



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA
ELETTRONICA

SISTEMI DI TRAZIONE, CONVERSIONE E
ACCUMULO DELL'ENERGIA NELL'AUTO
ELETTRICA

RELATORE: prof. Meneghini Matteo

LAUREANDO: Zanchetton Linda

ANNO ACCADEMICO: 2022/2023

16/03/2023

Indice

1	Introduzione	4
2	Sistemi di accumulo	10
2.1	Funzionamento delle batterie	12
2.1.1	Batterie al litio	13
2.2	Parametri per definire lo stato corrente della cella	16
2.3	Battery Management System (BMS)	18
2.3.1	Bilanciamento	18
2.3.2	Monitoraggio in real time dei parametri della batteria	18
2.3.3	Stato di Carica	19
2.4	Smaltimento batterie	19
3	Motori elettrici	21
3.1	Funzionamento del motore elettrico	21
3.1.1	Propulsione nei veicoli elettrici	22
3.1.2	Motori a magneti permanenti	23
3.1.3	Motori a induzione	24
3.2	Recupero energetico	25
4	Sistemi di conversione dell'energia	26
4.1	Infrastrutture di ricarica AC vs DC	26
4.2	Stazioni di ricarica in AC	28

4.2.1	On-board charger (OBC)	29
4.3	Stazioni di ricarica in DC	31
4.4	Supercharger	32
5	Conclusioni	34

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni le auto elettriche stanno conquistando un ruolo sempre più importante nel mercato automobilistico, nonostante questo a livello mondiale sia ancora dominato dalle automobili a motore termico. Gli odierni blocchi del traffico e i cambiamenti previsti in Europa per il 2035 lasciano pensare che il futuro dell'auto sia elettrico: in data 8 giugno 2022 il Parlamento Europeo ha votato il pacchetto "Fit for 55", un insieme di testi legislativi con l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas serra del 55 % entro il 2030 ed arrivare a zero emissioni nel 2050, così da raggiungere la neutralità climatica. Tra i testi approvati risalta quello sugli standard di emissioni di CO₂ per veicoli nuovi. Il Ministero della Transizione Ecologica ha confermato il blocco dell'immatricolazione di nuovi veicoli con motori endotermici (benzina, diesel, GPL, auto ibride) dal 2035, mentre già dal 2030 i nuovi veicoli dovranno emettere il 55 % in meno di CO₂ rispetto ai dati del 1990, con la speranza di azzerarle completamente entro il 2050, poiché sono la causa principale dell'effetto serra e del surriscaldamento globale. Questa scadenza non riguarda però furgoni e veicoli commerciali con motore endotermico, che potranno essere immatricolati fino al 2040. Nel documento ufficiale pubblicato dalla Commissione europea si legge "Tutte le autovetture nuove immatricolate a partire dal 2035 saranno a zero emissioni": questo cambiamento più

che prevedere una possibile invasione delle sole auto elettriche implica che nei prossimi anni gli studi e gli investimenti delle case automobilistiche convergano tutti verso la riduzione delle emissioni di anidride carbonica (CO₂), particolato e ossidi di azoto (NO_x), infatti il Ministero della Transizione Ecologica ha promosso anche soluzioni alternative alla propulsione elettrica, come si legge nel comunicato stampa: "In tale percorso occorre mettere in campo tutte le soluzioni funzionali alla decarbonizzazione dei trasporti in una logica di "neutralità tecnologica" valorizzando, pertanto, non solo i veicoli elettrici ma anche le potenzialità dell'idrogeno, nonché riconoscendo – per la transizione – il ruolo imprescindibile dei biocarburanti, in cui l'Italia sta costruendo una filiera domestica all'avanguardia".

Per arrivare a predilire i veicoli elettrici bisogna considerare fattori come gli elevati prezzi delle batterie e l'efficienza dei motori. Inoltre la diffusione delle auto elettriche è influenzata dalla disponibilità di stazioni di ricarica, infatti la Commissione europea imporrà agli Stati di "aumentare la capacità di ricarica in linea con le vendite di autovetture a emissioni zero e di installare punti di ricarica e di rifornimento a intervalli regolari sulle principali autostrade: ogni 60 km per la ricarica elettrica e ogni 150 km per il rifornimento di idrogeno".

Lo stato dell'arte della disponibilità dei punti di ricarica europei ci è dato da una ricerca pubblicata da ACEA (Associazione dei produttori europei di automobili) datata ottobre 2022, secondo la quale 6 Paesi europei non raggiungono nemmeno la media di una colonnina ogni 100 km di rete stradale (si includono autostrade, strade statali, provinciali e comunali) e dispongono di una colonnina veloce su 7 (ovvero con potenza superiore ai 22 kW). Nella tabella 1.1 è riportata la classifica dei Paesi europei in base alla maggiore densità di punti di ricarica ad accesso pubblico ogni 100 km di rete stradale. Prima in classifica l'Olanda, seguita da Lussemburgo e Germania. L'Italia è in settima posizione (9.2), con una quota di veicoli elettrici circolanti pari al

9.4 % del totale. In figura 1.1 è possibile osservare la distribuzione geografica dei punti di ricarica installati in Italia, dove risalta una distribuzione non omogenea: il 58 % delle infrastrutture sono situate nel Nord Italia, il 22 % nel Centro e solo il 20 % nel Sud e nelle Isole.

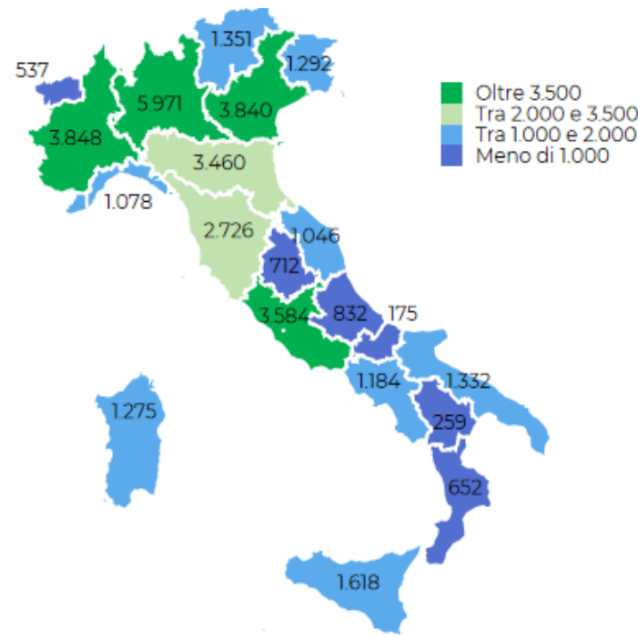


Figura 1.1: Punti di ricarica installati per regione

Più nello specifico, in figura 1.2 viene evidenziata la situazione nelle città metropolitane (Roma, Milano, Napoli, Torino, Bari, Palermo, Catania, Bologna, Firenze, Venezia, Genova, Messina, Reggio Calabria, Cagliari). Roma è prima in classifica, con 2.751 punti di ricarica, seguita da Milano (1.927), Torino (1.641), Venezia (1.372) e Firenze (882). Gli ultimi posti della classifica vedono Messina (298), Cagliari (250), e Reggio Calabria (123), confermando nuovamente le disparità fra Nord, Centro e Sud Italia.

Tornando a valutare la situazione a livello europeo, per le ultime posizioni della classifica si fa riferimento alla tabella 1.2.

Per confronto, si riportano i dati relativi a settembre 2021 nelle tabelle

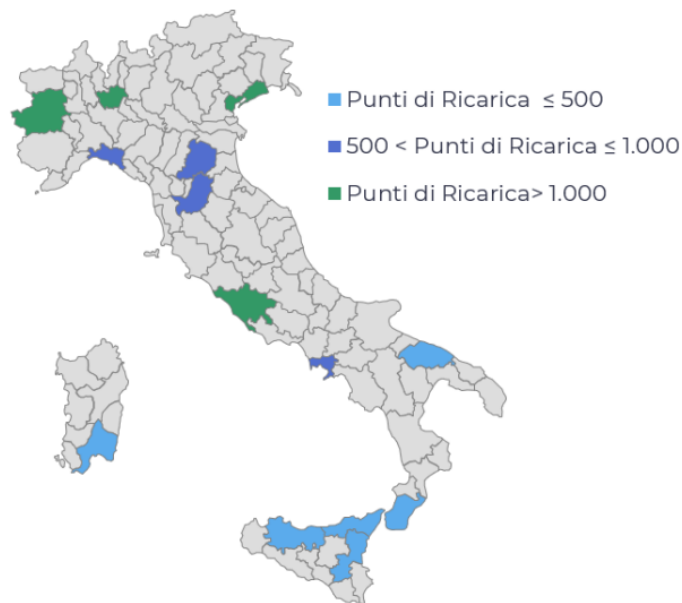


Figura 1.2: Punti di ricarica nelle città metropolitane

1.3 e 1.4 (i dati sono il risultato di un monitoraggio effettuato da ACEA tra il 2014 e il 2020). Come si può osservare, Paesi come Portogallo, Germania, Lussemburgo e Paesi Bassi, che già nel 2021 vantavano una certa penetrazione dell'auto elettrica nei loro mercati, hanno continuato espandendola, mentre altri, come Lituania, Grecia e Polonia, manifestano scarsi miglioramenti.

Consapevoli dei grandi cambiamenti presentati per il 2035, i Paesi europei stanno cercando di mettersi in regola, e nel primo semestre del 2022 l'acquisto di vetture a zero emissioni è cresciuto del 30 %, mentre in Italia è crollato del 17,6 %, rendendola l'unico stato in controtendenza rispetto agli altri, probabilmente a causa della mancanza d'incentivi che sostengano il compratore. In sei mesi, l'Italia ha immatricolato 25000 auto elettriche pure, contro le 167000 della Germania, 93000 della Francia e 40000 della Svezia.

Nella figura 1.3 è riportato l'andamento delle immatricolazioni di veicoli

	Paese	Media delle colonnine di ricarica ogni 100 km di strada	Quota veicoli elettrici circolanti rispetto al totale (%)
1	Paesi Bassi	64.3	29.5
2	Lussemburgo	57.9	20.5
3	Germania	25.8	26
4	Portogallo	24.9	19.7
5	Svezia	12.2	45

Tabella 1.1: Top 5 dei Paesi europei per media delle colonnine di ricarica ogni 100 km di strada, anno 2022

	Paese	Media delle colonnine di ricarica ogni 100 km di strada	Quota veicoli elettrici circolanti rispetto al totale (%)
1	Lituania	0.2	3.7
2	Cipro	0.4	1.7
3	Grecia	0.4	6.9
4	Estonia	0.6	2.9
5	Polonia	0.7	3.7

Tabella 1.2: Ultime posizioni della classifica, anno 2022

elettrici in Italia da ottobre 2021 a gennaio 2023.

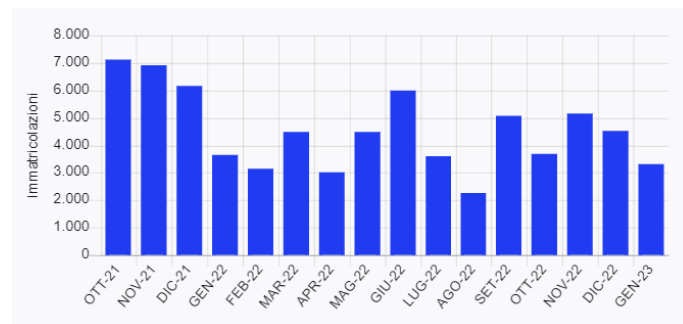


Figura 1.3: Immatricolazioni in Italia negli ultimi mesi

	Paese	Media delle colonnine di ricarica ogni 100 km di strada	Quota veicoli elettrici circolanti rispetto al totale (%)
1	Paesi Bassi	47.5	25
2	Lussemburgo	34.5	11.4
3	Germania	19.4	13.5
4	Portogallo	14.9	13.5
5	Austria	6.1	9.5

Tabella 1.3: Top dei Paesi europei per media delle colonnine di ricarica ogni 100 km di strada, anno 2021

	Paese	Media delle colonnine di ricarica ogni 100 km di strada	Quota veicoli elettrici circolanti rispetto al totale (%)
1	Lituania	0.2	1.1
2	Grecia	0.2	2.6
3	Polonia	0.4	1.9
4	Lettonia	0.5	2.7
5	Romania	0.5	2.2

Tabella 1.4: Ultime posizioni della classifica, anno 2021

Capitolo 2

Sistemi di accumulo

La batteria può essere considerata il cuore dell'auto elettrica, essendo l'elemento più importante, complesso e costoso di tutto il veicolo. Anche la sua

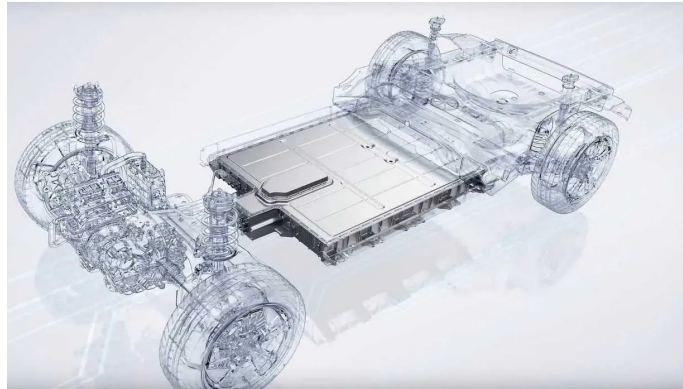


Figura 2.1: Locazione della batteria.

posizione assume un ruolo centrale nell'auto, e come si può osservare dalla figura 2.1, l'installazione della batteria è funzionale poiché l'essere inserita nel pianale fa mantenere al veicolo un baricentro basso, e quindi non compromette la dinamica di guida; inoltre protegge maggiormente la batteria in caso di incidente. Non è solo il luogo in cui viene immagazzinata l'energia elettrica necessaria a far muovere il veicolo, ma assume notevole importanza anche la sua capacità di erogare energia, poiché è vero che la spinta arriva

dal motore, ma le prestazioni di questo sono direttamente influenzate dalla batteria.

La batteria viene caricata tramite una fonte di energia esterna, che può essere una presa domestica o una stazione di ricarica, e poi fornisce energia al motore elettrico, cosicché faccia girare le ruote dell'automobile. La batteria alimenta inoltre i sistemi elettrici dell'auto, ad esempio il sistema di climatizzazione e le luci. L'autonomia dell'auto, cioè la distanza che può percorrere con una singola ricarica, è determinata dalla capacità della batteria, che grazie agli sviluppi tecnologici rende questi veicoli sempre più competitivi rispetto alle auto a combustione interna. L'autonomia è influenzata da tanti altri fattori, come la dimensione e il peso del veicolo, l'efficienza del motore elettrico, la velocità di guida, il tipo di tragitto e l'utilizzo degli accessori elettrici. La capacità viene espressa in kilowattora (kWh), che corrispondono alla quantità di kW che la batteria è in grado di trasmettere o immagazzinare in un'ora, e varia in base al modello e al produttore dell'auto: in generale è compresa tra i 30 e i 100 kWh. Nella tabella 2.1 sono stati riportati come esempio i dati relativi alle dieci vetture full electric più vendute in Italia nel 2022, in base alla classifica rilasciata da UNRAE (Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri) su dati raccolti fino al 31/12/2022. La capacità della batteria è direttamente proporzionale all'autonomia dell'auto, ma anche al suo prezzo: tutti i modelli riportati in tabella hanno un costo compreso tra i 25.000 e i 50.000 euro. Per maggiore capacità della batteria e autonomia risaltano la Tesla Model Y e la Volkswagen ID.3, che superano i 70 kWh di capacità e i 500 km di autonomia. Per confronto, nella tabella 2.2 si riportano i dati relativi ad alcuni veicoli di potenza maggiore, appartenenti ad una fascia di prezzi superiore (fino a 182.000 euro per la Mercedes AMG EQS).

Modello	Immatricolazioni	Batteria(kWh)	Autonomia(km)	Potenza massima(kW)
Fiat 500	6285	42/23.8	320/180	87/70
Smart EQ fortwo	4545	17.6	135	60
Tesla Model Y	4276	75	fino a 533	fino a 360
Dacia Spring	2825	26.8	230	33
Renault Twingo	2742	22	190	60
Peugeot 208	2122	51	400	115
MINI	1561	32.6	235	135
Volkswagen ID.3	1553	45/58/77	fino a 550	fino a 150
Renault Zoe	1442	52	395	90
Peugeot 2008	1369	50	345	100

Tabella 2.1: Classifica auto elettriche più vendute in Italia nel 2022.

Modello	Batteria(kWh)	Autonomia(km)	Potenza massima(kW)
Audi Q8 e-Tron	114	582	fino a 300
BMW iX	76.6/111.5	fino a 630	fino a 370
BMW i7	101.7	625	400
Mercedes AMG EQS	107.8	fino a 580	fino a 560
Tesla Model S	100	fino a 600	fino a 750

Tabella 2.2: Modelli più performanti.

2.1 Funzionamento delle batterie

Innanzitutto è bene distinguere i termini cella e batteria, sebbene questi tendano ad essere usati in modo indistinto quando ci si riferisce ad accumulatori elettrici. La cella elettrochimica è un dispositivo a due terminali in grado di trasformare energia chimica in elettrica tramite le reazioni chimiche di ossidoriduzione che avvengono al suo interno. Esistono anche celle, dette secondarie o ricaricabili, che possono assorbire energia elettrica immagazzinandola in energia chimica.

Una batteria è composta da due o più celle distinte, connesse elettricamente tra loro in serie, parallelo o in configurazioni miste. Ai capi di una singola cella si misura una tensione di qualche Volt, che è troppo limitata per alimentare un sistema come la trazione elettrica, che necessita una certa potenza: la tensioni richieste vanno dalle decine alle centinaia di Volt.

Per ottenere una tensione adeguata all'applicazione si combinano più celle di grande capacità collegandole in serie, e così facendo le loro tensioni si sommano fino ad ottenere quella richiesta. Per avere una batteria di elevata capacità è anche possibile unire gruppi di celle in parallelo, per poi connetterli in serie. La connessione delle celle prima in serie e poi in parallelo, invece, è una configurazione inusuale poiché rende complicato il bilanciamento della carica all'interno della batteria.

2.1.1 Batterie al litio

La maggioranza dei veicoli elettrici utilizza batterie agli ioni di litio, una tecnologia allo stato liquido che si serve del litio per trasportare la carica elettrica tra gli elettrodi. Il funzionamento delle batterie è regolato da un processo chimico: generando un flusso di elettroni tra due poli, cioè l'anodo che li cede per ossidazione e il catodo che li riceve per riduzione, si genera corrente elettrica, e questo coincide con la fase di scarica della batteria, che si può osservare in figura 2.2.

La scarica totale si avrà nel momento in cui l'anodo non ha più ioni di

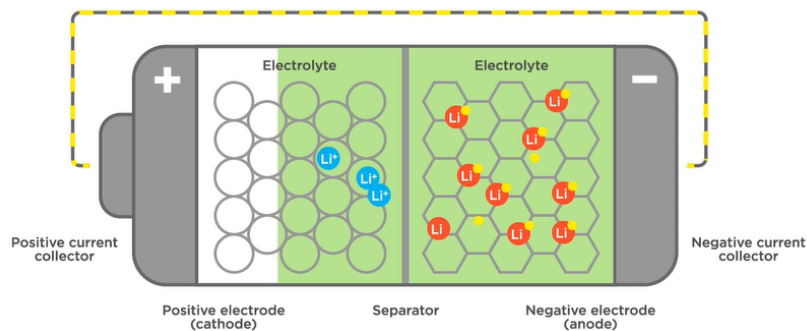


Figura 2.2: Scarica della batteria

litio da cedere e il processo si interrompe (figura 2.3). Durante la ricarica il flusso energetico in ingresso nella batteria si muove dal catodo verso l'anodo, restituendogli gli elettroni (figura 2.4). Quando la batteria è completamente carica, lo scenario è quello di figura 2.5 . Questi processi avvengono in

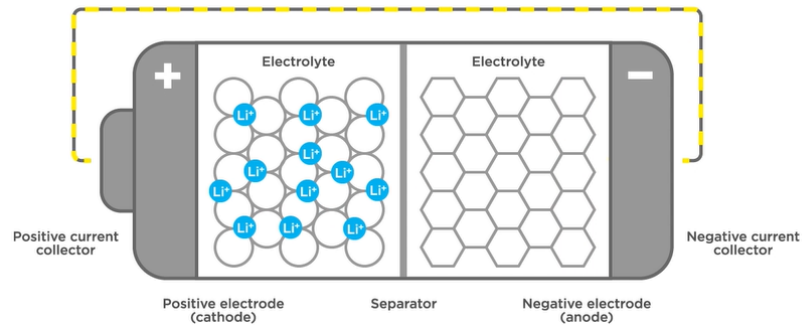


Figura 2.3: Batteria scarica

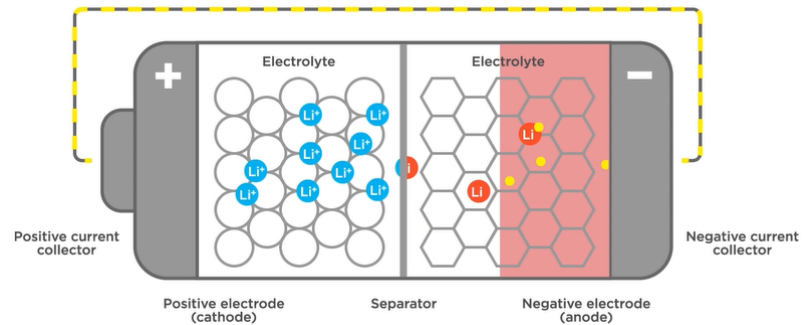


Figura 2.4: Ricarica della batteria

ogni singola cella. Il tempo necessario a caricare e scaricare una batteria è determinato dalla distanza percorsa dagli ioni di litio, che nella fase di ricarica circolano su un circuito interno, mentre in quella di scarica su un percorso esterno, il che rende la ricarica la fase più rapida. Esistono diversi tipi di batterie basate sugli ioni di litio, diversificate dal materiale di cui sono composti anodo e catodo, con caratteristiche che variano di poco per adattarsi ad applicazioni specifiche (la loro chimica è formata per esempio da litio-polimeri, litio-nanofosfati, litio-ferro-fosfato, litio-titanio).

Pregi delle batterie al litio

Uno dei parametri che consentono di capire quanto sia funzionale una batteria è la tensione nominale di cella, cioè quella tensione che si misura ai capi di una cella mediamente carica quando in essa non scorre corrente. Una

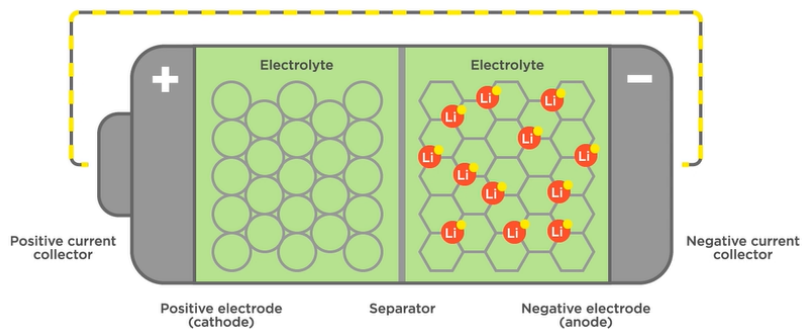


Figura 2.5: Batteria carica

cella può essere schematizzata con un generatore di tensione di valore pari alla sua tensione nominale, che nel caso delle batteria al litio misura 3.5 V.

Un altro importante parametro è il valore dell'autoscarica: l'energia estraibile da una cella decresce nel tempo, anche se non scorre corrente attraverso i terminali. Questa decrescita viene espressa come una riduzione percentuale della carica per unità di tempo, ad esempio nel caso delle Li-Ion vale 8 % / mese, un buon valore in quanto basso. Oltre ad avere un limitato valore di autoscarica hanno un buon numero di cicli di funzionamento (1000/1200), e potenza ed energia specifica eccellenti. Le batterie Li-Ion non soffrono dell'effetto memoria, un fenomeno a causa del quale la batteria crede di essere meno capiente rispetto a quanto in realtà lo sia. Questo effetto è molto frequente nelle batterie di tipo nichel-cadmio (NiCd) e si verifica nel momento in cui la batteria viene ricaricata ma avrebbe ancora energia residua: in pratica, una scarica parziale della batteria ne riduce l'energia immagazzinabile. Per ritornare in condizioni normali bisogna scaricare completamente la batteria e ricaricarla subito dopo.

Le batterie agli ioni di litio hanno il vantaggio di essere leggere rispetto alla quantità di energia che possono immagazzinare.

Un altro vantaggio è che per la loro costruzione non si utilizza il cadmio, materiale tossico che ancora viene utilizzato per realizzare batterie ricaricabili.

Difetti delle batterie al litio

D'altro canto, le batterie al litio sono molto sensibili all'effetto del calore: dovrebbero trovarsi sempre a temperatura ambiente, e le celle non dovrebbero essere ricaricate quando il dispositivo è già caldo poiché questo ne abbassa le prestazioni. Per minimizzare questi inconvenienti nelle batterie sono stati implementati meccanismi di sicurezza che verificano che il dispositivo lavori nei corretti range operativi, mentre al di fuori di questi la vita media delle batterie si può ridurre di molto.

Infine, bisogna prestare attenzione a ricaricare le batterie ad un voltaggio appropriato per evitare di danneggiarle, dato che usare caricabatterie troppo potenti comporterebbe un accumulo di gas rilasciati durante la carica/scarica e questi potrebbero provocare esplosioni.

Con le batterie al litio è meglio fare attenzione a mantenere un livello di carica minimo poiché se il transito degli ioni dal catodo all'anodo si interrompesse del tutto, le prestazioni della batteria potrebbero essere irrimediabilmente danneggiate e il dispositivo potrebbe avere difficoltà nel riaccendersi nuovamente.

A causa delle sue caratteristiche questa tipologia di batteria non può avere vita infinita, ma la sua durata si misura in cicli di carica, dopo i quali gli anodi e il materiale chimico interno potrebbero risultare usurati. Un buon utilizzo di queste batterie prevede di mantenerne la carica tra il 30 % e l'80 %.

2.2 Parametri per definire lo stato corrente della cella

Esistono alcuni parametri che si modificano durante la vita operativa della cella. Per comprendere le spiegazioni seguenti è utile dare una definizione alla capacità nominale: con questo termine si intende la carica che può attra-

versare il terminale positivo di una cella carica prima che questa si scarichi completamente.

Lo stato di salute (State of Health, SoH), varia in funzione della capacità effettiva della cella, normalizzata alla capacità nominale: quando, per invecchiamento, esercizio a temperatura elevata o guasti, si riduce la capacità effettiva, peggiora anche lo stato di salute. Un concetto chiave nella comprensione del funzionamento della cella è che, con l'uso, la capacità effettiva aumenta, per poi ridursi col passare del tempo.

Lo stato di carica (State of Charge, SoC), indica quanta carica è attualmente immagazzinata nella cella e viene indicato come percentuale della capacità nominale. Lo stato di carica influenza la tensione misurata ai suoi elettrodi, che non mantiene un valore costante ma varia anche in funzione della corrente che scorre nella cella e della temperatura. Quest'ultima influenza la quantità di energia che può essere estratta dalla cella. Nelle celle al litio quest'ultima decresce al diminuire della temperatura, fino ad essere quasi nulla sotto gli 0°C .

Un altro parametro importante è il numero di cicli, che misura quante volte è stata caricata e scaricata la cella da quando è stata prodotta.

Parlando nello specifico di batterie al litio, ne sono stati precedentemente individuati alcuni vantaggi e svantaggi. Alcune limitazioni possono essere gestite monitorando tensione e temperatura, verificando così che l'attività delle celle non sfori i limiti operativi. In caso contrario è necessario agire per riportare le celle nel giusto range di utilizzo, per esempio raffreddando la batteria se la temperatura misurata è eccessivamente elevata, ricaricando le celle troppo scariche o scaricando quelle troppo cariche. Interventi del genere non possono essere effettuati manualmente a bordo dei veicoli, ma il problema si risolve affiancando alla batteria un Battery Management System.

2.3 Battery Management System (BMS)

Il Battery Management System è un sistema elettronico incorporato nei pacchi batteria che ne fornisce un controllo a 360°, effettuando tutte le operazioni necessarie al fine di mantenere la cella in salute. Gestisce la cella, prolungandone il ciclo di vita e garantendone la stabilità delle prestazioni nel tempo; previene eventuali anomalie, svolge autodiagnostica e manutenzione predittiva.

Il BMS serve inoltre per rilevare altri eventuali malfunzionamenti, monitora i collegamenti per rilevarne eventuali guasti o danneggiamenti e fornisce la diagnosi in tempo reale di perdita di isolamento del pacco batteria.

2.3.1 Bilanciamento

Tra le diverse funzioni svolte dal BMS si trova il controllo del bilanciamento del pacco batterie al litio: nel momento in cui una cella del pacco batterie supera la tensione di bilanciamento iniziale, il BMS redistribuisce la carica in eccesso tra le varie celle (detto bilanciamento attivo). Il corretto bilanciamento di un pacco batterie è la funzione più importante di un sistema BMS, poiché garantisce massima efficienza e elevate capacità per tutto il ciclo di vita della batteria.

2.3.2 Monitoraggio in real time dei parametri della batteria

Il BMS, misurando il flusso di corrente entrante o uscente dalla batteria, deve essere in grado di controllare in tempo reale temperatura e tensioni di ogni singola cella. In funzione dei valori letti, il sistema prenderà decisioni strategiche per gestire al meglio la fase di carica, scarica, o un periodo prolungato di inattività.

Importanza del monitoraggio della temperatura

Un importante controllo in cui collabora il BMS è il monitoraggio della temperatura, al fine di evitare l'innesco di un incendio, che può causare danni irreparabili. In base al luogo di utilizzo e alla sua applicazione, la batteria al litio può essere dotata di sistemi riscaldanti o raffreddanti, della cui attivazione si occupa il BMS, che tiene conto delle esigenze della batteria e dello stato della macchina.

2.3.3 Stato di Carica

Il BMS, mediante calcolo numerico, è in grado di ricavare informazioni come lo stato di carica, che corrisponde al rapporto tra la carica presente in una cella in un certo istante e la sua capacità nominale, che è la quantità di carica immagazzinata nella cella quando è completamente carica. . La stima di questo parametro è necessaria a bordo di un veicolo poiché serve per stimarne l'autonomia residua. Inoltre tenere sotto controllo questi indici può aiutare a individuare comportamenti anomali della batteria, dovuti al suo invecchiamento o ad un malfunzionamento della stessa. Per il BMS non è semplice stimare lo stato di carica, dato che le misurazioni di parametri come temperatura, tensione e corrente vengono effettuate a bordo del veicolo, il che le rende rumorose e poco accurate. Inoltre, in termini di potenza di calcolo le risorse sono limitate, dato che vengono utilizzate quelle disponibili in un sistema integrato, basato su microcontrollore o DSP.

2.4 Smaltimento batterie

Secondo le previsioni attuali, entro il 2030 sulle strade dell'Unione Europea ci saranno almeno 30 milioni di veicoli elettrici a emissioni zero contro i 500.000 del 2021: questo darà un buon contributo alla riduzione delle emissioni di gas serra ma non si può non tener conto di altri problemi ambientali,

che sono legati alla produzione e allo smaltimento delle batterie. Il Parlamento europeo ha adottato una direttiva per regolamentare l'intero ciclo di vita della batteria, a partire dalla fase di progettazione fino ad arrivare al termine del loro ciclo di vita, momento in cui dovranno essere riutilizzate o riciclate. Le stime indicano che entro il 2030 la domanda globale di batterie aumenterà notevolmente, proporzionalmente al numero dei veicoli elettrici. La produzione delle batterie è molto legata all'importazione di materie prime critiche come litio e nichel, metalli ad impatto ambientale e sociale molto elevato. Secondo il testo prodotto dal Parlamento europeo, i produttori dovranno rispettare degli standard di gestione dei rischi sociali e ambientali, legati all'approvvigionamento, alla lavorazione e al commercio di materie prime, tenendo conto della provenienza delle stesse, nel rispetto della salute dei lavoratori, della loro sicurezza e condizioni di lavoro dignitose. Per rendere le batterie sempre più efficienti e performanti si stanno studiando nuovi materiali e tecnologie innovative, tenendo conto della sostenibilità, sempre più protagonista in questi anni: si cerca infatti di rendere più ecologico lo smaltimento delle batterie, ed aumentarne il tasso di riciclo. Se le batterie non vengono danneggiate durante il loro uso nei veicoli elettrici, prima di procedere con lo smaltimento queste possono essere rinnovate e riutilizzate, poiché dopo la loro prima vita hanno ancora l'80 % della capacità nominale, e possono essere scomposte per recuperarne specifici componenti; esistono inoltre aziende che le riutilizzano a supporto della generazione di energia rinnovabile, collegando insieme più batterie per crearne una delle dimensioni di un container, che immagazzina energia solare durante il giorno e fornisce elettricità nelle ore serali.

Capitolo 3

Motori elettrici

3.1 Funzionamento del motore elettrico

A differenza del più conosciuto motore termico, che converte l'energia termica in meccanica, il motore elettrico trasforma l'energia contenuta nelle batterie in energia meccanica, resa disponibile sull'asse del motore, responsabile del movimento dell'auto.



Il motore elettrico può essere considerato una macchina robusta non essendo provvisto degli elementi più sensibili del motore endotermico, organi meccanici ad esempio i pistoni; rispetto ai motori a combustione presenta altri vantaggi, come il fatto che essendo leggero e compatto può essere installato in modo flessibile sull'asse anteriore o posteriore del veicolo. Inoltre è completamente eliminata la frizione per l'avviamento, dato che i motori elettrici riescono a generare una coppia anche a veicolo fermo.

E' importante ricordare che buona parte delle prestazioni della propulsione elettrica dipende dalla batteria e dalla sua capacità di cedere energia.

Al giorno d'oggi i motori elettrici si dividono in due famiglie, quella dei motori sincroni e quella dei motori asincroni. Entrambe le tipologie sono composte da due parti fondamentali: uno statore e un rotore. Lo statore è il componente che resta fermo, mentre il rotore è la parte atta a ruotare.

Attualmente, gli obiettivi verso i motori riguardano la resa e la massa, e sono quelli di ridurre il peso, il numero dei componenti, gli attriti meccanici e l'uso di materiali costosi, mentre i principi di funzionamento probabilmente non cambieranno notevolmente, data la loro elevata efficienza. In particolare, sarà importante concentrarsi sulla massa: essendo già elevato il peso delle batterie, ridurre quello del motore di qualche chilogrammo avrebbe delle implicazioni positive sull'autonomia del veicolo.

Dal punto di vista ecologico, i motori delle auto elettriche sono migliori di quelli a combustione interna dato che non producono emissioni nocive.

3.1.1 Propulsione nei veicoli elettrici

L'elettronica di potenza regola il funzionamento del motore elettrico, facendo da tramite tra la batteria e il motore. Questa include l'inverter, che converte la corrente continua generata dalla batteria in corrente alternata, necessaria per far funzionare il motore elettrico.

Come si può vedere da figura 3.1, è poi presente un riduttore meccanico, che serve a cambiare contemporaneamente la velocità dell'albero e la sua coppia (la forza alla quale è esposto l'albero), in modo che la potenza resti costante, a meno di piccole perdite inevitabili. La potenza è data dal prodotto di coppia (T) e velocità angolare (Ω). Dato che il riduttore vuole mantenere la potenza costante, considerando l'ingresso con "1" e l'uscita con "2", vale che $P_1 = P_2$, quindi $T_1\Omega_1 = T_2\Omega_2$ e $\frac{T_2}{T_1} = \frac{\Omega_1}{\Omega_2}$. Come esempio si consideri di avere un rapporto di riduzione pari a 10, quindi la velocità di uscita sarà un decimo di quella di ingresso. Vale che $\frac{T_2}{T_1} = 10$ quindi la coppia di ingresso sarà un decimo di quella d'uscita. Per far sì che la potenza sia

costante in ingresso e in uscita, coppia e velocità angolare devono rispettare la precedente equazione quindi ad esempio si potrebbe avere $T_1 = 100 \text{ Nm}$, $\Omega_1 = 2000 \text{ rpm}$ (revolutions-per-minute, cioè giri al minuto), $T_2 = 1000 \text{ Nm}$, $\Omega_2 = 200 \text{ rpm}$.

Parlando di auto elettrica viene spesso messa in risalto la sua accelerazione, ma non è corretto dire che questa sia più elevata tanto più alta sia la coppia del motore, poiché come si è visto, questa prima di essere applicata alle ruote viene modificata dal riduttore. Quando si vuole valutare l'accelerazione è meglio quindi concentrarsi sulla coppia applicata alle ruote, che dipende dal rapporto di riduzione.

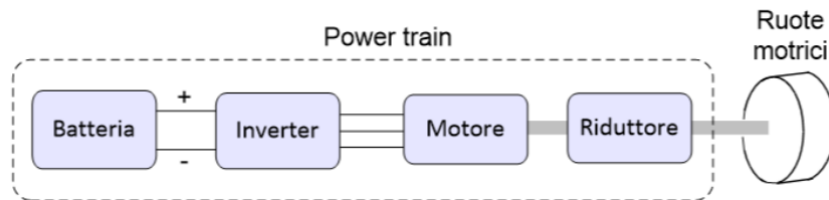


Figura 3.1: Schema del power train di un veicolo elettrico

3.1.2 Motori a magneti permanenti

I motori a magneti permanenti sono lo stato dell'arte dei moderni veicoli elettrici. La velocità di rotazione dell'asse è sincronizzata con la frequenza della corrente alternata che lo alimenta. Conosciuti anche come brushless (senza spazzole), i motori sincroni non hanno bisogno di contatti elettrici striscianti sull'albero del rotore, detti spazzole, per funzionare. Il motore sincrono è composto da uno statore corredato degli avvolgimenti del circuito di alimentazione e un rotore che supporta diversi poli magnetici con polarità alterna. Lo statore deve creare un campo elettromagnetico che mantenga il rotore sospeso in mezzo a due cuscinetti e in movimento. Questo campo elettromagnetico può essere creato dando energia agli avvolgimenti dello statore, oppure esiste già: questo è il caso dei magneti permanenti. Esistono infatti

materiali ferrosi con magnetismo permanente, e materiali semi magnetici che vengono magnetizzati fino ad essere praticamente magneti permanenti. Una volta che è creato il campo magnetico intorno allo statore, con meno energia rispetto a quella necessaria nel motore tradizionale, si riesce a far muovere il rotore. Statore e rotore sono dotati di magneti che generano campi magnetici con polarità opposta, e dato che campi magnetici opposti si attraggono, il rotore viene trascinato dai suoi magneti, attratti da quelli di carica opposta dello statore. Quando stanno per allinearsi ad essi la polarità viene invertita da un dispositivo attivato da un sensore di posizione (che sostituisce le spazzole) generando una nuova attrazione e costringendo lo statore a compiere un ulteriore movimento. Il movimento del rotore è determinato da questo inseguimento del campo magnetico che si allontana ogni volta che viene raggiunto.

I motori a magneti permanenti hanno efficienza elevatissima, prossima al 100 %, coppia reattiva istantanea, durata importante e sono più leggeri a causa del minor avvolgimento. Hanno dimensioni compatte e sono poco rumorosi, ma hanno costo più elevato rispetto ai motori a spazzole poiché necessitano di un sistema di gestione più complicato.

3.1.3 Motori a induzione

In questi motori, anche detti asincroni, la velocità di rotazione e la frequenza di alimentazione non coincidono.

Lo statore deve creare un campo elettromagnetico per permettere al rotore di muoversi, e questo campo viene creato fornendo energia agli avvolgimenti dello statore (mentre nel caso del motore a magneti permanenti il campo magnetico esiste già, grazie all'utilizzo di magneti permanenti). Quando viene alimentato lo statore, il suo campo magnetico ne induce uno negli avvolgimenti del rotore. La velocità di rotazione dell'asse è sempre minore di quella del campo rotante dello statore, che dipende dalla frequenza

della tensione di alimentazione, da cui l'asincronismo. Ha un rendimento inferiore rispetto a quello del motore sincrono, motivo per cui al giorno d'oggi nell'ambito dell'automotive viene preferito il motore a magneti permanenti, ma nonostante questo è affidabile e non necessita di particolare manutenzione. Inoltre garantisce una buona resistenza alle temperature alte. Fino al 2019 questi motori sono stati usati da Tesla su Model S e Model X, dopo di che anche per questi modelli sono stati adottati i motori sincroni, già sperimentati nella Model 3.

3.2 Recupero energetico

Il recupero energetico corrisponde alla fase della frenata rigenerativa, e in quel momento l'intero sistema inverte il suo funzionamento: il motore si trasforma in un generatore e sfrutta l'energia che gli viene trasmessa dalle ruote per generare corrente, che poi l'inverter trasforma da alternata a continua per reimmetterla nella batteria. La frenata sfrutta l'attrito: premendo il pedale del freno, le pinze dei freni premono sui dischi e l'attrito rallenta le ruote. Questo genera energia cinetica che viene dissipata sotto forma di calore. Questa fase vanta una certa importanza: se l'energia che viene sfruttata per ricaricare la batteria non venisse effettivamente recuperata, verrebbe dispersa durante la fase di decelerazione. L'energia cinetica che andrebbe persa durante la frenata viene quindi convertita in energia elettrica. La frenata rigenerativa non deve essere vista come uno strumento per ripristinare completamente l'autonomia dell'auto, ma va intesa come supporto alla funzione di ricarica. In alcuni modelli di auto è disponibile la modalità di guida "one pedal", in cui l'energia cinetica viene recuperata solo quando viene tolto il piede dall'acceleratore. In questo modo, per far rallentare l'auto in modo graduale non è necessario l'uso del pedale del freno, e così facendo si aumentano l'autonomia dell'auto e l'efficienza energetica.

Capitolo 4

Sistemi di conversione dell'energia

4.1 Infrastrutture di ricarica AC vs DC

Esistono due grandi insiemi di stazioni per la ricarica dei veicoli elettrici: quelle che permettono una ricarica in corrente alternata (AC) e quelle che forniscono una ricarica in corrente continua (DC). Più comunemente si sente parlare di ricarica lenta (AC) e ricarica ad alta potenza (DC), poiché la differenza più evidente tra le due è la rapidità della seconda rispetto alla prima.

La rete elettrica europea viene distribuita tramite una rete in corrente alternata e arriva nelle nostre case in monofase, quindi con un'unica fase che porta i 220 V, o in trifase, 380 V distribuiti su tre linee. Le batterie delle auto elettriche, come quelle di pc e smartphone, si ricaricano solamente in corrente continua, quindi è necessario un trasformatore che converta la corrente alternata della rete in corrente continua, adatta all'ingresso della batteria. La conversione da AC a DC per i veicoli elettrici può avvenire sia a bordo dell'auto, tramite l'on-board charger, che nella stazione di ricarica stessa.

Le modalità di ricarica dei veicoli elettrici sono definite dalla normativa per le stazioni di ricarica (IEC 61851-1). Il modo 1 consiste nel collegamento diretto del veicolo ad una presa di corrente. Non utilizza un dispositivo detto Control Box, che è un sistema di sicurezza PWM (Pulse Width Modulation) per la ricarica che andrebbe posizionato tra il punto di allacciamento alla rete elettrica e il veicolo in carica. Proprio per l'assenza di questo circuito questa modalità è consentita solo per la ricarica privata. Questo primo modo è tipicamente utilizzato per la ricarica di bici elettriche e scooter.

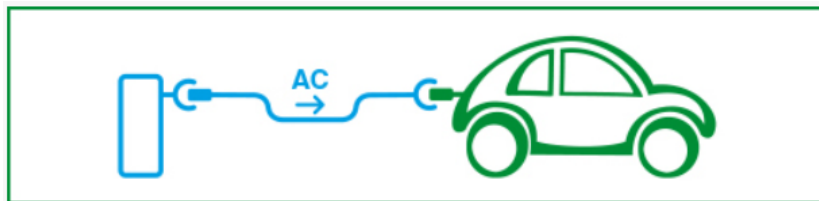


Figura 4.1: Modo 1

La seconda modalità prevede la presenza del Control Box, che garantisce una ricarica sicura, montato sul cavo di ricarica. Le prese utilizzabili sono sia quelle domestiche che industriali. Anche questo modo di ricarica non è consentito nelle aree pubbliche.

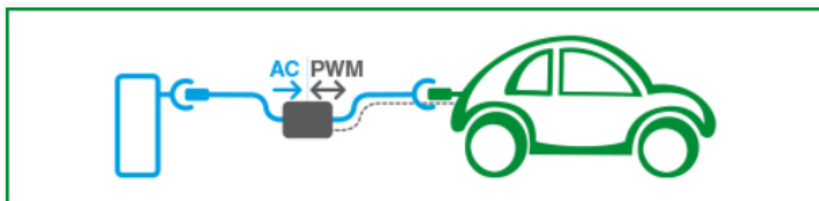


Figura 4.2: Modo 2

Il terzo modo è l'unico consentito in Italia per caricare l'auto in luoghi pubblici in corrente alternata: è infatti il sistema delle wallbox e delle colonnine. La ricarica avviene tramite un sistema di alimentazione collegato permanentemente alla rete elettrica e il Control Box è integrato nella struttura di ricarica.

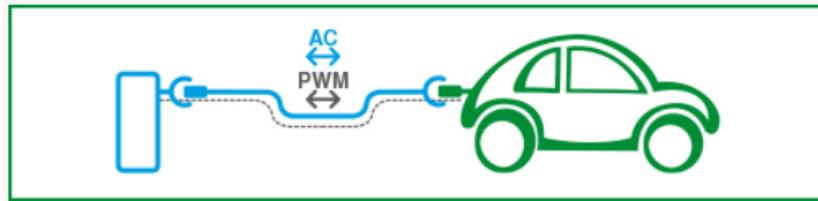


Figura 4.3: Modo 3

L'ultimo modo, il quarto, è l'unico a prevedere una corrente continua. La stazione di ricarica in questo caso può essere più grande di una semplice colonnina poiché ospita un convertitore che trasforma la corrente da alternata a continua prima di attraversare il cavo di ricarica.

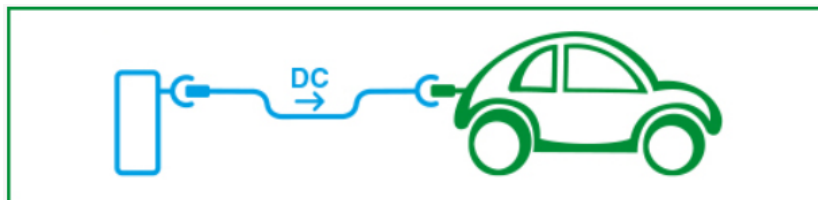


Figura 4.4: Modo 4

4.2 Stazioni di ricarica in AC

La ricarica pubblica in AC e quella domestica tramite wallbox sono due esempi della cosiddetta "ricarica lenta". In questi casi il connettore standard richiesto è il Type 2 , che può arrivare a 32 A e 230 V in monofase, mentre in trifase si possono raggiungere i 63 A e i 400 V. La potenza fornita dalla colonnina dipende dal suo allacciamento: a livello domestico la potenza raggiunge i 3, 4.5 o 6 kw in base al contratto stipulato col proprio gestore energetico, ma può essere ridotta in base alla potenza istantaneamente utilizzata da altri dispositivi domestici connessi alla rete. Altre tipologie di connettori per la ricarica dei veicoli elettrici in corrente alternata sono il Tipo 1, che raggiunge al massimo i 32 A e i 230 V in monofase, ed è lo standard giapponese e americano; il Tipo 3A, utilizzato solo per veicoli leggeri

quali scooter e quadricicli, che in monofase raggiunge i 16 A e i 230 V, e il Tipo 3C, ormai in disuso, che in monofase tocca i 32 A e i 230 V mentre in trifase 63 A e 400 V. Il Tipo 1 si trova solo lato veicolo, il Tipo 2 sia lato veicolo che lato colonnina, mentre Tipo 3A e Tipo 3C sono connettori solo lato colonnina. Si fa riferimento alla figura 4.5.



Figura 4.5: Tipologie di connettori

4.2.1 On-board charger (OBC)

L'on-board charger è un sistema di ricarica installato a bordo del veicolo che si occupa di trasformare la corrente alternata fornita dalla rete elettrica, in corrente continua adatta a ricaricare le batterie dell'auto. Le caratteristiche dell'on-board charger condizionano il tempo di ricarica e la durata della batteria. L'OBC deve presentare caratteristiche quali efficienza, affidabilità, elevata densità di potenza, costo contenuto, volume e peso ridotti. La struttura tipica di un on-board charger si può osservare in figura 4.6: è composto

da uno stadio PFC, uno stadio di conversione DC-DC isolato e un filtro d'uscita, al quale viene collegato il battery management system e, a seguire, il pacco batterie.

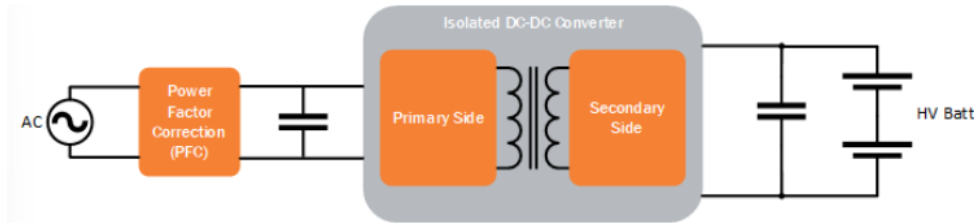


Figura 4.6: Topologia di OBC

I sistemi di ricarica on-board devono avere efficienza energetica superiore al 95 %, affinché la ricarica sia rapida. Alla batteria deve essere fornita la maggior quantità possibile della potenza prelevata dalla rete, minimizzando l'energia sprecata, che viene convertita in calore, quindi meno ne viene generato, più diventa semplice la gestione termica del sistema. Contribuisce a questo il fattore di potenza (Power Factor, PF), che è dato dal rapporto tra potenza reale (W) e potenza apparente (VA), le due componenti del flusso di alimentazione in corrente alternata, e assume un valore compreso tra 0 e 1, dove l'1 individua una circostanza ideale e si ottiene quando le forme d'onda della corrente e della tensione in ingresso sono perfettamente in fase tra loro, mentre un valore inferiore ad 1 si ottiene quando le due forme d'onda sono sfasate. Lo stadio PFC (Power Factor Correction) viene usato per avvicinare il fattore di potenza al valore teorico unitario e ridurre le armoniche; garantisce che la tensione di rete alternata sia prelevata riducendo al minimo la distorsione, così da ottenere un fattore di potenza elevato che massimizzi la potenza reale disponibile. Quando il fattore di potenza è basso viene assorbita più corrente e si surriscalda l'apparecchiatura. Un esempio di un semplice stadio PFC è osservabile nella figura 4.7: la topologia è quella di un convertitore boost, il circuito si basa su una configurazione composta da un raddrizzatore a ponte di diodi, un transistor di commutazione S1, un

diodo e un'induttanza.

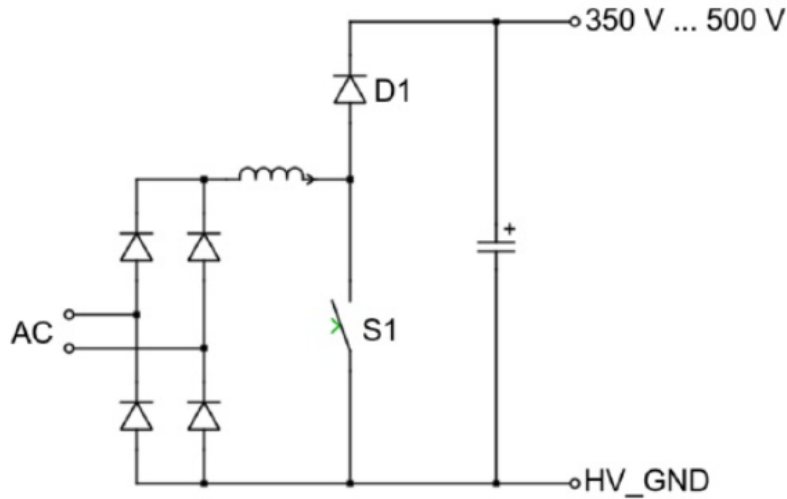


Figura 4.7: Topologia di uno stadio PFC

L'altro componente fondamentale dell'OBC è il convertitore DC-DC, a cui viene richiesto di gestire le elevate potenze e tensioni richieste per la carica della batteria. Un altro requisito per l'OBC è la scalabilità, ovvero l'on-board charger deve essere capace di gestire le diverse classi di potenza e le varie tipologie di connettori per la ricarica.

4.3 Stazioni di ricarica in DC

Riferendosi alla ricarica in corrente continua si parla di ricarica "ad alta potenza" e, in questo caso, il raddrizzatore da AC a DC è posto a monte sulla stazione, evitando il coinvolgimento dell'on-board charger dato che la corrente continua arriva direttamente alla batteria. La ricarica in continua è più veloce poiché, bypassando l'OBC, non dedica del tempo alla conversione da AC a DC. Il connettore standard richiesto è il CCS Combo 2 per le auto europee e il CHAdeMO per le asiatiche. Lo standard CCS (Combined Charging System) è un unico connettore di ricarica che permette sia la ricarica rapida in corrente continua che quella lenta in alternata. Prende il nome di

Combo 2 poiché è realizzato a partire dal connettore Tipo 2. CHAdeMO è invece lo standard per la ricarica veloce più diffuso al mondo. I veicoli di questo connettore ne hanno anche un altro per la ricarica in AC, tipicamente il Tipo 1.

4.4 Supercharger

Tra le infrastrutture di ricarica ha una certa rilevanza la rete Supercharger di Tesla, che in Europa ha superato le 10.000 colonnine per la ricarica ad alta potenza, distribuite in circa 900 stazioni, come si può vedere da figura 4.8. Queste stazioni di ricarica utilizzano corrente continua (DC) anziché

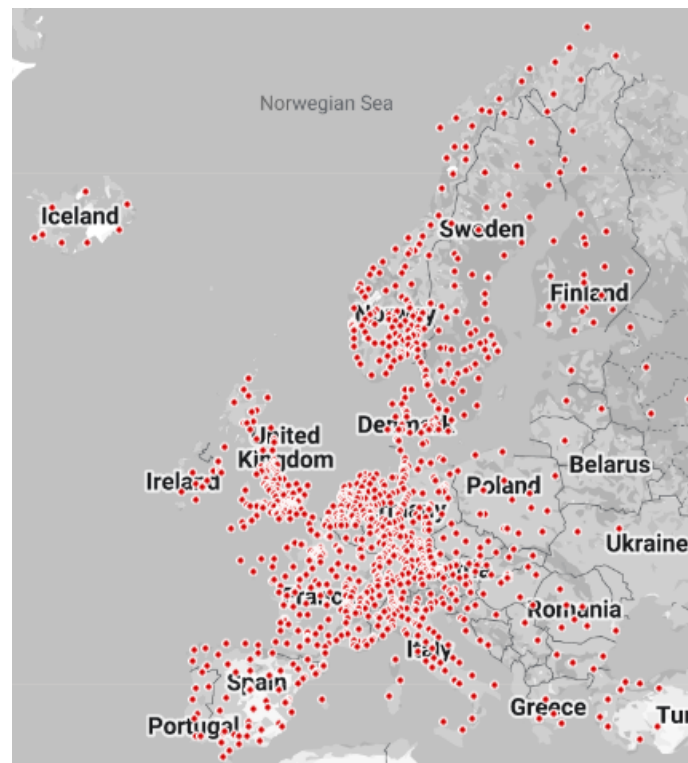


Figura 4.8: Mappa dei Supercharger in Europa

alternata (AC) e ricaricano le batterie dei veicoli Tesla in modo molto più rapido rispetto a stazioni di ricarica pubbliche meno potenti o alla ricarica

domestica. Il rifornimento di energia viene gestito da un software che, nel momento in cui il veicolo viene collegato al Supercharger, verifica la compatibilità tra questo e la stazione e decide se avviare o no il processo di ricarica. Il software regola la potenza di ricarica tenendo conto della capacità della batteria e delle condizioni ambientali, usufruendo di un sistema di raffreddamento per mantenere la temperatura della batteria sotto controllo durante tutto il processo. A seconda del modello del veicolo e delle condizioni di ricarica, questi supercharger possono caricare i veicoli fino all'80% della capacità della batteria in circa 30-45 minuti. Una volta completata la ricarica, il software che gestisce la stazione comunica al veicolo che la ricarica è terminata e a quel punto il connettore può essere scollegato e riposto nella colonnina. Utilizzare frequentemente la ricarica rapida però può avere un impatto non positivo sulla durata della batteria.

I veicoli Tesla utilizzano un tipo di connettore specifico, il Tesla connector, e fino allo scorso anno in Italia potevano usufruire dei superchargers solo i clienti Tesla, mentre negli ultimi mesi alcune stazioni di ricarica sono state messe a disposizione anche per veicoli non Tesla, che siano compatibili con un connettore di tipo CCS.

Capitolo 5

Conclusioni

In data 31 gennaio 2023, secondo l'associazione italiana Motus-e che si occupa di mobilità elettrica, le auto elettriche pure circolanti in Italia sono poco più di 170.400. Nella figura 5.1 è possibile osservare l'andamento della crescita della circolazione dei veicoli elettrici fino al 2030, anno nel quale, secondo le previsioni, sulle nostre strade circolerebbero 4 milioni di veicoli elettrici. I punti di ricarica pubblica sono 36.772, ma le previsioni ne prevedono 110.000 entro il 2023. L'andamento specifico è riportato nella figura 5.2.

In conclusione, al giorno d'oggi i veicoli elettrici sono all'avanguardia, ma come in ogni cosa sono sempre possibili ulteriori miglioramenti. Per quanto la strada da percorrere sia ancora lunga, la curiosità verso il mondo dell'auto elettrica e le necessità dal punto di vista ecologico per salvaguardare il nostro pianeta continueranno ad attirare l'attenzione delle case automobilistiche nei prossimi anni.

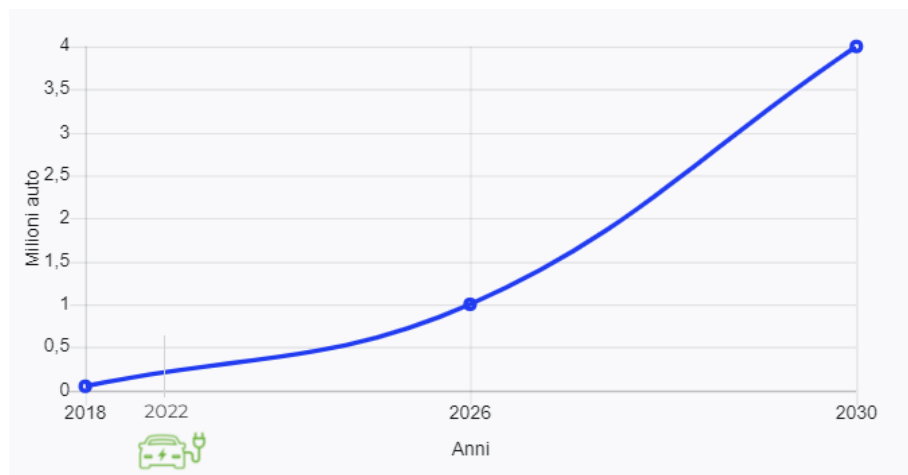


Figura 5.1: Previsione circolazione veicoli elettrici

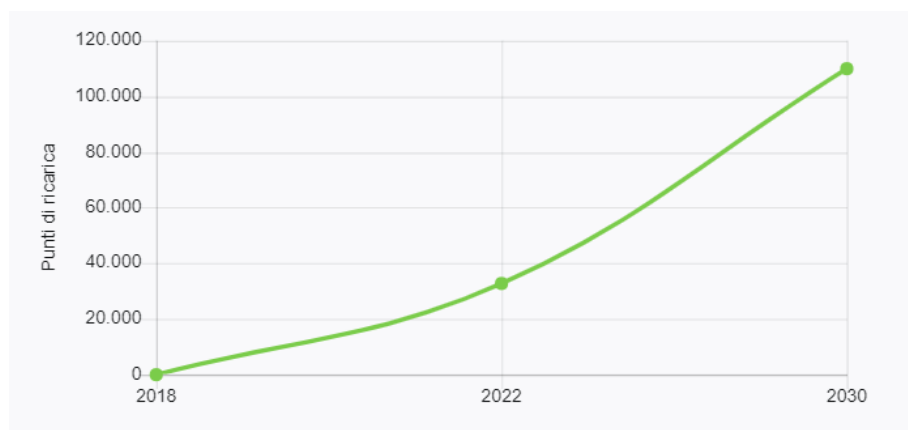


Figura 5.2: Previsione punti di ricarica ad accesso pubblico

Bibliografia

- comunicato stampa "MiTE, phase out: auto nuove con motore a combustione interna entro il 2035", Governo Italiano
- "Auto elettriche, crollano le vendite in Italia: i dati e le ragioni del fenomeno", sky tg 24
- "Svolta UE: stop alla vendita di auto a benzina e diesel dal 2035", il sole 24 ore
- "Electric cars: 6 EU countries have less than 1 charger per 100 km of road; 1 charger in 7 is fast", ACEA ()
- dati statistici immatricolazioni anno 2022, UNRAE
- "Le auto elettriche più vendute in Italia nel 2022", insideevs
- "Sistemi di gestione di batterie al litio per la trazione elettrica", G. Fantechi
- "Nuove regole dell'UE per batterie più sostenibili ed etiche", Parlamento europeo
- "Capire i veicoli elettrici: coppia, potenza e velocità base", M. Ceraolo
- "Frenata rigenerativa, come funziona sulle auto elettriche", M. Cerfeda
- "Onboard charger per veicoli elettrici: funzionamento e topologie", S. Lovati

- Automotive and domotics - BMS. N. Trivellin
- PCIM Europe digital days 2020: a Power Semiconductor Technology for On-board charger
- "Why do electric vehicles have on-board chargers?", J. Lewis
- "Modi di ricarica", L. Ferrari
- "Le infrastrutture di ricarica ad uso pubblico in Italia, report", Motus-e