UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

SISTEMI DI ACCUMULO E GESTIONE DELL'ENERGIA NELL'AUTO ELETTRICA

Relatore:

Prof. Matteo Meneghini

Laureando:

Alessandro Lion

ANNO ACCADEMICO 2023 – 2024

12 novembre 2024

INDICE

1 INTRODUZIONE 4
1.1 CAMBIAMENTI CLIMATICI 4
1.2 STORIA DELL'AUTO ELETTRICA 7

2 SISTEMI DI ACCUMULO 9
2.1 SISTEMI DI ACCUMULO ELETTROCHIMICO: PILE, BATTERIE E ACCUMULATORI 9
2.2 CARATTERISTICHE DI UNA BATTERIA 11
2.3 TIPOLOGIE DI BATTERIE NEI VEICOLI ELETTRICI 13
2.3.1 BATTERIE AL PIOMBO ACIDO 13
2.3.2 BATTERIE AL NICKEL-CADMIO (NiCd) 15
2.3.3 BATTERIE AGLI IONI DI LITIO (Li-Ion) 16

3 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS) 19
3.1 ACQUISIZIONE DELLA TEMPERATURA 20
3.2 ISOLAMENTO GALVANICO 21
3.3 ACQUISIZIONE DELLA TENSIONE 21
3.4 ACQUISIZIONE DELLA CORRENTE 22
3.5 COMUNICAZIONE 23
3.6 INTERFERENZE ELETTROMAGNETICHE (EMI) 23
3.7 CONTROLLO DEI CONTATTORI 24
3.8 BILANCIAMENTO 25

4 MOTORE ELETTRICO 27
4.1 MOTORI DC 28
4.1.1 MOTORE DC BRUSHED ("a spazzole") 28
4.1.2 MOTORE DC BRUSHLESS ("senza spazzole") 30
4.2 MOTORI AC 31

4.2.1 MOTORE SINCRONO 31
4.2.2 MOTORE ASINCRONO 32
4.3 DIFFERENZE MOTORE SINCRONO vs ASINCRONO 33

5 SISTEMI DI CONVERSIONE DI ENERGIA 35
5.1 FRENATA RIGENERATIVA 35
5.2 INVERTER DI TRAZIONE 36
5.3 ONBOARD CHARGER (OBC) 37

6 VANTAGGI E SVANTAGGI DELL'AUTO ELETTRICA E PROSPETTIVE FUTURE 40
6.1 INCENTIVI 46
6.2 PROSPETTIVE FUTURE 47
6.3 NUOVE TECNOLOGIE PER IL FUTURO 49

1 INTRODUZIONE

1.1 CAMBIAMENTI CLIMATICI

In questi ultimi anni, a causa del graduale aumento dell'inquinamento nel nostro pianeta, si sta cercando di rendere tutto ciò che ci circonda più ecosostenibile.

Sicuramente una volta l'ecosostenibilità era un optional spesso non considerato dalle piccole e grandi imprese.

I primi utilizzi del carbone come combustibile per produrre energia risalgono addirittura a tre millenni fa e veniva utilizzato sia dai Romani, sia in oriente dai Cinesi.

Ma è solo a cavallo del XVIII e XIX secolo con la rivoluzione industriale che il carbone diventa il vero protagonista della produzione energetica mondiale.

Tutto iniziò a partire dal 1769 quando lo scozzese James Watt perfezionò la macchina a vapore (inventata dall'inglese Thomas Newcomen sessant'anni prima) utilizzando il carbone rendendola così più efficiente; questa poi venne impiegata nell'estrazione del carbone, la cui produzione aumentò esponenzialmente. Di conseguenza, anche grazie al progresso scientifico, qualche decennio dopo vennero costruiti i primi treni e navi a vapore e i primi impianti di riscaldamento a carbone.

Persino il petrolio, come il carbone, fu utilizzato nell'antichità, seppur di rado, da popolazioni come i Babilonesi che sembra abbiano utilizzato il bitume[1] per costruire le mura di Babilonia.

Non essendoci il modo per estrarlo, anche nei secoli a venire venne sempre utilizzato molto poco fino all'arrivo della Seconda Rivoluzione Industriale alla fine del XIX secolo

[1] *bitume: è un derivato del petrolio molto denso e viscoso.*

che, in seguito all'invenzione del motore a combustione interna, divenne un colosso alla pari del carbone nella produzione di energia.

Durante il processo di combustione del carbone e del petrolio, viene rilasciata nell'aria una grande quantità di anidride carbonica, monossido di carbonio, diossido di carbonio, ossido di azoto, ossido di zolfo e altri gas inquinanti che, oltre a danneggiare la salute umana, danneggiano l'ambiente che ci circonda contribuendo in modo significativo ai cambiamenti climatici e all'effetto serra.

Da come si può vedere dal grafico della figura 1, da 400'000 anni fa a oggi c'è sempre stata un'oscillazione della concentrazione di anidride carbonica (CO_2) nell'aria variabile nel tempo, con picchi massimi e minimi di circa 300 e 190 ppm[2] rispettivamente.

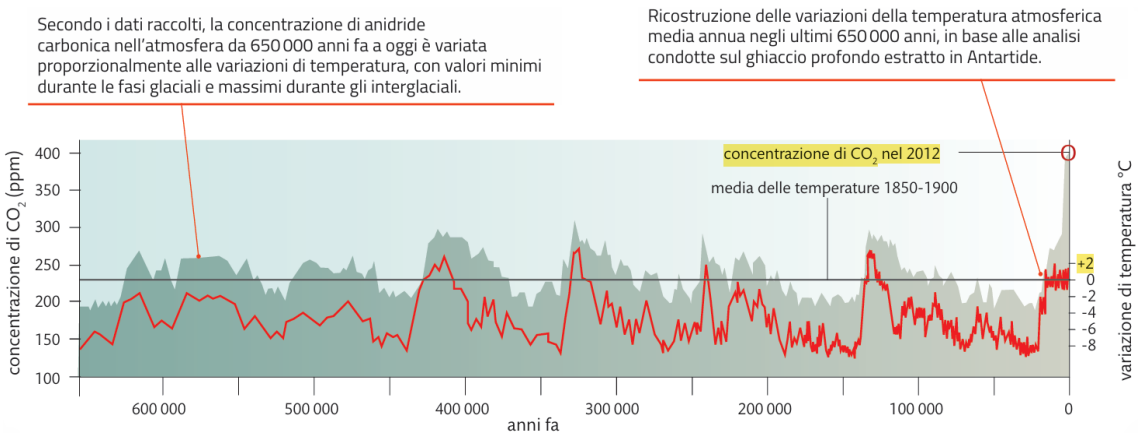


Figura 1: andamento della temperatura e della concentrazione di CO_2 negli ultimi 650'000 anni

Inoltre, negli ultimi due secoli i climatologi hanno riscontrato un notevole aumento della concentrazione di CO_2 nell'aria che è passata da 280ppm a più di 400ppm (+43%), quantità che non veniva superata da più di 3 milioni di anni.

Sempre dalla figura 1, si può notare come la temperatura sia all'incirca direttamente proporzionale alla quantità di ppm di CO_2. Di conseguenza, un aumento così

[2] *ppm: parti per milione. Ad esempio 400ppm significa che ci sono 400 molecole di CO_2 ogni milione di molecole atmosferiche.*

sproporzionato dei livelli di concentrazione di CO_2, porta inevitabilmente a un aumento della temperatura terrestre causando gravi danni all'ecosistema.

Tuttavia, durante il processo di combustione, viene prodotta una grande quantità di energia che ha il grande vantaggio di essere a basso costo e in forma concentrata, immagazzinabile e trasportabile. Tutta questa energia proveniente dai combustibili fossili rappresenta circa l'80% dell'energia primaria consumata nel mondo: viene utilizzata nelle industrie, nei trasporti, negli impianti di riscaldamento, in agricoltura, in alcuni cosmetici e in molto altro ancora…

Per limitare l'impatto del cambiamento climatico, il 12 dicembre 2015 alla Conferenza di Parigi ben 196 paesi si sono accordati per impegnarsi a contenere l'aumento della temperatura media globale entro la soglia di sicurezza di +1,5°C rispetto alla media del secolo scorso.

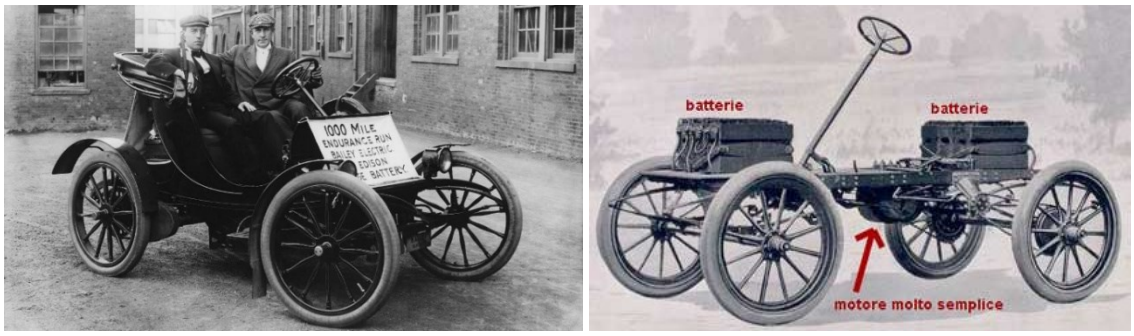
In aggiunta, nel 2020 l'Europa ha stipulato il Geen Deal ("Patto Verde") che mira a ridurre le emissioni del 55% entro il 2030 per poi azzerarle nel 2050.

Secondo il "Rapporto STEMI" pubblicato nel giugno 2022 in Italia dal MIMS (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibile): "*Il settore dei trasporti è direttamente responsabile del 25,2% delle emissioni di gas a effetto serra e del 30,7% delle emissioni di CO_2, a cui si aggiungono le emissioni nel settore dell'aviazione e del trasporto marittimo internazionali. A sua volta, il trasporto stradale è stato responsabile del 92,6% delle emissioni totali del settore, che nel complesso (strada, ferrovia, navi e aerei) consuma 38,6 Mtep/anno di combustibili fossili e 11 TWh/anno di energia elettrica*".

Il mondo automotive si sta impegnando da tempo per cercare di rendere i veicoli sempre più green cercando di ridurre le emissioni, il modo più semplice per intervenire tempestivamente è investire sull'elettrico.

1.2 STORIA DELL'AUTO ELETTRICA

La prima auto elettrica a batteria risale addirittura al 1835 quando l'imprenditore scozzese Robert Anderson ideò la prima carrozza elettrica. A partire da tale data ci furono un susseguirsi di innovazioni che alla fine dell'Ottocento portarono l'auto elettrica a essere considerata addirittura alla pari di un'auto a benzina o a vapore. Un dato significativo, e quasi sorprendente, è dato dal numero di auto elettriche presenti negli USA a New York, Boston e Chicago nel 1900: circa il 34% dei veicoli era elettrico!



Auto elettrica (figura 2A) della fine dell'Ottocento e sua struttura (figura 2B)

Purtroppo, con l'avvento della Seconda Rivoluzione Industriale, il motore a combustione in pochi anni ha completamente rivoluzionato il settore dei trasporti introducendo nel mercato veicoli sempre più prestanti ed economici rispetto a quelli elettrici che non riuscirono a stare al passo. Per questo la progressiva crescita dell'elettrico si arrestò bruscamente e venne soppiantata dall'industria del carbone e del petrolio.

Un'auto elettrica dell'epoca non aveva solo svantaggi rispetto alle altre, anzi, se il trend di crescita non si fosse bloccato così bruscamente per più di mezzo secolo probabilmente la storia del settore automotive ora sarebbe diversa. Spesso però, non sempre vincono le tecnologie migliori, ma quelle più supportate dalla società, dall'economia, e dalle forze politiche.

L'interesse dell'auto elettrica inizia lentamente a tornare sulla scena internazionale verso gli anni '60 -'70 del Novecento a causa dell'aumento del prezzo del carburante e dalla

formazione dei primi gruppi di ecologisti che criticavano l'eccessivo inquinamento nelle città provocato da tali veicoli.

Anno dopo anno vennero fatti studi sempre più approfonditi sul tema del riscaldamento globale e, a partire dagli anni '90, vennero stipulate in California e in altre parti del mondo le prime leggi per contrastare l'inquinamento dell'aria. Da questo momento in poi, fino ai giorni nostri, il mercato degli EV (Electric Vehicle) è in continuo sviluppo e sta cercando il più velocemente possibile nuove tecnologie che permettano di rimpiazzare o migliorare in ogni aspetto un veicolo a benzina.

2 SISTEMI DI ACCUMULO

Un sistema di accumulo di energia, detto anche Electrical Energy Storage System (EESS), è un insieme di dispositivi in grado di assorbire energia e liberare energia elettrica.

Al giorno d'oggi i sistemi di accumulo più usati sono di tipo meccanico, chimico, elettrico ed elettrochimico.

Un EESS di tipo meccanico assorbe energia potenziale (es. bacino idroelettrico) o cinetica (es. volano) e la converte in energia elettrica.

Un EESS di tipo chimico utilizza l'energia chimica (es. idrogeno) e la trasforma in energia elettrica.

Un EESS di tipo elettrico sfrutta le cariche elettriche per produrre energia elettrica (es. supercapacitori)

Mentre un EESS di tipo elettrochimico produce energia elettrica a partire da energia elettrochimica (es. batterie)

2.1 SISTEMI DI ACCUMULO ELETTROCHIMICO: PILE, BATTERIE E ACCUMULATORI

Se si mettono a contatto due specie chimiche, un ossidante e un riducente, ed essi danno origine ad una reazione redox (o di ossidoriduzione) spontanea, si avrà un rapido passaggio di elettroni dal riducente all'ossidante: il primo si ossida, l'altro si riduce. (figura 3)

Figura 3: Effetto della reazione redox tra una lamina di zinco e una soluzione acquosa di solfato di rame ($CuSO_4$): attorno alla lamina si forma uno strato di rame metallico dovuto alla riduzione degli ioni Cu^{2+} e dall'ossidazione dello ione Zn^{2+}.

Se i due composti vengono separati, posti in due semicelle e collegati tramite un filo conduttore, gli elettroni saranno obbligati a passare attraverso quel filo per far avvenire la reazione generando una corrente elettrica.

Per semplicità il riducente, cioè quello che cede elettroni all'altra semicella, viene chiamato anodo (-) mentre l'ossidante viene chiamato catodo (+).

Questo dispositivo prende il nome di "batteria primaria" o "pila".

La caratteristica principale della pila è rappresentata dalla irreversibilità delle reazioni chimiche che avvengono al suo interno: una volta terminati i reagenti delle semicelle (cioè quando la pila è scarica), non può più essere ricaricata e deve essere smaltita.

Un esempio comune di pila è la pila di Daniell (figura 4). È formata principalmente da due semicelle: una semicella è costituita da una lamina di zinco (Zn) immersa in una soluzione di solfato di zinco ($ZnSO_4$), mentre l'altra da una lamina di rame (Cu) immersa in una soluzione di solfato di rame ($CuSO_4$). Le due lamine, gli elettrodi, sono collegate direttamente da un filo conduttore esterno che consente il passaggio di elettroni e quindi di corrente.

Completata la configurazione, inserendo un amperometro sul filo, si può apprendere il passaggio di corrente. Dopo un certo intervallo di tempo si può notare come la lamina di zinco vada lentamente consumandosi, mentre quella di rame vada lentamente aumentando di massa. Per compensare questo effetto viene introdotto un ponte salino (un tubo di vetro) tra le due soluzioni, con all'interno una sostanza gelatinosa dove è disciolto un sale (ad esempio Na_2SO_4 o KCl), che ha lo scopo di mantenere neutre le due soluzioni. Il ponte salino permette così di chiudere il circuito elettrico creatosi.

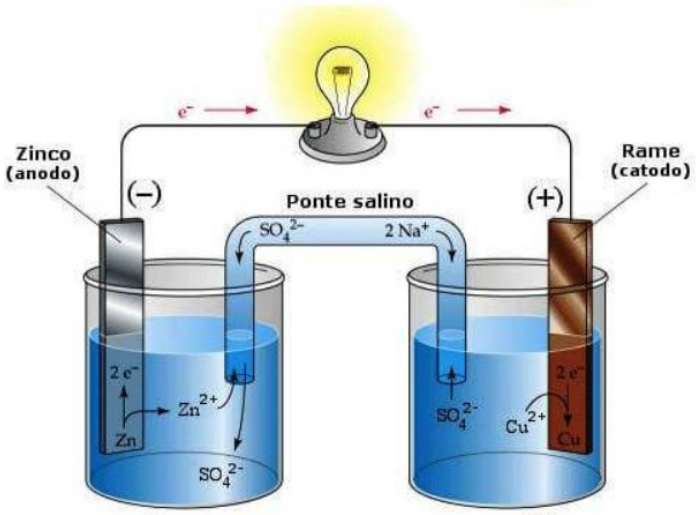


Figura 4: Schema della pila Daniell (1836).

L'altra categoria di pile presente in commercio prende il nome di "batteria secondaria" o "accumulatore".

Il termine più generale "batteria" invece viene per lo più utilizzato quando si parla di più pile collegate in serie o in parallelo (più raro).

2.2 CARATTERISTICHE DI UNA BATTERIA

Di solito quando si va ad acquistare una batteria, la scelta va fatta in base al carico che deve essere alimentato, quindi bisogna considerare diversi fattori come:

- Tensione nominale [V]: indica la differenza di potenziale tra l'anodo e l'catodo

- Capacità [Ah o "Amperora"]: indica la quantità di carica elettrica disponibile durante la scarica. Essendo una caratteristica dinamica, può essere influenzata da diversi fattori esterni come ad esempio l'usura o la temperatura.

  Un leggero e controllato ma non eccessivo aumento della temperatura, accelera le reazioni elettrochimiche interne alla batteria comportando un leggero aumento della sua capacità.

  Tuttavia, bisogna tenere in considerazione che con l'aumentare della temperatura aumenta anche il processo di autoscarica[3] della batteria.
- Densità di energia o energia specifica: è la quantità di energia espressa in wattora che viene immagazzinata per unità di volume [Wh/m^3] o di peso [Wh/kg]. Questo valore indica la reale autonomia del dispositivo dove la batteria è installata.
- Durata: indica il numero di cariche e scariche che possono essere effettuate fino a che il livello di tensione della batteria non arrivi più ad alimentare il carico prestabilito.
- Modalità e tempo di ricarica: influenzano la durata della batteria. Durante la ricarica va a ripristinarsi la differenza di potenziale ai due capi della batteria e, ovviamente più la corrente di ricarica è elevata, più la batteria si ricarica in fretta. Tuttavia amperaggi eccessivamente elevati rischiano di surriscaldare e danneggiare le componenti chimiche della batteria riducendo significativamente la sua durata.
- Costo della batteria in relazione alla durata.
- Smaltimento: a parità di prestazioni, è preferibile sceglierne una che abbia un minor impatto ambientale.

[3] *Autoscarica: è un processo di scarica della batteria, causato da reazioni elettrochimiche parassite interne, che avviene anche se la batteria non viene utilizzata.*

2.3 TIPOLOGIE DI BATTERIE NEI VEICOLI ELETTRICI

Le batterie più comuni utilizzate nei veicoli elettrici sono*:*

- Piombo-acido
- Nickel-cadmio
- Ioni di litio

2.3.1 BATTERIE AL PIOMBO ACIDO

Questo tipo di batteria ricaricabile è il più antico ed è stato inventato nel 1859 dal fisico francese Gaston Planté.

È composta da due elettrodi di piombo (più precisamente: il catodo è diossido di piombo (PbO_2), mentre l'anodo è solo piombo spugnoso (Pb)) immersi in una soluzione acquosa elettrolitica di acido solforico (H_2SO_4). Essendo questi materiali poco costosi, la diffusione di questo tipo di batteria fu rapida e di successo.

Durante la fase di scarica avviene una reazione chimica attraverso la quale i materiali attivi dei due elettrodi si combinano con l'elettrolita formando il solfato di piombo ($PbSO_4$): un sale che si presenta sotto forma di cristalli bianchi poco solubili in acqua. Questi cristalli tendono a depositarsi sulle pareti degli elettrodi accumulandosi man mano che la batteria si scarica. Quando tutto l'elettrolita ha reagito, la reazione si arresta e la batteria è considerata completamente scarica.

Durante la fase di ricarica viene sfruttata l'energia elettrica per attuare il processo inverso: i cristalli di solfato di piombo depositati sul catodo si trasformano nuovamente in diossido di piombo e acido solforico, mentre quelli depositati sull'anodo si trasformano in piombo e acido solforico.

La batteria al piombo è formata da sei celle disposte in serie in modo da fornire ai capi una tensione di circa 12V a una temperatura di riferimento di circa 25°C.

Inoltre possiede una discreta efficienza che si aggira intorno al 75-80%, questo vuol dire che il restante 20-25% di energia viene dispersa sotto forma di calore durante la fase di carica e scarica.

In ambito automotive, di solito vengono impiegate nell'alimentazione dei motorini di avviamento dei veicoli, sfruttando quella che viene chiamata "corrente di spunto".

La corrente di spunto rappresenta il picco massimo di corrente che la batteria può fornire, generalmente per un periodo di tempo che va dai 5 ai 10 secondi. Il valore di questa corrente di solito è 6-8 volte più grande della normale capacità della batteria. Ad esempio per una batteria da 20Ah, la corrente di spunto può arrivare a valere circa 120-160A.

Se le batterie al piombo vengono impiegate nei veicoli elettrici, per ricaricarle al meglio e farle durare più a lungo, a causa delle loro caratteristiche fisico-chimiche, bisogna ricaricarle molto lentamente con una corrente di circa del 10% della sua capacità massima. Di conseguenza questo processo può durare anche oltre le 12 ore! Ogni qualvolta che la batteria viene ricaricata, per evitare di danneggiarla irrimediabilmente, bisogna ricaricarla completamente.

Hanno anche una densità di energia molto bassa e questo comporta un'autonomia limitata rendendo così il veicolo incapace di percorrere tratte lunghe o medio-lunghe senza dover essere ricaricato completamente durante il tragitto.

Un altro problema è quello della solfatazione[4] che riduce notevolmente la capacità della batteria causandole danni permanenti.

---

[4]*solfatazione: è un fenomeno di deterioramento precoce della batteria al piombo causato da malfunzionamento o da inattività prolungata con la batteria completamente o parzialmente scarica. Durante una ricarica, non tutti i cristalli di solfato di piombo si scinderanno in acido solforico e piombo/diossido di piombo e alcuni rimarranno attaccati agli elettrodi. Di conseguenza alla scarica successiva la quantità di reagente sarà inferiore causando un prematuro esaurimento della batteria.*

Proprio per questi motivi, nei veicoli elettrici, questo tipo di batterie è stato rimpiazzato quasi totalmente dalle batterie agli ioni di litio che forniscono prestazioni nettamente superiori, soddisfando maggiormente le esigenze della società moderna.

Per quanto riguarda lo smaltimento, se portate nei centri di raccolta adeguati, possono essere riciclate quasi totalmente minimizzando lo spreco e l'inquinamento.

2.3.2 BATTERIE AL NICKEL-CADMIO (NiCd)

La prima batteria al nickel-cadmio è stata costruita nel 1899 dallo svedese Waldemar Jungner e per tutti i primi del '900 è stato il "main competitor" delle batterie al piombo.

Il catodo è composto da idrossido di nichel (II) ($Ni(OH)_2$) con una piccola quantità di grafite per aumentare la conducibilità elettrica mentre l'anodo principalmente da idrossido di cadmio ($Cd(OH)_2$). È presente anche una piccola quantità di idrossido di potassio (KOH) che funge da elettrolita.

La reazione chimica che avviene è reversibile ed è la seguente:

$$2NiO(OH) + Cd + 2H_2O \longleftrightarrow 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2.$$

Durante la scarica va da sinistra a destra, mentre durante la carica è l'opposto.

Una pila di NiCd generalmente ha una tensione nominale a vuoto di 1.3V e per formare la corrispettiva batteria basta mettere in serie n pile, con $n = \lfloor \frac{Tensione\ in\ Volt\ ricercata}{1.3V} \rfloor$.

Hanno maggiore capacità e densità di energia rispetto a quelle in piombo e questo le garantisce una buona durata e una buona efficacia se utilizzate in ambito EV (Electric Vehicle).

Riesce a fornire una tensione costante nel tempo anche se poi tende a calare drasticamente in prossimità della scarica totale.

La corrente di ricarica ottimale va dal 10% al 25% della capacità totale della batteria, rendendo così la ricarica un po' più veloce.

Tuttavia, bisogna tenere conto anche che le batterie al NiCd:

- sono più costose delle batterie al piombo
- soffrono a temperature molto fredde (< -5°C), quindi è bene evitare che raggiungano tale temperatura.
- soffrono del cosiddetto "effetto memoria": durante il caricamento della batteria, si formano dei microcristalli di cadmio che poi vengono "sciolti" durante la scarica. Ma se la carica successiva avviene quando la scarica non è stata completata, alcuni dei microcristalli non hanno fatto in tempo a sciogliersi e con la nuova carica si ingrandiscono rendendo così più difficile l'assorbimento nella scarica successiva. Questo provoca una sorta di reazione a catena che fa ingrandire sempre di più questi cristalli e di conseguenza la batteria a lungo andare perde capacità e quindi tensione fino a renderla inutilizzabile.

Inoltre il cadmio è un metallo pesante molto tossico sia per l'uomo che per l'ambiente quindi è importantissimo che lo smaltimento avvenga nei centri di raccolta competenti.

2.3.3 BATTERIE AGLI IONI DI LITIO (Li-Ion)

Il primo accumulatore al litio è stato ideato dal chimico statunitense M. Stanley Whittingham nel 1970. Tuttavia affinché questi accumulatori vengano messa in commercio bisognerà aspettare fino al 1991.

Le batterie Li-Ion sono formata da un catodo di ossido di cobalto di litio ($LiCoO_2$), da un anodo di grafite cristallina e da un separatore, ovvero un solvente che isola i due ambienti.

Durante la ricarica gli ioni Li^+ vengono trasportati tramite il solvente dal polo positivo a quello negativo della batteria e vengono assorbiti dagli atomi di carbonio presenti nella grafite, mentre durante la scarica il processo sarà inverso, cioè gli ioni Li^+ si sposteranno dal polo negativo al positivo.

Le batterie agli ioni di litio hanno numerosi pregi e sono più efficienti rispetto ai due tipi visti precedentemente: infatti sono le più usate e famose in ambito EV e non solo.

L'efficienza energetica è di circa del 95%, quindi molto buona.

Hanno un'alta densità di energia: ciò permette di immagazzinare molta energia in poco spazio. Questo comporta che, a parità di prestazioni, una batteria agli ioni di litio sia nettamente più piccola e 5 volte più leggera di una a piombo o a nickel-cadmio quindi, a parità di spazio occupato, un veicolo elettrico equipaggiato con una batteria Li-Ion avrà un'ottima autonomia che gli consente di fare viaggi anche di qualche centinaio di chilometri senza il bisogno di essere ricaricata.

Durante la ricarica, può essere fornita anche una corrente uguale alla sua capacità garantendo una ricarica molto più rapida.

La fase di scarica può avvenire senza che la batteria si rovini anche se non è stata ricaricata del tutto, quindi una ricarica di soli 20 minuti può caricarla di quel tanto che basta per uno spostamento breve, cosa che può risultare molto utile nella frenesia della società moderna.

Le batterie Li-Ion sono durevoli nel tempo e garantiscono in media 10 volte più cicli di carica di una normale batteria al piombo.

Riescono a mantenere una tensione elevata costante nel tempo anche quando hanno poca autonomia rimasta: di solito una batteria ha una differenza di potenziale costante di circa 3,5-4,5V.

Se l'"effetto memoria" si può definire quasi trascurabile in questo tipo di batterie, il fenomeno dell'autoscarica è ancora presente anche se lieve.

Visto che la batteria si danneggerebbe irreversibilmente se la carica scendesse al di sotto ad un certo valore, la maggior parte dei dispositivi è dotata di un circuito dedicato che, durante la scarica, lo spegne nel caso in cui la batteria raggiungesse tale valore.

Per quanto riguarda il prezzo, le batterie Li-Ion sono più costose delle precedenti però, se si va ad analizzare il rapporto tra durata/capacità/energia erogata e il prezzo, senza dubbio risultano le migliori.

Le batterie a litio però hanno alcuni problemi di sicurezza dovuti all'alta infiammabilità del litio. Quindi è bene evitare che una batteria Li-Ion rimanga per tempi prolungati in esposizione diretta ai raggi solari o che rimanga abbandonata in ambienti troppo caldi: c'è il rischio che si rompa facendo fuoriuscire i liquidi o che esplodano.

È inoltre importantissimo che non vengano gettate insieme ad altri rifiuti poiché, quando la spazzatura viene lavorata dalle aziende di riciclaggio dei rifiuti, potrebbero esplodere innescando un incendio o addirittura una serie di esplosioni a catena se è presente altro materiale infiammabile.

Con gli anni anche le batterie Li-Ion si sono modificate cercando di mantenere le proprie qualità riducendo i difetti.

In particolare le batterie al litio-ferro-fosfato (LiFePO4), attualmente utilizzate nella produzione dei veicoli ibridi ed elettrici, sono considerate più durevoli nel tempo e più sicure in quanto resistono maggiormente alle variazioni di temperatura e al surriscaldamento. Tuttavia, tutto questo va a discapito del costo, della densità di energia, della leggerezza e hanno anche bisogno di un sistema di gestione della batteria (BMS) all'avanguardia per gestirla al meglio.

3 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)

Il sistema di gestione della batteria (tradotto dall'inglese Battery Management System (BMS)) è un'unità di controllo elettronica che ha il compito di regolare e monitorare a 360° la batteria al fine di massimizzarne le prestazioni e la durata.

Il sistema è una sorta di architettura master-slave dove il master ("capo") è l'unità di controllo principale, mentre gli slaves ("schiavi") sono i vari sensori e dispositivi che contribuiscono a fornire al master i dati da processare.

Si basa principalmente su due indicatori: lo State of Charge (SoC)(%) e lo State of Health (SoH)(%):

- Lo SoC indica la capacità in tempo reale della batteria come percentuale della sua capacità totale.
- Lo SoH indica lo stato di salute della batteria in tempo reale come percentuale della sua capacità originale (cioè della batteria nuova). Ad esempio anzianità, usura e variazioni di temperatura possono contribuire notevolmente all'abbassamento di tale parametro nel tempo.

La complessità del BMS dipende da quanto il dispositivo a cui è applicato sia sofisticato, più parametri ci sono da analizzare, più deve implementare algoritmi complessi per operare correttamente. Dispositivi come le auto elettriche, la cui batteria è formata da centinaia di celle tutte da monitorare meticolosamente, saranno controllate da algoritmi molto complicati.

Lo stato della batteria di un veicolo elettrico viene monitorato dal BMS le cui funzioni principali sono:

- Acquisizione della temperatura, della tensione e della corrente
- Comunicazione tra l'unità centrale (master) e quelle periferiche (slaves)

- Resistenza contro le Interferenze Elettromagnetiche (EMI)
- Controllo dei contattori
- Bilanciamento

3.1 ACQUISIZIONE DELLA TEMPERATURA

L'acquisizione della temperatura nel caso di un veicolo elettrico va effettuata su ogni cella ed è un punto chiave da dover considerare durante la progettazione di un BMS.

Oltre alla scelta del numero e del tipo di sensore più adatto, analogico o digitale, bisogna anche capire dove collocare il sensore all'interno della batteria per avere la massima precisione: spesso è necessario effettuare una simulazione al calcolatore per scoprirlo. È possibile che venga richiesta anche un'analisi della temperatura dei dispositivi periferici che interagiscono con le celle della batteria per avere una misurazione più accurata.

La temperatura deve essere valutata nelle celle nei tre casi: carica, immagazzinamento di energia e scarica. È bene consultare la casa produttrice per sapere i limiti operativi di temperatura delle celle prima di iniziare con le misurazioni.

Tuttavia, anche alle temperature di lavoro ottimali della batteria, senza una misurazione precisa ed efficace della temperatura, tensione e corrente, si può incorrere nel fenomeno della "placcatura del litio".

Questo fenomeno tende a verificarsi di solito o quando le celle raggiungono temperature troppo fredde (< 0°C) oppure quando si usano dei mezzi di ricarica rapida, ovvero tramite sistemi che caricano la batteria con alte intensità di corrente.

Durante la ricarica, gli ioni di litio si accumulano sulla superficie dell'anodo della batteria formando uno strato di litio metallico. Col tempo, questo strato aumenta sempre di più impedendo l'ingresso agli altri ioni di litio provenienti da catodo e questo contribuisce a ridurre notevolmente le prestazioni e la durata della batteria danneggiandola irrimediabilmente.

Una soluzione a questo problema non è ancora stata trovata e molte università nel mondo si sono coalizzate per cercare di trovarne una.

3.2 ISOLAMENTO GALVANICO

Spesso le batterie sono divise in due parti isolate galvanicamente: una parte di componenti ad alto voltaggio e una parte a basso voltaggio. L'isolamento galvanico si verifica quando le due parti sono elettricamente indipendenti, ovvero quando non avviene passaggio di corrente tra esse.

Anche i sensori termici impiegati devono essere isolati galvanicamente in modo tale da evitare che segnali di alta tensione vadano a finire nel circuito di bassa tensione, danneggiandolo, o viceversa.

3.3 ACQUISIZIONE DELLA TENSIONE

In un'auto elettrica con batteria al litio è presente un canale, adibito per l'acquisizione della tensione per ogni cella collegata in serie, e un dispositivo meno preciso del primo che ha il compito di avvisare il BMS-master quando la tensione oltrepassa i limiti imposti. Solitamente, questi limiti sono programmati da array di resistori.

La misurazione della tensione delle celle di solito si effettua integrando alcuni BMS Front-end chips al BMS. I chip di questo tipo più comuni e utilizzati hanno una precisione di 1mV e un range che va dai 12 ai 16 bit che consentono una risoluzione di circa 380 µV.

Invece, l'acquisizione della tensione del pacco batteria viene fatta da un dispositivo esterno formato da un partitore di tensione, un convertitore d'impedenza, un filtro e un Convertitore Analogico Digitale (ADC).

La velocità di conversione dei dati di tensione può variare molto a seconda dell'applicazione, ovviamente più è elevata, più è preferibile.

L'obiettivo principale è quello di misurare il SoC con la massima precisione quindi sicuramente migliore sarà la precisione di misurazione della tensione, migliore sarà anche quella del Soc.

Tuttavia, per avere un SoC ancora più accurato, è necessario conoscere anche i dati sulla corrente.

3.4 ACQUISIZIONE DELLA CORRENTE

Per determinare in modo dinamico il SoC si usa un contatore di Coulomb già tarato (ad esempio dopo una carica completa si pone SoC = 100%),

Come per le altre acquisizioni, non è bene basarsi solo su questo tipo di misurazione. In questo caso utilizzando solo il contatore di Coulomb non offrirebbe un risultato preciso del SoC in quanto i sensori di corrente potrebbero avere caratteristiche non ideali. Bisogna quindi implementare degli algoritmi che combinino i risultati di tutte queste acquisizioni, solo così si potrà avere la stima più accurata possibile del SoC.

I sensori di corrente utilizzati in un'auto elettrica devono essere sensibili alle basse correnti (nel range dei mA) ma possono anche arrivare a rilevare correnti fino ai 1000A; devono avere un'alta precisione e un'ampia larghezza di banda per catturare i rapidi cambi di corrente. Inoltre è importante che siano immuni alle interferenze elettromagnetiche (EMI) che potrebbero alterare la misurazione.

Esistono due tipi di sensori per rilevare la corrente: quelli isolati e quelli collegati galvanicamente. I sensori isolati utilizzano i sensori ad effetto Hall e sfruttano le loro proprietà elettromagnetiche; mentre i sensori collegati galvanicamente sono i più comuni e utilizzano una resistenza di shunt.

La resistenza di shunt è un resistore di precisione inserito in serie nel flusso di corrente caratterizzato da valori molto bassi, dell'ordine dei microOhm o dei milliOhm. Al passaggio della corrente attraverso tale resistenza, si genera una tensione, anch'essa molto bassa, che è direttamente proporzionale alla corrente. Poiché questa tensione è molto

ridotta, prima di essere convertita da un ADC deve essere amplificata. L'ADC a sua volta, è integrato in un microcontrollore che analizza i dati ricevuti.

3.5 COMUNICAZIONE

Il BMS deve comunicare non solo con la batteria, ma anche con l'intero sistema del veicolo, inclusa la Vehicle Control Unit (VCU); per questo motivo deve adattarsi alle esigenze del sistema.

Le interazioni devono essere chiare e affidabili per evitare perdite di informazioni.

Per facilitare la comunicazione, al BMS spesso viene fornita un'interfaccia come la Controller Area Network (CAN) che stabilisce alcune condizioni limite per garantire uno scambio sicuro delle informazioni, in termini di velocità, robustezza e affidabilità del segnale.

Altre interfacce come la Local Interconnect Network (LIN), la Onewire, la I2C e la SPI sono meno costose e molto usate per comunicazione a breve distanza, però sono più lente e meno flessibili.

Invece, se si cercano interfacce con velocità superiori a 1 Mb/s (velocità massima di un bus CAN), si può optare per un bus FlexRay o per un cavo Ethernet.

3.6 INTERFERENZE ELETTROMAGNETICHE (EMI)

Tutti i sensori sono soggetti a EMI che possono alterare le loro rilevazioni.

Per cercare di ridurre al massimo l'influenza delle EMI, si inseriscono dei dispositivi come induttori al modo comune e condensatori di blocco. Questi componenti elettrici fungono da filtro e si installano vicino ai sensori in modo tale da catturare più rumore

esterno possibile: se venissero posizionati lontani dai sensori, il segnale filtrato accumulerebbe nuovamente rumore nel percorso tra il filtro e il sensore.

3.7 CONTROLLO DEI CONTATTORI

Un contattore è un interruttore comandato a distanza in grado di aprire o chiudere un circuito. In una batteria vengono utilizzati per poter connettere o disconnettere i due poli in caso di necessità.

Se la corrente che circola al suo interno è dentro i limiti prestabiliti allora il contattore opera da cortocircuito e permette il passaggio di corrente tra i due poli. Se invece rileva una quantità di corrente che supera tali limiti, apre il circuito e sconnette i due poli. Così facendo, per via dell'alta intensità di corrente "tagliata", si forma un arco di corrente per qualche istante di secondo.

Bisogna far particolare attenzione perché questo arco sprigiona una potenza elevatissima raggiungendo temperature elevatissime anche intorno ai 10'000°C.

In regime AC (corrente alternata), l'arco elettrico non è un grosso problema in quanto il contattore può essere aperto nell'istante in cui l'oscillazione presenta corrente nulla (o minima), mentre in regime DC (corrente continua) essendo la corrente costante nel tempo, quando il circuito viene aperto, l'intensità di corrente nel contattore sarà sempre molto elevata ed è proprio in questo caso che si formano gli archi elettrici più potenti. Pertanto, i contattori sono dotati di estintori di arco magnetici che allontanano l'arco dagli elettrodi delle due celle della batteria.

Se si accende il circuito quando è ancora presente della differenza di potenziale tra le lamelle di contatto[5], non appena si chiude il contattore, le lamelle iniziano a rimbalzare ripetutamente producendo calore fino a quando non si forma un arco elettrico. Quando

[5] *lamelle di contatto: sono piccole parti metalliche che si trovano nel contattore e contribuiscono all'apertura o alla chiusura dell'interruttore*

smettono di rimbalzare, le due parti si uniscono, talvolta saldandosi se la corrente è particolarmente elevata.

Per cercare di evitare questo fenomeno, si pone un circuito chiamato "unità di precarica" formato da un altro contattore in serie a una resistenza che deve garantire un potenziale nullo tra le due lamelle.

La sua presenza è obbligatoria e ha lo scopo di aumentare lentamente la tensione del link DC fino a quando non abbia eguagliato quella del pacco batteria, così poi il contattore principale può essere acceso (chiuso) in sicurezza.

3.8 BILANCIAMENTO

In un dato istante, si può notare che i valori del SoC delle varie celle della batteria non sono tutti uguali: molto spesso capita che le celle si scarichino e si usurino in tempi diversi causando disomogeneità all'interno della batteria.

Le cause di questa disomogeneità sono causate da diversi fattori, riassunti nella figura 5 sottostante:

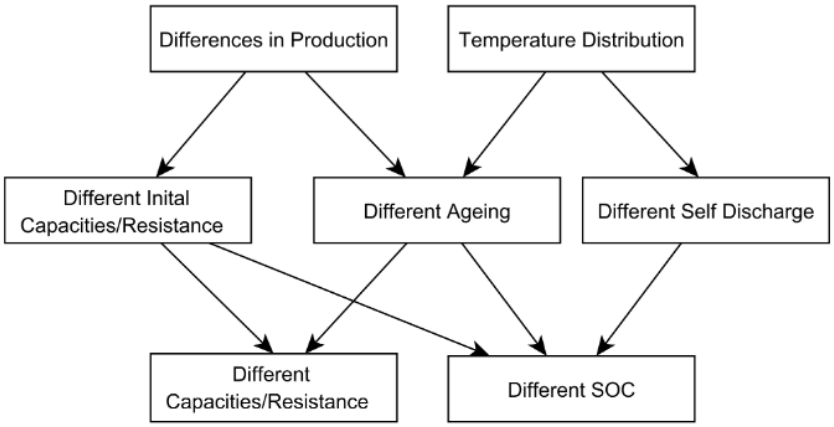


Figura 5: fattori che possono portare a disomogeneità tra le varie celle dello stesso pacco batteria

Il bilanciamento è un sistema che aiuta a prevenire il sottocarico o il sovraccarico delle celle.

Esistono due tipi di bilanciamento:

- Attivo:
  Le celle con bassa capacità vengono supportate da quelle con capacità superiore mediante alcuni algoritmi di controllo.
  In particolare, l'energia del pacco batteria passa attraverso un trasformatore il quale alimenta una singola cella alla volta che ha bisogno di energia.
  L'utilizzo del trasformatore contribuisce ad aumentare notevolmente il costo del sistema, quindi questo tipo di bilanciamento è poco utilizzato.

- Passivo:
  Questo approccio è il più utilizzato rispetto al bilanciamento attivo perché è più semplice, meno costoso e più durevole nel tempo: utilizza solo dei resistori posti in parallelo alle celle.
  Attraverso questi resistori, le celle con capacità maggiore redistribuiranno l'energia alle celle più scariche in modo automatico.
  L'unico svantaggio del bilanciamento passivo è che risulta lento a bilanciare rispetto al metodo attivo, ma nonostante ciò rimane il più efficace.

4 MOTORE ELETTRICO

Il motore elettrico è una componente fondamentale dell'auto elettrica in quanto permette di convertire energia elettrica immagazzinata nella batteria in energia meccanica, facendo girare le ruote e garantendo così il movimento della vettura.

I primi motori elettrici erano a corrente continua (DC) e sono stati sviluppati a partire dalla seconda metà dell'Ottocento. Attualmente, però, i motori più utilizzati sono quelli a corrente alternata (AC) che offrono una maggior efficienza e migliori prestazioni.

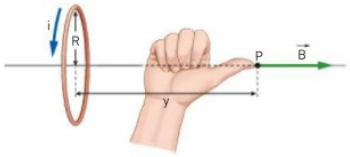
I due elementi fondamentali in comune tra i due motori sono lo statore e il rotore:

- Lo statore avvolge il rotore ed è fisso. Può essere un magnete permanente o un elettromagnete (se il motore è più grande) con polarità Nord-Sud fissate e genera un campo magnetico fisso le cui linee di campo andranno dal polo nord verso il polo sud.
- Il rotore, o indotto, è la parte rotante che gira all'interno dello statore formata anch'esso da un elettromagnete. Esistono diversi tipi di rotore come ad esempio il rotore a gabbia di scoiattolo, a magneti permanenti o avvolto.

4.1 MOTORI DC

4.1.1 MOTORE DC BRUSHED ("a spazzole")

In un motore DC Brushed, nel caso di rotore avvolto, l'elettromagnete è avvolto da un filo di rame (diventa una sorta di bobina) in modo tale che quando viene alimentato da corrente, produce un campo magnetico la cui direzione e verso la si può trovare con la regola della mano destra[6] (vedi nota o figura a fianco).



Il rotore inizierà quindi a ruotare fino a quando non trova la condizione di equilibrio, ovvero quando il suo campo magnetico sarà allineato con quello dello statore.

Visto che questo porterebbe al massimo una mezza rotazione, si aggiunge un dispositivo chiamato commutatore che ha lo scopo di invertire il verso della corrente che fluisce nel rotore ogni volta che i due campi magnetici si sono parzialmente o quasi del tutto allineati. Cambiando il verso della corrente, la direzione del campo magnetico sarà la stessa, ma il verso sarà opposto. In questo modo il rotore ruoterà in modo continuo e senza interruzioni.

Il commutatore è un anello formato da due o più placche conduttrici (sempre multiple di due) di uguali dimensioni staccate tra loro che ruotano con il rotore. Collegando il circuito mediante due spazzole ai lati del commutatore, tramite contatto, è possibile far fluire la corrente all'interno del rotore.

Il rotore ruoterà fino a quando non si cesserà di dare corrente alle spazzole.

---

[6] *Regola della mano destra: per scoprire la direzione del campo magnetico di una spira (una spira è un anello di filo conduttore) o di una bobina (N spire in successione avvolte dallo stesso filo conduttore) percorsa da corrente, basta immaginare di afferrare una spira con la mano destra con le dita si chiudono nel verso positivo della corrente: il pollice indicherà la direzione del campo magnetico.*

Per capire meglio il suo funzionamento, consideriamo il modello semplificato di un motore un elettrico a corrente continua che ha una spira conduttrice come rotore.

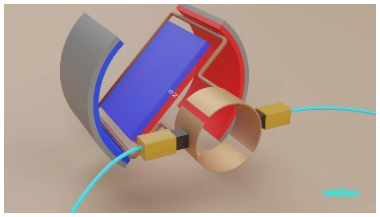


Figura 6A

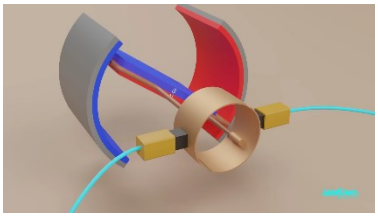


Figura 6B

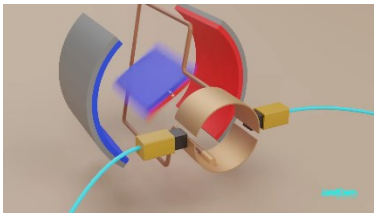


Figura 6C

Funzionamento:

- Le batterie alimentano il motore DC con corrente DC.
- La corrente fluisce nella spira grazie alle spazzole e al commutatore generando un campo magnetico che fa girare parzialmente il rotore e quindi anche il commutatore (figura 6A e 6B).
- Girando, la spazzola passerà ad avere contatto prima con una placca e poi con l'altra: dopo questo cambio di placca, la corrente fluirà nel circuito con verso opposto, quindi anche il campo magnetico generato dal filo avrà la stessa direzione ma verso opposto. Questo provoca un'inversione dei poli magnetici della spira (figura 6C) che continuerà a girare cercando sempre di allineare i suoi poli con quelli dello statore.

Utilizzando la spira, che corrisponde ad avere solo due placche nel commutatore, può portare ad avere irregolarità nella rotazione della spira o, nel peggiore dei casi, c'è il rischio che le spazzole si blocchino esattamente a metà in corrispondenza del piccolo spazio di stacco tra le due placche del commutatore.

Per ovviare a questo problema si divide l'anello del commutatore in più placche in modo da inserire più spire all'interno del rotore creando un avvolgimento (bobina). Più spire ci sono maggiore sarà la coppia (forza rotante).

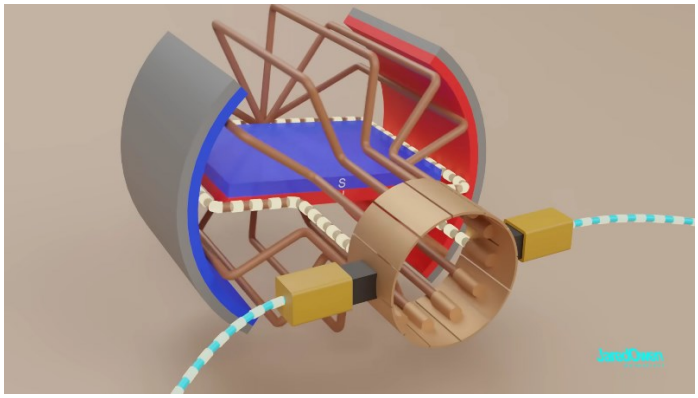


Figura 7: esempio di motore DC Brushed con 12 spire

In conclusione, per garantire una rotazione continua del rotore è necessario che la corrente cambi di verso in modo periodico.

4.1.2 MOTORE DC BRUSHLESS ("senza spazzole")

Il funzionamento del motore DC Brushless, in inglese Brushless DC Motor (BLDC), è sostanzialmente lo stesso del motore a spazzole solo che il commutatore meccanico viene sostituito da un commutatore elettronico che monitora il rotore mediante un sensore o, in alcuni casi, grazie a degli algoritmi di regolazione.

I motori a spazzole sono più semplici e più economici da realizzare in quanto per costruirli vengono utilizzati solo due semplici fili con alle estremità le spazzole.

Tuttavia le spazzole, agendo in modo meccanico, sono soggette a usura e hanno una minor durata, quindi di conseguenza necessitano più manutenzione.

Un motore BLDC garantisce migliori prestazioni, maggior durata, un controllo più preciso del moto del rotore e più velocità di rotazione (e quindi anche una maggiore coppia di avviamento).

Inoltre, la mancanza delle spazzole permette di evitare tutti quei fenomeni di scintillamento che il contatto prolungato tra le spazzole e il commutatore può comportare.

4.2 MOTORI AC

I motori a corrente alternata sono i motori attualmente più utilizzati nei veicoli elettrici.

Oltre allo statore e al rotore, un motore AC possiede anche un dispositivo, chiamato inverter, in grado di convertire la corrente continua che arriva dalle batterie in corrente alternata.

Lo statore di un motore elettrico AC ha una forma ad anello come quello dei motori DC, ma, invece di essere un magnete permanente o un elettromagnete, ha al suo interno delle bobine alimentate da corrente alternata monofase o trifase. Di conseguenza queste generano un campo magnetico rotante all'interno dell'anello che tende a far ruotare il rotore che sta al suo interno.

Esistono due tipi di motori AC: quello sincrono e quello asincrono.

4.2.1 MOTORE SINCRONO

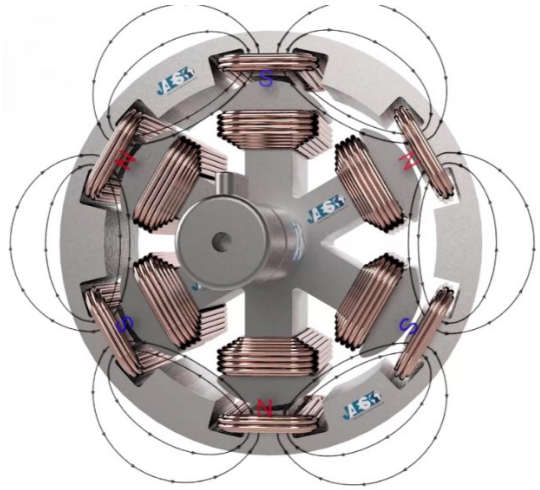


Figura 8: statore e rotore di un motore sincrono

Il rotore di un motore sincrono è formato da magneti permanenti con polarizzazione alternata in modo tale che il campo magnetico dello statore attragga quello del rotore. Ciò garantisce una rotazione del rotore a una velocità angolare costante, chiamata anche velocità di sincronismo: $\omega_s(\text{rad/s}) = \frac{f}{P}$, dove f è la frequenza della corrente in Hertz e P

il numero di coppie di poli del rotore. Questa velocità è proprio la stessa del campo magnetico rotante generato dallo statore, quindi il rotore ruoterà in modo “sincronizzato” con esso.

Questo motore però è molto suscettibile a eventuali forze esterne che potrebbero accelerare o rallentare il moto del rotore; se ciò accade i campi magnetici dello statore e del rotore rischiano di disallinearsi causando il bloccaggio del motore.

Un altro problema è l’avviamento del motore: se il rotore è fermo, il campo magnetico rotante non è in grado di farlo muovere per via del susseguirsi troppo rapido del cambio polarizzazione dello statore che non è in grado di “unirsi” al magnete permanente di polarità opposta del rotore in modo tale da trascinarlo per farlo partire.

Proprio per questo motivo, di solito un motore sincrono è spesso accoppiato a uno asincrono o a un inverter.

Questi problemi possono essere parzialmente risolti inserendo una “gabbia di scoiattolo” tra il rotore e lo statore; la gabbia si carica elettricamente e fa smuovere il rotore fino a quando non raggiunge la velocità di sincronismo.

Spesso è preferibile utilizzare dei sensori magnetotermici che proteggano il motore dalle sovracorrenti visto che ne è particolarmente sensibile.

Talvolta, il motore sincrono può essere utilizzato anche come alternatore nella fase di frenata rigenerativa.

4.2.2 MOTORE ASINCRONO

Il motore asincrono o a induzione è il tipo di motore elettrico più usato in ambito automotive e sfrutta il principio dell’induzione elettromagnetica.

All’interno dello statore viene inserito un rotore o avvolto o a gabbia di scoiattolo cortocircuitati alle due estremità con due dischi, al centro di esso c’è un foro dove vi è inserito l'albero di rotazione.

La corrente che alimenta lo statore genera un campo magnetico rotante al suo interno che a sua volta produce una corrente indotta sugli avvolgimenti o sulla gabbia. La corrente indotta genererà un campo magnetico indotto che farà girare il rotore.

Se il rotore ruotasse alla stessa velocità del campo magnetico generato dallo statore, la variazione di flusso di campo magnetico nel tempo sarebbe nulla e di conseguenza anche la corrente indotta sarebbe nulla. Questo comporterebbe una forza di Lorentz pari a zero e quindi una coppia nulla sull'albero di rotazione del rotore.

Infatti, grazie alla legge di Lenz, possiamo affermare che il campo magnetico indotto tenderà a far ruotare il rotore in senso opposto rispetto al campo magnetico dello statore e per questo motivo il rotore girerà più lentamente.

Data la velocità di rotazione del campo magnetico dello statore n_s (>0) (velocità di sincronismo) e la velocità di rotazione del campo magnetico indotto sul rotore n_r (<0 perché di verso opposto), con $|n_r| < |n_s|$, allora il campo magnetico risultante sarà concorde con quello dello statore e avrà modulo n_s-n_r, che è < n_s, quindi il rotore ruoterà in modo asincrono (cioè più lento) rispetto al campo generato dallo statore, ma nello stesso verso.

Come nel motore sincrono la velocità di sincronismo è $\omega_S(\text{rad/s}) = \frac{f}{P}$ oppure se espressa in rotazioni per minuto $n_S(\text{rpm}) = \frac{60f}{P}$.

La velocità effettiva di rotazione del rotore è chiamata velocità di slittamento: $s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$ dove *s* è lo scorrimento e indica in percentuale quanto più lentamente gira il rotore rispetto al campo magnetico dello statore. In genere *s* è sempre un valore inferiore al 3-6%.

4.3 DIFFERENZE MOTORE SINCRONO vs ASINCRONO

A differenza del motore sincrono, quello asincrono è "auto-avviante": se il motore è spento, basta semplicemente alimentarlo con corrente alternata per far immediatamente muovere il rotore. Tuttavia al giorno d'oggi, con l'aiuto degli inverter, anche un motore sincrono è in grado di auto-avviarsi.

A causa dello scorrimento, il motore asincrono risulta meno reattivo ai cambi di velocità e di conseguenza meno preciso al variare della corrente; inoltre, sempre per questo motivo, a parità di corrente di alimentazione, un motore sincrono risulta più efficiente.

Il motore asincrono è più resistente alle alte temperature in quanto il magnete permanete del motore sincrono potrebbe smagnetizzarsi.

Un motore asincrono ha anche molti altri vantaggi rispetto a tutti gli altri motori:

- Ha una struttura molto semplice e di conseguenza è meno costoso
- Richiede una facile manutenzione in quanto non possiede spazzole, sensori da configurare, anello di commutazione o magneti permanenti
- Più duraturo nel tempo

Al giorno d'oggi le industrie automobilistiche preferiscono montare sui veicoli elettrici motori più leggeri e più "vivaci", preferendo un motore sincrono rispetto a quello asincrono. Tuttavia, alcune importanti case automobilistiche come la Tesla, in alcune vetture come la Model 3 e la Model Y, continuano a contare sulla semplicità e sulla longevità del motore asincrono posizionandolo sull'asse anteriore della vettura.

5 SISTEMI DI CONVERSIONE DI ENERGIA

È fondamentale che un'auto elettrica sia in grado di gestire al meglio l'energia che riceve, limitando gli sprechi e massimizzando le prestazioni.

I sistemi di conversione di energia principali in un EV sono: la frenata rigenerativa, l'inverter di trazione e l'onboard charger.

5.1 FRENATA RIGENERATIVA

Come spiegato nel capitolo precedente, un motore elettrico AC di un'auto, grazie alla corrente fornita dalla batteria, è in grado di convertire energia elettrica in energia meccanica. Tuttavia può agire anche in modo inverso come generatore sfruttando il sistema della frenata rigenerativa: quando viene rilasciato il pedale dell'acceleratore di un veicolo in movimento, anche senza premere il freno, l'auto inizierà a decelerare gradualmente. Grazie all'attrito delle ruote sull'asfalto che fa girare in modo passivo il rotore del motore, viene prodotta una corrente AC che, passando attraverso l'inverter, viene convertita in DC in modo tale da poter ricaricare la batteria.

Più veloce si muove l'auto e quindi il rotore, più energia riesce a produrre questo sistema.

La frenata rigenerativa però non può essere considerata come l'unico freno della vettura e deve essere sempre affiancata ad un impianto frenante funzionante con freni "ad attrito". Questo perché la sua potenza di frenata è molto inferiore a quella di un normale freno ad attrito, quindi nei casi in cui bisogna diminuire di molto la velocità in poco spazio non basterebbe.

Alla lunga, questo doppio sistema frenante porta a una diminuzione dell'usura dei dischi e delle pastiglie dei freni fino al 70%, in quanto ogni volta parte della frenata viene

assorbita dalla frenata rigenerativa. Questo non significa che un'auto elettrica abbia bisogno di meno manutenzione ai freni, anzi: visto che questi elementi sono poco sollecitati, le pastiglie possono andare incontro a vetrificazione mentre i dischi a ruggine, rischiando di provocare cigolii o di diminuire l'efficacia della frenata.

5.2 INVERTER DI TRAZIONE

L'inverter di trazione di un veicolo elettrico serve per gestire il flusso di corrente dalla batteria al motore, in particolare converte la corrente continua proveniente dalle batterie in corrente alternata per alimentare il motore AC. Ha anche il compito di regolare la frequenza e l'ampiezza di oscillazione della corrente alternata in base a quanto viene premuto il pedale dell'acceleratore: più viene premuto, maggiore sarà la frequenza della corrente e quindi anche la potenza erogata dal motore.

Nel circuito elettronico dove è inserito, l'inverter viene monitorato da alcuni controllori che ne controllano il corretto funzionamento. Per evitare di avere tanti microcontrollori visto che ce n'è almeno uno per ogni dispositivo di conversione, molte case automobilistiche preferiscono racchiudere inverter, convertitori DC-DC e caricatori di bordo tutti nella stessa scatola in modo tale vengano monitorati tutti dalla stessa unità di controllo.

Fino a qualche anno fa la maggior parte degli inverter era costruita utilizzando transistor IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor), adesso sono quasi tutti sostituiti da transistor SiC (Carburo di silicio) che rendono l'inverter più piccolo, leggero ed efficiente.

La maggiore efficienza che si ha nell'utilizzo del transistor SiC rispetto a uno IGBT è data dall'alta velocità di commutazione[7] che possiede, tuttavia questo può causare interferenze elettriche che devono essere neutralizzate in modo adeguato.

---

[7] *velocità di commutazione: visto che il transistor si comporta come un interruttore (commutatore), la velocità di commutazione è la velocità con la quale questo interruttore si apre o si chiude al variare della corrente.*

5.3 ONBOARD CHARGER (OBC)

La batteria di un veicolo elettrico ha bisogno di corrente DC per venire ricaricata.

L'Onboard Charger è un dispositivo installato nel veicolo che consente di convertire la corrente elettrica AC fornita da una centralina di ricarica, in corrente DC.

La maggior parte delle centraline di ricarica sono in AC, basti pensare alla ricarica domestica tramite wallbox che permette di erogare in genere dai 3 ai 6 kW o a quella pubblica che può arrivare fino ai 22kW. Ad influire sulla potenza e sulla velocità di ricarica bisogna considerare anche i limiti imposti dalle prestazioni dell'OBC e dalla capacità della batteria che potrebbero abbassare ulteriormente i kW effettivamente assorbiti e di conseguenza aumentare il tempo di ricarica.

Esistono anche altre centraline di ricarica DC ad alta potenza dette "fast" o "super-fast" dove la conversione AC-DC avviene già all'interno della stazione stessa, quindi la corrente non deve passare attraverso l'OBC e arriva direttamente alla batteria. Queste stazioni erogano potenze nettamente superiori alle precedenti, a partire dai 50 kW fino ai 350 kW.

La maggior parte degli OBC moderni è basata su convertitori AC-DC isolati galvanicamente per garantire la massima sicurezza e adattabilità alle varie tipologie di ricarica presenti nel mondo.

Affinché la ricarica avvenga nel modo più rapido possibile, questo dispositivo deve garantire un'elevata efficienza (ad oggi è circa del 95%, quindi molto buona), poiché, se così non fosse, tutta l'energia in eccesso verrebbe trasformata in calore surriscaldando il dispositivo e l'intero sistema.

A ciò contribuisce anche il fattore di potenza[8] (Power Factor, PF) che è un numero adimensionale compreso tra 0 e 1: più è prossimo a 1, più il sistema è efficiente.

Un OBC è formato da un filtro di ingresso, un controllore PFC, uno stadio di conversione DC-DC primario e secondario (isolati tra loro) e un filtro di uscita attraverso il quale sono collegati il BMS e il pacco batterie.

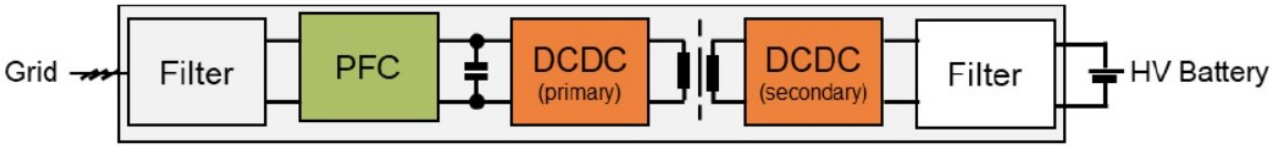


Figura 9: topologia di un OBC

Lo stadio PFC (Power Factor Correction) è formato dal filtro e dal controllore PFC e ha lo scopo di far avvicinare il più possibile il PF a 1, in modo tale da garantire la massima efficienza: filtra la corrente in ingresso facendo in modo che il suo andamento sia il più simile possibile a quello di un'onda sinusoidale e riduce la corrente di picco che può essere assorbita (correnti troppo elevate possono surriscaldare e danneggiare il dispositivo). Inoltre i segnali di tensione e corrente in ingresso vengono allineati eliminando lo sfasamento tra di essi

Uno dei più semplici PFC da realizzare è quello formato da un convertitore boost (figura 6). Tale circuito è formato da una configurazione half-bridge composta da un

---

[8] *Fattore di potenza: è definito come il rapporto tra la potenza attiva (P_{att}) e la potenza apparente (P_{app}) dove:*

- *la potenza attiva (o reale) si misura in Volt-Ampere o VA ed è definita il prodotto scalare tra il vettore tensione V e il vettore corrente I: $P = VI\cos(\varphi)$, dove φ indica l'angolo di sfasamento tra tensione e corrente;*
- *la potenza apparente (o totale) si misura anch'essa in Volt-Ampere ed è definita come il prodotto algebrico tra il vettore tensione V e il vettore corrente I.*

N.B. nel caso in questione la potenza reattiva non viene considerata in quanto produce "Watt inutili".

raddrizzatore a ponte di diodi in ingresso, un'induttanza, un transistor di commutazione (S1), un diodo e un condensatore.

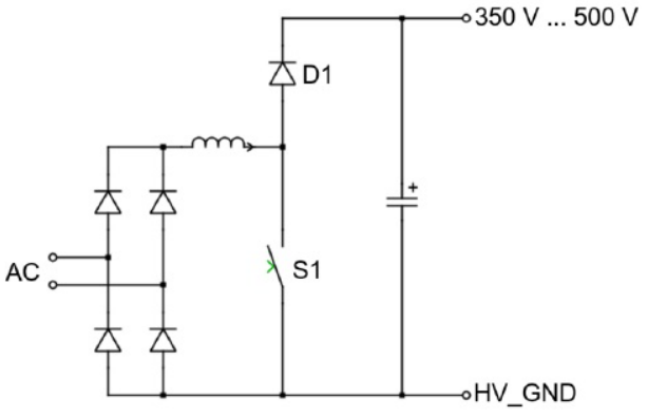


Figura 10: topologia di un boost PFC

L'altra componente fondamentale dell'OBC è data dal convertitore DC-DC che gestisce e regola la tensione e la potenza necessaria per la ricarica della batteria.

6 VANTAGGI E SVANTAGGI DELL'AUTO ELETTRICA E PROSPETTIVE FUTURE

Nel 2024 i temi della sostenibilità e del riscaldamento globale sono sempre più discussi: l'aumento delle temperature con conseguente scioglimento dei ghiacciai e innalzamento del livello del mare, eventi eccezionali come siccità, alluvioni e trombe d'aria sono sempre più attuali e stanno creando sempre più danni all'ambiente in cui viviamo.

Aiutate anche da alcuni incentivi da parte delle istituzioni, le industrie automobilistiche stanno cercando di mettere a punto nuove tecnologie più sostenibili per sostituire il vecchio motore a combustione.

Al giorno d'oggi l'utilizzo dell'elettrico è l'alternativa più valida e facilmente attuabile in breve tempo.

Perché un cittadino dovrebbe acquistare un'auto elettrica invece di una a benzina?

Innanzitutto, il motivo principale è sicuramente quello che un'auto elettrica è un veicolo a emissioni zero, cioè non produce inquinamento nell'aria; inoltre, è più silenziosa di una a benzina (si sente solo un leggero "sibilo") in quanto all'interno del motore non avvengono variazioni di pressione, temperatura e volume che causano le piccole esplosioni rumorose dovute dalla combustione.

Per quanto riguarda l'efficienza[9], quella di un motore elettrico (80%) è superiore del doppio rispetto a un veicolo a diesel (40%) e addirittura del quadruplo rispetto a un

[9] *efficienza di un veicolo: è la percentuale di energia fornita all'auto che viene effettivamente convertita in energia cinetica. Ad esempio un'auto a diesel che ha un'efficienza di circa 40%, vuole dire che "solo" il 40% dell'energia viene utilizzata per la locomozione, il resto viene dissipato in calore o in altre forme di energia.*

veicolo a benzina (20%). Questo significa che le auto elettriche consumano meno energia per chilometro e di conseguenza emettono meno CO_2.

Un altro punto fondamentale a favore degli EV è il basso costo di manutenzione. Oltre ad avere meno componenti meccanici soggetti a usura (basti pensare ai freni con la frenata rigenerativa integrata), ce ne sono alcuni che addirittura non sono presenti, come ad esempio la frizione, tutta la parte dedicata alla trasmissione e l'impianto di scarico. Di conseguenza è in grado di fornire la massima coppia e potenza fin dai 0 giri (auto ferma), garantendo un'accelerazione molto più reattiva e performante. Da notare anche come la mancanza della trasmissione renda la guida più semplice essendoci solo due pedali.

La batteria è solitamente posizionata sul pianale della vettura, ed essendo pesante, comporta un abbassamento del centro di gravità migliorando la stabilità dell'auto.

Per quanto riguarda il rifornimento, ricaricare un'auto elettrica è sicuramente molto meno costoso rispetto a fare il pieno di benzina o di diesel ma bisogna fare attenzione perché non è sempre più conveniente. Esistono 4 tipi di colonnine per ricaricare un EV, riassunte nella figura 9 in basso con il relativo prezzo medio per kWh.

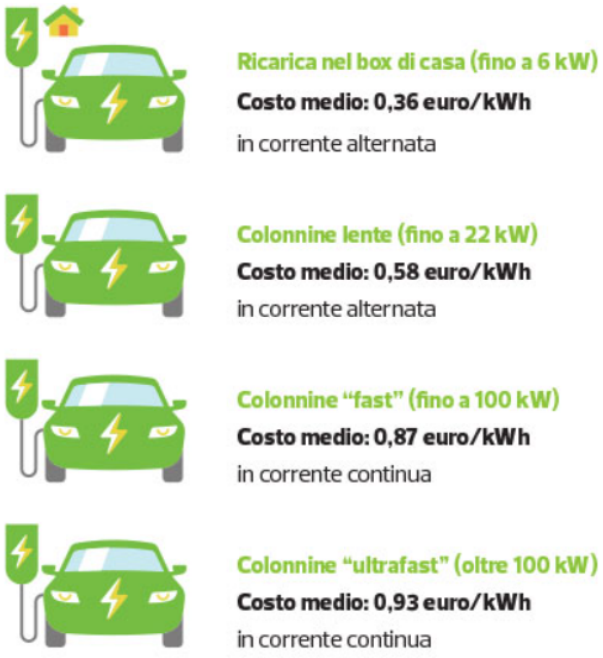


Figura 11: costo medio delle colonnine di ricarica stilata dalla rivista Altroconsumo nel 2023

Uno studio del 2023 pubblicato da Altroconsumo, ha analizzato e confrontato i costi di percorrenza di diverse tipologie di auto: benzina, diesel, elettrico. Lo scenario, consultabile alla figura 10, si riferisce all'utilizzo da parte di una famiglia media di 4 persone di due auto, una più grande e più utilizzata, l'altra più piccola per muoversi per lo più in città.

Costi di percorrenza dell'auto	CONFRONTO DEI COSTI DI RIFORNIMENTO E RICARICA CON DIVERSE ALIMENTAZIONI											
	SCENARIO 1: SECONDA AUTO PICCOLA						SCENARIO 2: PRIMA AUTO GRANDE					
	Seconda auto, utilizzo ridotto (8.000 km l'anno, quasi solo in città), auto piccola/media (segmento B/C)						Prima auto, utilizzo sostenuto (20.000 km l'anno, anche in autostrada), auto medio/grande (segmento D/SUV)					
			Auto elettrica						Auto elettrica			
	Auto a benzina	Auto diesel	Ricarica nel box di casa (tariffa media di mercato)	Ricarica AC fino a 22 kW alle colonnine	Ricarica rapida (> 22 kW) DC alle colonnine	Ricarica ultra-rapida (> 150 kW) DC alle colonnine	Auto a benzina	Auto diesel	Ricarica nel box di casa (tariffa media di mercato)	Ricarica AC fino a 22 kW alle colonnine	Ricarica rapida (> 22 kW) DC alle colonnine	Ricarica ultra-rapida (> 150 kW) DC alle colonnine
Consumi su strada (l/100 km) o (kWh/100 km)	7	6	17	17	17	17	8	7	21	21	21	21
Costo dell'energia (€/kWh)	–	–	0,39	0,58	0,87	0,93			0,36	0,58	0,87	0,93
Costo del carburante (€/l)	1,86	1,85	–	–	–	–	1,86	1,85	–	–	–	–
Costo di percorrenza (energia o carburante) al chilometro (€/km) – approssimato alla seconda cifra decimale	0,13	0,11	0,07	0,10	0,15	0,16	0,15	0,13	0,08	0,12	0,18	0,20
Costo di percorrenza all'anno (€)	**1.041**	**890**	**527**	**789**	**1.190**	**1.269**	**2.976**	**2.594**	**1.515**	**2.436**	**3.675**	**3.920**

Fonte: ministero dell'Ambiente e della sicurezza energetica

Figura 12: stime del costo medio della benzina, diesel ed elettricità nel 2023

Da come si può notare, il massimo risparmio lo si ha in entrambi casi se si ricarica l'auto tramite la ricarica domestica o, in minor quantità, se la si ricarica nelle colonnine pubbliche in AC. Mentre, se si utilizzano le colonnine a ricarica rapida, risulta quasi più conveniente il motore a combustione.

Tuttavia, per i possessori di auto elettriche, soprattutto per quelli che devono ricaricare spesso l'auto fuori casa, c'è la possibilità di sottoscrivere degli abbonamenti alle colonnine pubbliche che riducono di molto il costo dell'energia (€/kWh) fino a quasi dimezzarlo in alcuni casi. In media se un pieno a consumo senza abbonamento oscilla tra i 0,58 €/kWh ai 0,93 €/kWh in base al tipo di colonnina, con abbonamento costa dai 0,31€/kWh ai 0,53 €/kWh in base al piano scelto.

In ogni caso, un possessore di un EV molto spesso o ha un abbonamento o ha la possibilità di ricaricare l'auto a domicilio, di conseguenza si può dire che il rifornimento di un'auto elettrica è quasi sempre più economico di quello di un motore a combustione.

Ovviamente tutto ciò ha un senso se l'energia con cui viene ricaricata l'auto elettrica proviene da fonti sostenibili, se no si è punto a capo.

Al giorno d'oggi, molti credono che sparse per il territorio non ci siano abbastanza centraline. Questa affermazione è in parte vera e in parte falsa, sicuramente col passare del tempo diventerà sempre più falsa. Il motivo? In Italia al 30 settembre 2024 sono presenti più di 40mila colonnine che si traducono in più di 60mila punti di ricarica (una centralina, se abilitata, può anche ricaricare due auto contemporaneamente), numeri che sono destinati ad aumentare in modo vertiginoso: basti pensare che il numero di punti di ricarica aumenta di circa di 250 a settimana!

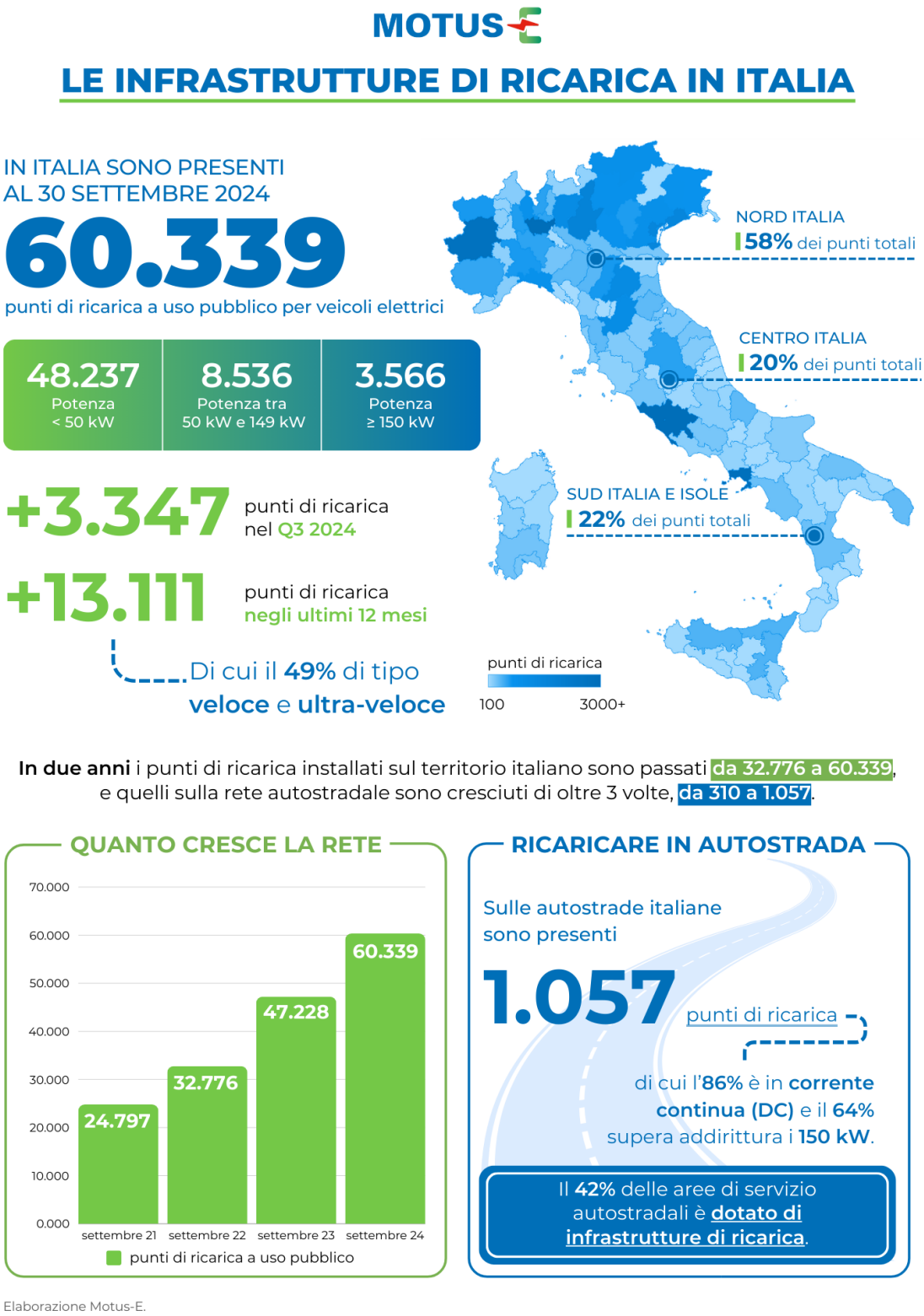


Figura 13: riassunto dell'ultimo rapporto di Motus-E aggiornato al 30 settembre 2024

Come si può notare dalla figura 11, la distribuzione delle centraline in Italia non è molto uniforme visto che quasi il 60% dei punti di ricarica totali si trova solo al nord. Oltre a ciò, ci sono ancora molti paesi che ne sono ancora sprovvisti e quindi questo non invoglia di certo un loro concittadino a investire su un EV. Tuttavia si spera che con un aumento così rapido del numero di centraline, in poco tempo si riesca a creare una rete di ricarica sempre più efficiente e che non escluda nessuno.

Un ambito in cui le case automobilistiche che producono EV stanno ancora lavorando intensamente è l'autonomia della batteria. Un'auto a benzina di solito ha un serbatoio che può contenere dai 45 ai 60 litri di benzina e di media consuma 1 litro per ogni 15km percorsi; garantisce quindi un'autonomia media che varia tra i 675 e i 900km.

Un'auto elettrica fino a qualche anno fa utilizzava batterie di medie dimensioni di 50kWh che garantivano un'autonomia fino ai 300km, quindi avevano un'autonomia dimezzata rispetto a un'omologa a benzina. Ma già al giorno d'oggi la media si è alzata a circa 400km; sul mercato ora esistono auto con batterie molto più capienti che arrivano anche a superare i 100kWh (come ad esempio la BMW i7 o la Tesla Model X Long Range), garantendo un'autonomia di oltre 600km. Sicuramente in questo campo il motore a combustione per ora la ha vinta, ma in un futuro non così lontano si potranno acquistare EV con autonomia molto superiore a quelli attuali.

Un altro punto a sfavore delle auto elettriche lo si può trovare nei tempi di ricarica. Se per un'auto a benzina o a diesel il tempo impiegato per fare il pieno è di un paio di minuti, per un'auto elettrica i tempi vanno dai 15 minuti se si utilizza una colonnina Ultrafast alle circa 3 ore se si utilizza una classica in AC. Come già citato nei precedenti paragrafi, le colonnine Ultrafast sono le più costose e le meno comuni per le strade. In Italia solo il 15% delle colonnine totali è Ultrafast, mentre il restante 85% è rappresentato da colonnine di ricarica "lenta" AC.

Tuttavia i possessori di una wallbox domestica possono ricaricare l'auto tutte le volte che l'auto è parcheggiata dentro casa in modo tale che la carica sia al massimo ogni qual volta venga utilizzata. Questo è un enorme vantaggio soprattutto per chi utilizza spesso l'auto

per tragitti brevi in quanto non costringe l'autista a portare l'auto nelle centraline a ricaricare dopo pochi chilometri.

L'ultima barriera che spesso blocca le persone dall'acquisto di un EV o di un veicolo ibrido[10] è il prezzo che di solito non scende mai sotto i 20'000€ / 25'000€, inoltre, se si vuole acquistare un EV o un ibrido ad alte prestazioni, il prezzo lievita molto velocemente anche ben oltre i 40'000€.

6.1 INCENTIVI

Con il Green Deal stipulato dall'UE, l'Italia e gli altri paesi membri hanno concordato che a partire dal 2035 non potranno più vendere auto con motore a combustione; è una sfida molto ardua, ma non impossibile. Proprio per questo motivo l'Italia sta investendo molto sulla mobilità sostenibile offrendo ai propri cittadini degli incentivi economici (Ecobonus) per aiutarli alla transizione.

Il 4 agosto 2022 in un DCPM il Governo Italiano ha creato il Fondo Automotive, ovvero ha stanziato 8,7 miliardi di euro da distribuire fino al 2030 per rilanciare la politica industriale del comparto automotive finanziando incentivi per l'acquisto di veicoli a basse emissioni e programmi di sviluppo industriali e ambientali.

Nel 2024, ad esempio, ha sbloccato 1 miliardo di euro dal Fondo Automotive, di cui 950 milioni sono destinati all'acquisto di auto elettriche, ibride o vetture a basse emissioni di CO_2 (fino a 135 g/km) e 50 milioni sono destinati a motocicli, ciclomotori o vetture usate elettriche o a basse emissioni.

In aggiunta ha stanziato anche altri 20 milioni di euro per il "bonus wallbox": ovvero una detrazione dell'80% fino a un massimo di 1500€ per l'acquisto di colonnine di ricarica a domicilio.

[10] *Veicolo ibrido: è un veicolo che funziona sia a batteria, sia a benzina.*

6.2 PROSPETTIVE FUTURE

Secondo la IEA (International Energy Agency) il numero di auto elettriche salirà nei prossimi anni in modo quasi esponenziale. Se nel 2022 nel mondo circolavano circa 26 milioni di EV, nel 2023 sono stati poco più di 40 milioni: un incremento di +35% solo in un anno! (figura 12)

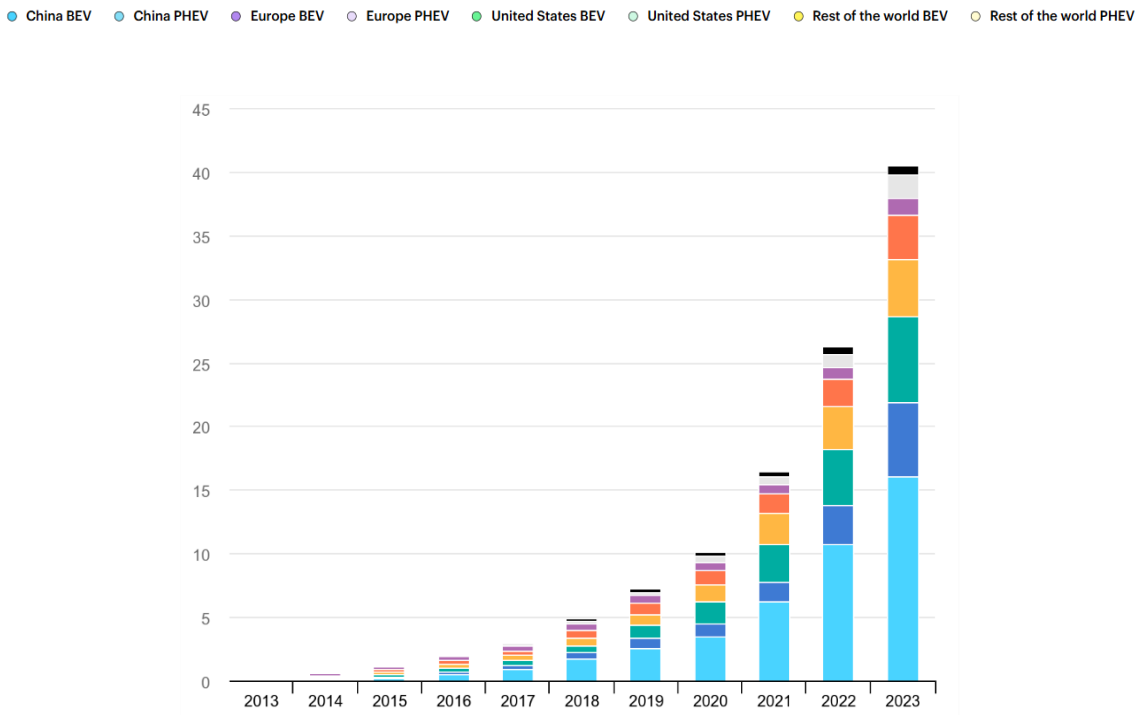


Figura 14: Stock mondiale di auto elettriche dal 2013 al 2023 in milioni di EV

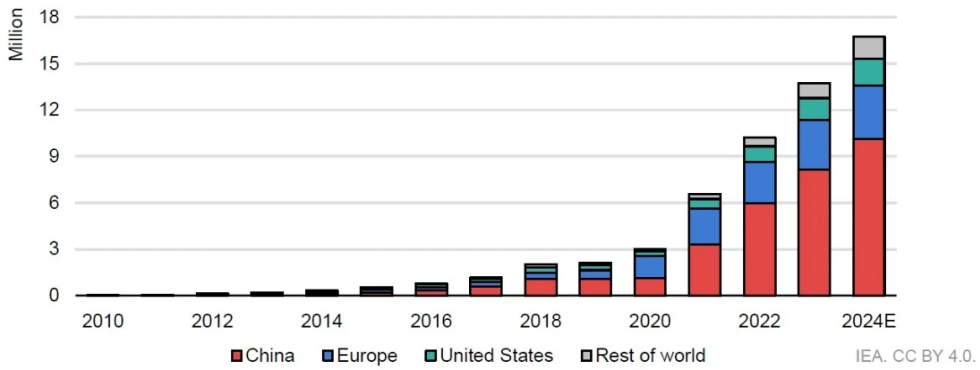


Figura 15: vendite globali per macro aree geografiche dei veicoli elettrici anno per anno dal 2010 al 2023 con una stima del 2024

Le auto elettriche circolanti in Italia al 31 maggio 2024 sono 238.986. Secondo uno studio di Motus-E, affinché si riescano a mantenere gli obiettivi prefissati dall'UE per il 2035, per l'Italia possono presentarsi due trend di mercato rialzisti: uno conservativo e uno accelerato.

Nello scenario conservativo si prevede che gli EV in circolazione diventeranno 2,6 milioni entro il 2030 e 8,6 milioni entro il 2035. I punti di ricarica pubblici arriveranno a toccare i 198'000 (dai circa 60'000 attuali) con un aumento delle colonnine di ricarica rapida DC che diventeranno il 48% del totale. Grazie agli incentivi, i punti di ricarica domestici potrebbero arrivare a 4,4 milioni a cui si sommano ulteriori 451'000 che si troverebbero in ambito lavorativo. Tutto ciò comporta un aumento della domanda energetica di circa 23TWh,

Nello scenario accelerato, che presenta un andamento del mercato con crescita più marcata nel medio-lungo periodo, si ipotizza che gli EV in circolazione saranno 3,6 milioni nel 2030 per poi crescere fino a 10,4 milioni nel 2035, mentre i punti di ricarica pubblici diventeranno 239'000, distribuiti in AC e DC come lo scenario precedente. I punti di ricarica domestici potrebbero toccare addirittura i 5,3 milioni a cui si sommano altri 545'000 che si troverebbero in ambito lavorativo. L'incremento della domanda di elettricità sarebbe di circa 28TWh.

Questi scenari molto promettenti, allo stesso tempo sono molto fragili. L'Italia nel 2022 ha investito 8,7 miliardi di euro per motivare e incentivare i cittadini alla transizione green. Tuttavia, questo progetto rischia di perdere gran parte della sua credibilità se (oggi 3 novembre 2024) si va a considerare la bozza della prossima Legge di Bilancio: nel 2025 lo Stato avrebbe intenzione di togliere al Fondo Automotive 4,6 miliardi di euro, pari all'80% dei fondi rimasti per affrontare l'"ardua sfida green" imposta dall'UE entro il 2035. Secondo ANFIA (Associazione Nazionale Filiera Industria Automobilistica), se a fine anno questo disegno di legge venisse approvato, il miliardo di euro rimasto da spalmare fino al 2030 sarebbe totalmente insufficiente per sostenere la riconversione del settore compromettendo così la competitività delle aziende italiane.

6.3 NUOVE TECNOLOGIE PER IL FUTURO

Considerando il trend rialzista, l'aumento delle vetture elettriche in circolazione porterebbe sicuramente a una diminuzione delle emissioni e dell'inquinamento dell'aria nei prossimi anni.

Affinché un'auto elettrica si possa considerare effettivamente "a emissioni zero", bisogna prestare attenzione che tutto il processo di fabbricazione dell'auto e della batteria, a partire dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento delle batterie, sia sostenibile.

Ad ogni modo i più grandi giacimenti di litio, cobalto e nickel (i materiali più comuni presenti all'interno di una batteria) molto spesso si trovano nei Paesi del "Terzo Mondo", come Congo per il cobalto e Thailandia per il Nickel. Le industrie provenienti da ogni parte del mondo comprano da loro le materie prime a basso costo per fare le batterie. Essendo molto poveri, l'unico modo che hanno per estrarli a basso costo è utilizzando il carbone o il petrolio inquinando e distruggendo l'ambiente circostante.

Se si guarda la produzione di CO_2 effettiva emessa da un'auto elettrica, risulta lo stesso molto inferiore a quella di un'auto con motore a combustione anche se non è del tutto a "impatto zero". Rimane per il momento una buona alternativa sulla quale investire.

Esistono anche altre tecnologie ancora più green, come le auto a idrogeno o le auto solari, che però necessitano ancora anni e anni di studi e di collaudi prima di riuscire ad entrare in modo deciso nel mercato automotive. Infatti ad oggi risultano ancora molto costose.

Le auto a idrogeno utilizzano come combustibile l'idrogeno per produrre energia. Anche loro hanno un motore elettrico e un pacco batterie, ma l'energia viene prodotta dalla cella a combustibile tramite l'elettrolisi inversa: l'idrogeno proveniente dal serbatoio reagisce con l'ossigeno proveniente dall'esterno generando energia elettrica, calore e acqua che viene espulsa sotto forma di vapore acqueo.

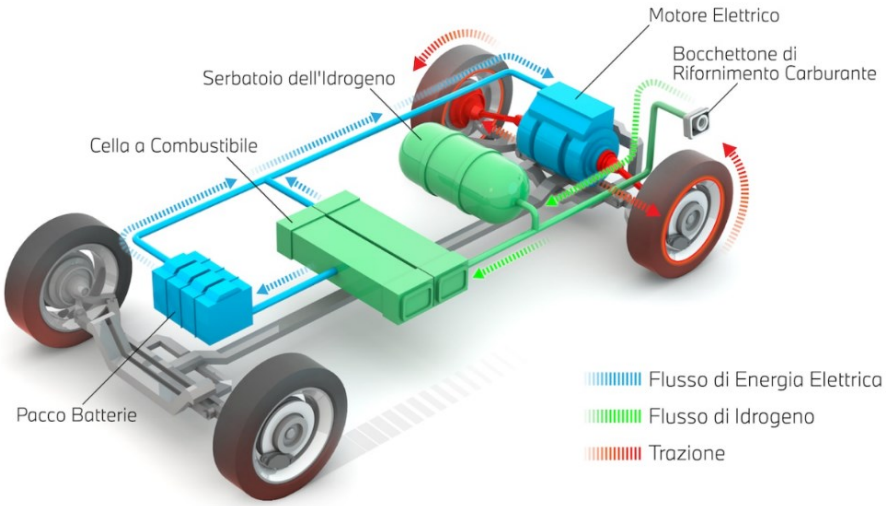


Figura 16: struttura di un'auto a idrogeno

Le auto solari, ancora più rare di quelle a idrogeno, sono auto elettriche alimentate a pannelli solari che riescono a convertire l'energia d'irraggiamento in energia cinetica. Sono molto leggere e sono costituite principalmente da materiali in policarbonato e poliuretano oltre ad essere ricoperte di pannelli solari.

Figura 17: Lightyear One, la prima auto che si ricarica grazie ai pannelli solari

Un’altra tecnologia che andrebbe a sostituire le classiche batterie a litio è rappresentata da batterie al sodio. La struttura della batteria al sodio sarebbe molto simile a quella di una batteria agli ioni di litio, ma con il sodio al posto del litio nel catodo, e gli elettrodi di alluminio al posto di quelli in rame, rendendola così più economica. Oltre ad avere una maggior durata, resistono anche a temperature più estreme purché rimangano tra i -40 e i +80°C; sono così più sicure e meno soggette a incendi. D’altro canto il sodio presenta una densità energetica più bassa: questo comporta ad avere batterie più grandi e pesanti per avere le stesse prestazioni di quelle al litio.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- David A. Kirsch, *The Electric Vehicle and the Burden of History*. Rutgers Univ Pr, New Brunswick (New Jersey), 2000
- G. Valitutti, A. Tifi, A. Gentile, *Le idee della chimica*. Seconda edizione, Zanichelli, Bologna, 2009
- C. Romeni, *Fisica e realtà blu: Onde, Campo elettrico e magnetico*. Seconda edizione, Zanichelli, Bologna, 2017
- C. Romeni, *Fisica e realtà blu: Induzione e onde elettromagnetiche, Relatività e quanti*. Seconda edizione, Zanichelli, Bologna, 2017
- H. Curtis, N. Sue Barnes, A. Schnek, A. Massarini, V. Posca, *Il nuovo Invito alla biologia: Polimeri, biochimica, biotecnologie e* sostenibilità. Seconda edizione, Zanichelli, Bologna, 2017

SITOGRAFIA

- Camilla Ferrario, *Breve storia del carbone e dei suoi usi, dalle origini ad oggi*. https://www.geopop.it/breve-storia-del-carbone-e-dei-suoi-usi-dalle-origini-ad-oggi/, 12-7-2022
- Erminio Fonzo, *I pionieri del petrolio. Quando, come e perché ha iniziato a essere usato l'"oro nero"*. https://www.geopop.it/i-pionieri-del-petrolio-quando-come-e-perche-ha-iniziato-a-essere-usato-loro-nero/, 24-11-2022
- Inquinamento del carbone: produzione, economia e conseguenze salute., https://www.cambiamenti-climatici.it/news/articolo/inquinamento-del-carbone-produzione-economia-e-conseguenze-salute-124.html#:~:text=Durante%20la%20combustione%20fossile%2C%20il,zolfo%20(SOx)%20e%20particolato, 23-2-2024

- Carlo Iacovini, *La vera storia dell'auto elettrica. Quando nel 1900 circolavano a New York in car sharing*. https://carloiacovini.com/2012/10/03/la-vera-storia-dellauto-elettrica-quando-nel-1900-circolavano-a-new-york-in-car-sharing/#:~:text=Nulla%20rispetto%20agli%20investimenti%20che,Boston%20e%20Chicago%20erano%20elettriche!, 3-10-2012
- *Siamo sicuri siano le auto la causa principale d'inquinamento dell'aria?* https://www.mocautogroup.com/news/attualita/percezione-auto-inquinamento-aria/, 1-2-2021
- *Storia della macchina elettrica: dal 1800 ad oggi*. https://www.e-vai.com/blog/storia-della-macchina-elettrica-dal-1800-ad-oggi/, 27-7-2020
- P. Prosini, M. Moreno, F. Vellucci, *Tecnologie e sistemi per l'accumulo elettrochimico dell'energia*.
- https://www.eai.enea.it/component/jdownloads/?task=download.send&id=166&catid=6&Itemid=655, 2020
- *Quanti tipi di batterie esistono e come sceglierle*. https://it.rs-online.com/web/content/discovery-blog/idee-suggerimenti/guida-tipi-di-batterie?srsltid=AfmBOopJWAkU01RogQrJPBC3B7502FFt9tr7rW6L8zvdPt96DerZkFwK, 16-6-2023
- Elektro 2000, *Pile, batterie, accumulatori.* https://www.elektro.it/AAApile_accumulatori/pile_accumulatori_01.html, 24-8-2021
- Raffaele Berardi, *Caratteristiche tecniche di una batteria*. https://www.ralph-dte.eu/2012/09/15/caratteristiche-tecniche-di-una-batteria/, 12-9-2012
- *Corrente di Spunto Batteria: cosa è e come si misura*. https://www.batteriaper.com/it/notizie/corrente-di-spunto-batteria-cosa-e-e-come-si-misura-1359?srsltid=AfmBOopEEU4tp0YTDm5sTXQ_ST_CfZED44HCylrWuhxVNu4m0jCK_wjc

- *Batteria per veicoli elettrici*. https://it.wikipedia.org/wiki/Batteria_per_veicoli_elettrici#:~:text=Le%20batterie%20ricaricabili%20utilizzate%20nei,aria%20e%20ai%20sali%20fusi
- *Batterie al piombo ricaricabili: guida completa.* https://it.rs-online.com/web/content/discovery-blog/idee-suggerimenti/batterie-al-piombo?srsltid=AfmBOooa4a9oUvvSsLa0LnmpfC5pWlnkDg62l5b7yqCTB1blmKTItJoW, 15-11-2022
- *Ni-Cd: Batterie al Nichel-Cadmio*, https://www.energoclub.org/page/ni-cd-batterie-al-nichel-cadmio
- *Le batterie moderne sono soggette all'effetto memoria?* https://www.stihl.it/it/diy-stihl/manutenzione-attrezzi-da-giardino/informazioni-batterie/effetto-memoria-batteria#:~:text=Con%20le%20batterie%20NiCd%20l,cristalli%20nella%20zona%20non%20scaricata, 7-7-2023
- *Accumulatore agli ioni di litio.* https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_agli_ioni_di_litio#Descrizione
- *BATTERIE AL LITIO.* https://www.vivienergia.it/casa/vivipedia/guida-energia/batterie-al-litio.
- *Batteria al piombo o batteria al litio?* https://www.giefferacing.com/it/in-evidenza/batteria-al-piombo-o-batteria-al-litio.html
- M. Lelie, T. Braun, M. Knips, H. Nordmann, F. Ringbeck, H. Zappen, D.Uwe Sauer, *Battery Management System Hardware Concepts: An Overview*. https://www.mdpi.com/2076-3417/8/4/534, 30-3-2018
- *What is a Battery Management System?* https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html.
- A. Murarotto, Una scoperta che rivoluziona il futuro dei veicoli elettrici, https://elettronauti.it/una-scoperta-che-rivoluziona-il-futuro-dei-veicoli-elettrici/#:~:text=Cos'%C3%A8%20la%20placcatura%20al%20litio&text=Creando%20della%20dendrite%20di%20litio,il%20rischio%20di%20danneggiarla%20irrimediabilmente, 6-9-2023

- S. Leibson, *Nozioni di base sulla misurazione della corrente: Parte 1 – Resistori di rilevamento corrente*, https://www.digikey.it/it/articles/fundamentals-of-current-measurement-part-1-current-sense-resistors, 9-10-2028
- *Bilanciamento attivo e bilanciamento passivo nel BMS della batteria*, https://www.redwaypower.com/it/active-balancing-vs-passive-balancing-in-battery-bms/#:~:text=Il%20bilanciamento%20attivo%20nel%20BMS%20della%20batteria%20%C3%A8%20come%20avere,garantire%20che%20rimangano%20tutte%20sincronizzate.
- *Motore DC*, https://harmonicdrive.de/it/glossario/motore-dc#:~:text=Motore%20DC%20%E2%80%93%20Pioniere%20nel%20campo,energia%20elettrica%20in%20energia%20meccanica.
- *Differenza tra motore sincrono e motore asincrono*, https://www.differenzatra.it/differenza-tra-motore-sincrono-e-motore-asincrono/#:~:text=Motore%20sincrono%20e%20motore%20asincrono%20sono%20due%20motori,induzione%2C%20rotazione%20e%20frequenza%20di%20rete%20non%20coincidono, 3-8-2016
- Redazione AutoScout24, *Motore auto elettrica: come funziona, tipologie e costi*, https://www.autoscout24.it/informare/consigli/tecnologia-e-ambiente/motore-auto-elettrica-come-funziona-tipologie-e-costi/#2BbNPtoNNLDjLqkFjYhboo, 29-6-2023
- *Motore Sincrono: Cos'è, Come Funziona e Schemi di Esempio*, https://farelettronica.it/motore-sincrono/, 24-11-2023
- *Motore asincrono*, https://it.wikipedia.org/wiki/Motore_asincrono.
- *I sistemi frenanti delle auto elettriche*, https://www.carpedia.it/sistema-elettronico/i-sistemi-frenanti-delle-auto-elettriche-8193/.
- *Frenata rigenerativa: come funziona, quali vantaggi per auto elettriche, ibride e start-stop, cosa deve sapere il meccanico*, https://www.partsweb.it/frenata-rigenerativa-come-funzione-auto-elettriche-ibride-meccanico/, 6-9-2024

- *Guida ai tipi di inverter e come funzionano*, https://it.rs-online.com/web/content/discovery-blog/idee-suggerimenti/guida-inverter?srsltid=AfmBOopjai8hGCnHDTSKvNIz8rpYrpeYl3HV-4X0r9EiwWVkfSCpsPaH, 8-6-2023
- F. Brescia, *L'importanza degli inverter di trazione negli EV*, https://it.emcelettronica.com/limportanza-degli-inverter-di-trazione-negli-ev, 7-1-2023
- M. Bracken, *La correzione del fattore di potenza nei caricatori di bordo impiegati nel settore automotive*, https://elettronica-plus.it/la-correzione-del-fattore-di-potenza-nei-caricatori-di-bordo-impiegati-nel-settore-automotive_117386/, 16-12-2021
- *Onboard charger per veicoli elettrici: funzionamento e topologie*, https://farelettronica.it/onboard-charger-per-veicoli-elettrici-funzionamento-e-topologie/, 26-1-2022
- *Auto elettrica sì o no? Ecco i pro e i contro delle auto elettriche*, https://guide.autoscout24.ch/it/mobilita-elettrica/vantaggi-e-svantaggi-delle-auto-elettriche/, 27-6-2024
- B. Minna, *Quanto costa ricaricare l'auto elettrica rispetto al pieno diesel o benzina?* https://www.altroconsumo.it/auto-e-moto/automobili/news/costo-rifornimento-auto-elettriche, 20-4-2023
- *Auto elettrica: le fake news più diffuse. Parola all'esperto.* https://www.suncityitalia.com/efficienza-energetica/auto-elettrica-le-fake-news-piu-diffuse-parola-allesperto/, 4-10-2023
- F. Vendrame, *Auto elettriche, quante sono le colonnine in Italia? Superati i 60 mila punti di ricarica*. https://www.hdmotori.it/auto/articoli/n597085/quanti-punti-ricarica-colonnine-italia-motus-e/, 23-10-2023
- *Trends in electric cars*, https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars.
- Ufficio stampa Motus-E, *Auto elettriche, in Italia fino a 5,8 milioni di punti di ricarica totali al 2035*, https://www.motus-e.org/news-associative/auto-

elettriche-in-italia-fino-a-58-milioni-di-punti-di-ricarica-totali-al-2035/#:~:text=L'Italia%20sar%C3%A0%20dotata%20entro,ricarica%20tra%20domestici%20e%20aziendali, 1-10-2024

- *Auto a idrogeno: tutto quello che c'è da sapere*, https://www.bmw.com/it/innovation/come-funzionano-le-auto-a-idrogeno.html, 15-6-2023
- *Energie alternative per le automobili del futuro,* https://campus.hubscuola.it/discipline-scientifiche/energie-alternative-per-le-automobili-del-futuro/
- F. Barontini, *Batterie agli ioni di sodio: cosa sono, come funzionano, autonomia*, https://insideevs.it/news/678111/batterie-ioni-sodio-come-funzionano/, 24-1-2024