo 1, tale veicolo viene sempre meno scaricato per scaricare invece altri veicoli con *Incentivo* minore. Ad esempio, quando il suo *Incentivo* è pari a 2.5, il veicolo 1 non subisce nessuna scarica mentre vengono scaricati i veicoli 13 e 33 che inizialmente non effettuavano V2G.

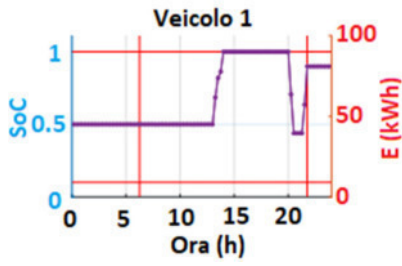


Figura 3.13 *Incentivo* del veicolo 1 pari a 1 (compensa solo invecchiamento batteria)

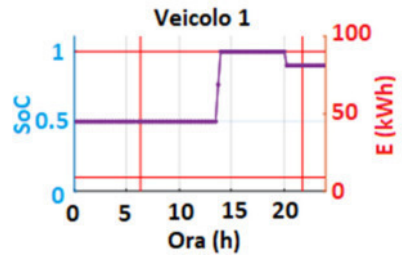


Figura 3.15 *Incentivo* del veicolo 1 pari a 2

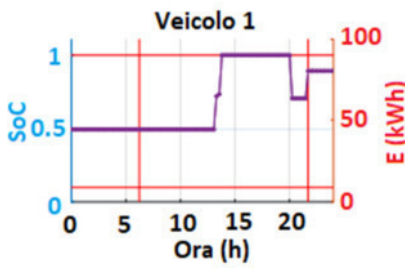


Figura 3.14 *Incentivo* del veicolo 1 pari a 1.5

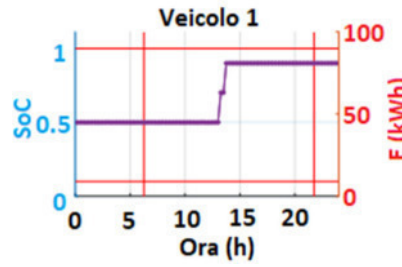


Figura 3.16 *Incentivo* del veicolo 1 pari a 2.5

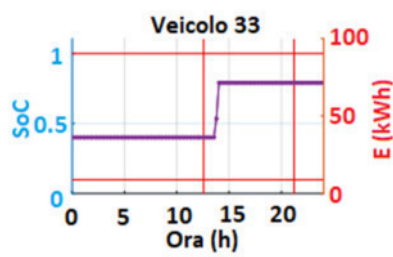
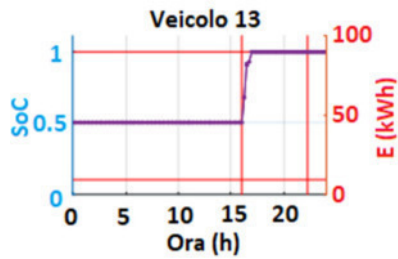


Figura 3.17 *Incentivo* del veicolo 1 pari a 1, *Incentivo* del veicolo 13 e 33 pari a 2

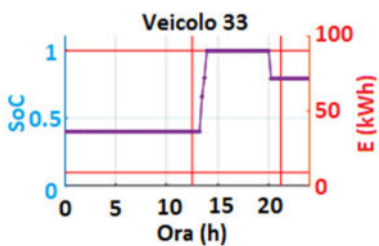
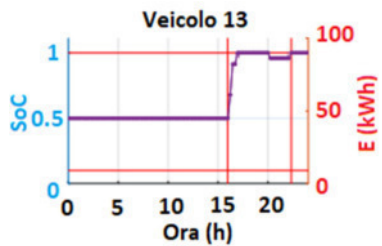


Figura 3.18 *Incentivo* del veicolo 1 pari a 2.5, *Incentivo* del veicolo 13 e 33 pari a 2

4.4.1 Confronto del costo utente di ricarica del veicolo 1 al variare di Incentivo

In figura 3.19 è riportato l'andamento del costo dell'utente per la ricarica del veicolo 1 al variare del termine *Incentivo*, mentre in Figura 3.20 l'andamento del costo del degrado della batteria di tale veicolo. Si nota come l'utente che richiede un *Incentivo* elevato venga escluso dal V2G e paghi un costo di ricarica superiore, tale costo risulta essere negativo con valori di *Incentivo* bassi. Infine, la Figura 3.21 mostra che, contrariamente al costo dell'utente, il costo del DSO diminuisce all'aumentare del termine *Incentivo* per via del minore costo dovuto al minore degrado della batteria.

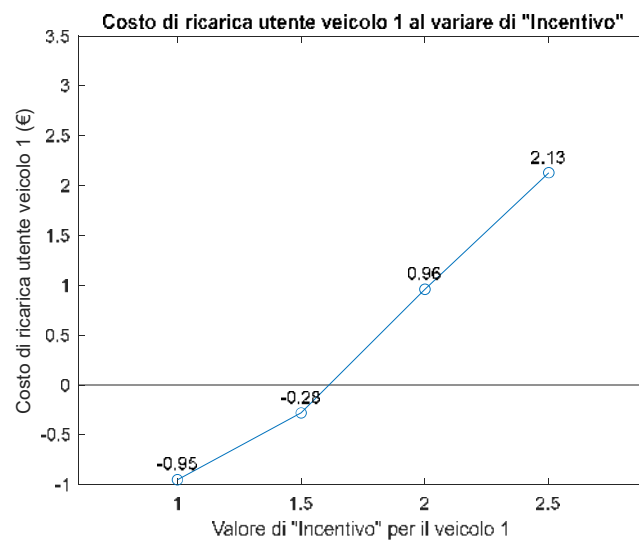


Figura 3.19 Andamento del costo utente per la ricarica del veicolo 1 al variare del termine Incentivo. Configurazione radiale sinistra, minimizzazione costo DSO, limite di tensione del $\pm 3\%$

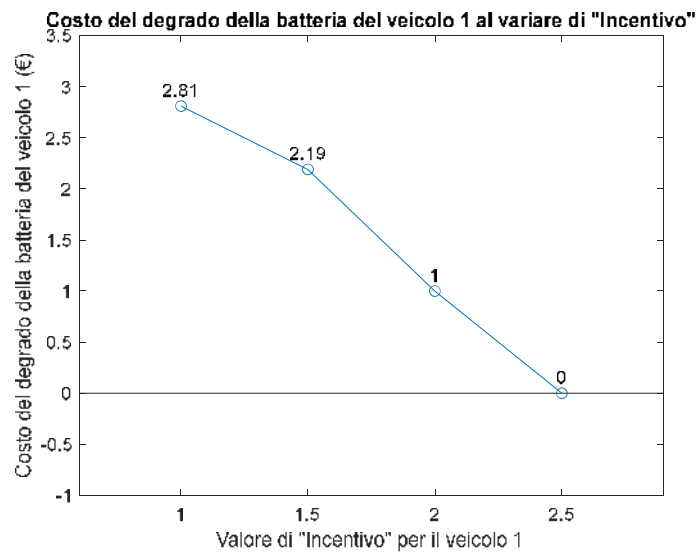


Figura 3.20 Andamento del costo del degrado della batteria del veicolo 1 al variare del termine Incentivo. Configurazione radiale sinistra, minimizzazione costo DSO, limite di tensione del $\pm 3\%$

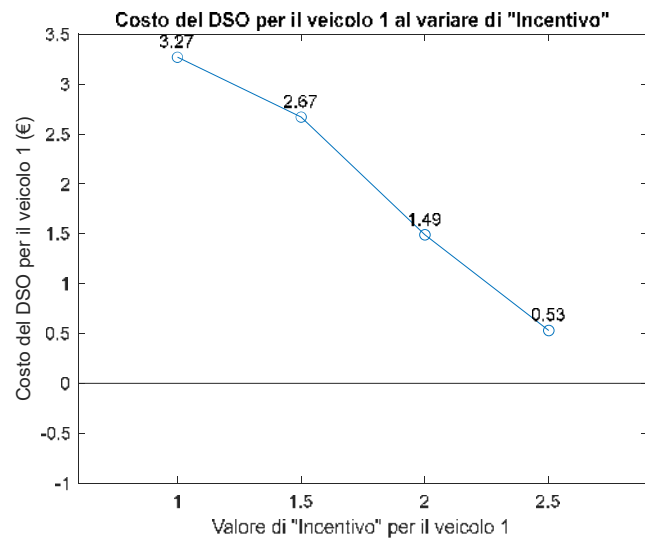


Figura 3.21 Andamento del costo del DSO per il veicolo 1 al variare del termine Incentivo. Configurazione radiale sinistra, minimizzazione costo DSO, limite di tensione del $\pm 3\%$

Conclusioni

Lo studio ha permesso di dare evidenza di come l'infrastruttura di ricarica, se opportunamente sviluppata e integrata nel sistema elettrico, non diventi un possibile problema addizionale per la rete, anzi possa essere un supporto molto importante per il distributore nell'esercire le proprie reti, garantendo un funzionamento sicuro ed affidabile ma al contempo consentendo di aumentare la connettività locale di impianti a fonte rinnovabile. La particolare topologia sviluppata, basata su una connessione multipla e controllata alla rete di distribuzione e sull'adozione di punti di ricarica multi-presa, rappresenta la struttura che meglio è in grado di perseguire questi obiettivi. Inoltre, una opportuna strutturazione dei costi di ricarica può alleviare l'impatto dell'infrastruttura sulla rete e, addirittura, coinvolgere l'utente finale nel processo di regolazione del sistema elettrico, consentendogli di ottenerne dei benefici economici sotto forma di riduzione dei costi di ricarica.

Nella sua forma più semplice, la flessibilità di funzionamento che può essere data dall'infrastruttura di ricarica consente al distributore di risolvere potenziali criticità di funzionamento, come violazioni dei limiti di portata delle linee o dei valori di tensione ai nodi di alimentazione degli utenti. Tramite un approccio economico integrato, è invece possibile raggiungere obiettivi di regolazione ancora migliori, coinvolgendo l'utente nel processo di regolazione e remunerandolo per il servizio erogato.

Il maggiore costo di esercizio per il distributore può essere ampiamente giustificato con il differimento di ingenti investimenti per il potenziamento della rete, che altrimenti sarebbero necessari nell'ottica di attuazione delle politiche energetiche attuali.

Bibliografia

- [1] C. Doru, S. Sudharshan Ravi, and M. Aziz, "Utilization of Electric Vehicles for Vehicle-to-Grid Services: Progress and Perspectives," *Energies (Basel)*, 2022, doi: 10.3390/en15020589.
- [2] H. S. Das, M. M. Rahman, S. Li, and C. W. Tan, "Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, p. 109618, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109618.
- [3] B. Bibak and H. Tekiner-Mogulkoc, "Influences of vehicle to grid (V2G) on power grid: An analysis by considering associated stochastic parameters explicitly," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 26, p. 100429, 2021, doi: 10.1016/j.segan.2020.100429.
- [4] Tarraran Mauro, "Analisi tecnico-economica dell'integrazione di strutture di ricarica per veicoli elettrici in reti di distribuzione," Tesi magistrale, Università degli studi di Padova, relatore Bignucolo Fabio, 2022.
- [5] Peterle Michele, "Optimization of vehicle-to-grid techniques for the management of smart distribution grids," Tesi magistrale, Università degli studi di Padova, relatore Bignucolo Fabio, 2021.
- [6] CIGRE Task Force C6.04.02, "Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources," 2009.

Glossario

AC – Alternative Current

AFID – Direttiva sulla realizzazione di un'infrastruttura per i combustibili alternativi

AFIR – Regolamento sulla realizzazione di un'infrastruttura per i combustibili alternativi

BT – Bassa Tensione

BTVE – Tariffa per connessioni in bassa tensione (BT) dedicata esclusivamente alla ricarica di veicoli elettrici

CO_x – Carbonati

DC – Direct Current

DSO – Distribution System Operator

EV – Electric Vehicle

EMS – Energy Management System

g – accelerazione gravitazionale (pari a circa 9,81m/s²)

GHG – GreenHouse Gas

HPC – High Power Charging

MT – Media Tensione

Mt-CO₂-eq – Million Tonnes of carbon dioxide equivalent

NO_x – Nitrati

OM – Open Modelica

PM_x – Particulate Matter

PNRR – Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza

RB – Regenerative Braking

RSE – Ricerca sul Sistema Energetico

V2G – Vehicle to Grid

SdA – Sistema di Accumulo

SoC – State of Charge

WLTP – Worldwide harmonized Light-Duty vehicles Test Procedure

Gli articoli selezionati e raccolti nel numero *Parliamo di auto elettrica* sono stati presentati nell'ambito dell'iniziativa dell'Automobile Club Roma "A porte aperte". Un momento di approfondimento, confronto e divulgazione di conoscenze e informazioni sul mondo dell'*automotive*.

Fondazione Filippo Caracciolo
Centro Studi



ISBN 9788832245158

