

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Ingegneria Industriale-DIN
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Sede di Forlì

**PROSPETTIVE PER LE FUTURE
TECNOLOGIE IN AMBITO AUTOMOTIVE**
Tesi di Laurea in Macchine

Presentata da:
Andrea Mignani

Relatore:
Prof. Enrico Corti

APPELLO II
ANNO ACCADEMICO 2019/2020

Indice

Introduzione	2
1 MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA	5
1.1 Punti di forza	6
1.2 Problematiche	8
1.3 Prospettive	9
1.4 Miglioramenti	11
2 FUEL CELL VEHICLES	26
2.1 Vantaggi dei veicoli a celle a combustibile	27
2.2 Zero emissioni?	33
2.3 Problematiche per uno sviluppo massivo	36
2.4 Possibili ambiti di utilizzo	40
3 BATTERY ELECTRIC VEHICLES	43
3.1 Benefici e criticità	44
3.2 Prospettive di diffusione	49
3.3 Il futuro delle batterie	54
3.4 Ricarica delle batterie e modifica della rete elettrica	62
Conclusioni	69
Bibliografia	71

Introduzione

Negli ultimi anni il consumo dei combustibili fossili è aumentato di circa l'1,5 % all'anno e, sebbene a tale incremento sia dovuto il miglioramento dello standard di vita in gran parte del pianeta, al giorno d'oggi la popolazione deve sempre più di frequente fare i conti con temi fino a pochi anni fa sconosciuti alla maggior parte delle persone come: emissioni inquinanti, cambiamenti climatici, fonti di energia rinnovabili ed economia circolare.

A tutto ciò non è estraneo il settore dei trasporti ed in particolare quello automotive, che risulta interessato allo sviluppo di nuove tecnologie per la mobilità di merci e persone, il cui fine sempre più incalzante, oltre al miglioramento delle prestazioni, riguarda soprattutto l'abbattimento di emissioni di CO₂ e di sostanze inquinanti, nell'ottica di raggiungere nei prossimi anni delle modalità di trasporto sempre più ecosostenibili.

In tale ottica verranno analizzati tre diversi scenari:

1. Motori a Combustione Interna (MCI): per quanto tempo ancora saranno sul mercato? Quali tecnologie consentiranno di migliorarne le prestazioni e soprattutto di diminuire le emissioni di CO₂ e sostanze inquinanti?
2. Fuel Cell Vehicles (FCV): per quali ambiti può essere previsto il loro utilizzo? Si tratta realmente di un tipo di mobilità a "zero emissioni"?
3. Battery Electric Vehicles (BEV): che prospettive ci sono per la loro diffusione? È prevedibile uno step tecnologico importante per le batterie? È prevedibile una modifica della rete elettrica tale da supportare la ricarica contemporanea di milioni di veicoli?

È ragionevole supporre che per ottenere una sensibile riduzione dell'utilizzo di combustibili di natura fossile e dell'emissione di gas serra e sostanze inquinanti non sia plausibile perseguire un'unica strada, ma vadano combinate tra loro più soluzioni tecnologicamente differenti.

Ogni nuova tecnologia che si affaccia sul mercato e che apparentemente sembra la risposta definitiva a tutti i problemi presenta in realtà numerose complicazioni, legate prevalentemente al costo del sistema in sè per sè e allo sviluppo delle infrastrutture necessarie affinché possa essere commercializzata su larga scala e apportare i benefici desiderati.

Attualmente non è disponibile sul mercato alcuna tecnologia in grado di soddisfare contemporaneamente tutti i requisiti e i criteri chiave richiesti dal punto di vista economico, delle prestazioni e dell'impatto ambientale. Per questo motivo ciò che si prospetta e che già si può riscontrare nella realtà di tutti i giorni è il passaggio da una singola modalità di propulsione, costituita dal motore endotermico, ad una vasta gamma di alternative possibili in grado di ridurre l'impatto ambientale imputabile al settore dei trasporti.

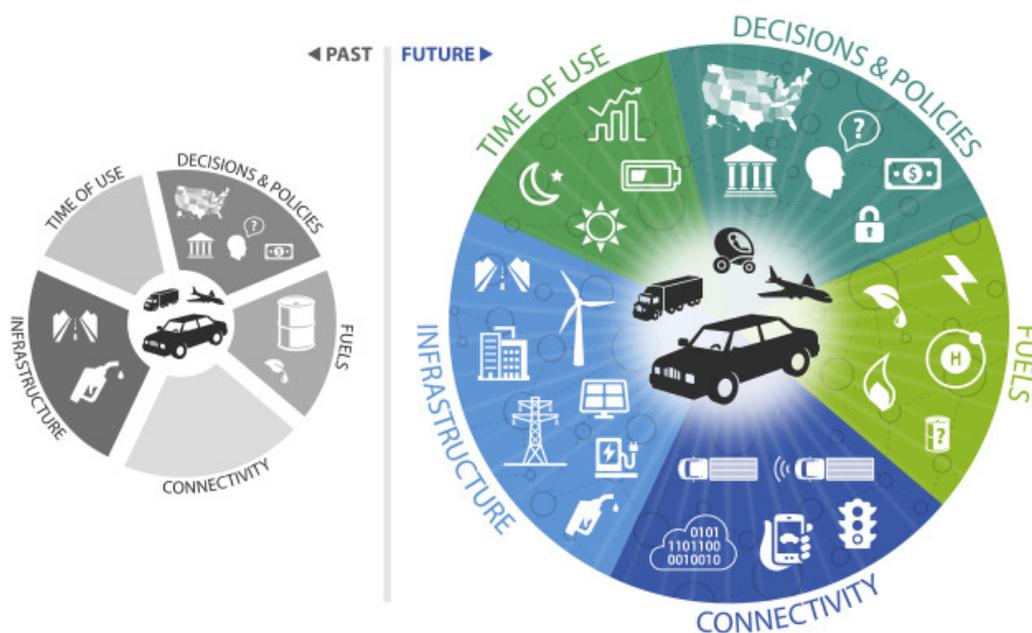


Figura 1: il passato e il futuro dei trasporti a confronto

Come si può ben notare dalla figura 1 il futuro dei trasporti vedrà in primo luogo un ampliamento della gamma di combustibili e forme di energia destinate ai trasporti, con una tendenza sempre più marcata all'abbandono di tutto ciò che fa uso di risorse energetiche non rinnovabili. Come sempre la politica e le decisioni delle istituzioni governative ricopriranno un ruolo di fondamentale importanza nello stabilire quali modalità di trasporto vadano

predilette. Visto lo scenario che si prospetta per il futuro, con varie tipologie di veicoli differenti pronte a muoversi per il pianeta, lo sviluppo di un sistema di infrastrutture adeguato che garantisca un livello di servizi accettabile assume sempre più importanza e sarà anche questo un compito non trascurabile in mano ai governatori delle nazioni.

Inoltre, emergeranno temi altrettanto importanti, fino a pochi anni fa sconosciuti o di marginale rilevanza, come la connettività tra i diversi mezzi che, se sfruttata opportunamente, può contribuire a rendere la mobilità più sicura e veloce; un altro concetto che è destinato ad affacciarsi nella vita delle persone è quello che riguarda le fasce orarie di utilizzo dei mezzi che potrebbe da un lato agevolare il traffico, dato il numero sempre più alto di veicoli circolanti per le strade di tutto il mondo, dall'altro è sicuramente un modo per fronteggiare, almeno nei primi anni, in attesa dello sviluppo di una adeguata rete elettrica, il problema della ricarica contemporanea di milioni di veicoli elettrici a batteria.

Come riportato in Chemali et al. 2016, nel caso di una mancata regolamentazione rigorosa delle emissioni di CO₂ da parte dei governi, l'International Energy Agency (IEA) ha previsto un incremento entro il 2050 del 70 % nel consumo dei combustibili fossili e del 130 % per quanto riguarda le emissioni di gas serra. Quest'ultimo elemento sarebbe responsabile di un innalzamento della temperatura media della Terra di oltre 6 °C, con conseguenze irreversibili sull'intero ecosistema. Per evitare che ciò accada è dunque necessario investire fondi ingenti sia nel settore pubblico che in quello privato, al fine di poter eseguire analisi, studi e ricerche per la messa a punto e la commercializzazione su larga scala di innovative tecnologie di propulsione con un basso impatto ambientale nell'intero ciclo di vita; affinché ciò possa accadere il passo più importante è incrementare l'utilizzo di fonti rinnovabili di energia pulita.

Capitolo 1

MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA

1.1 Punti di forza

Attualmente le tecnologie di movimentazione che si avvalgono di Motori a Combustione Interna (MCI), alimentati da combustibili di natura fossile, rimangono la soluzione dominante per una combinazione di fattori favorevoli, sia dal punto di vista economico, che dal punto di vista tecnologico, legati essenzialmente ad una ormai pluridecennale produzione su larga scala, che ne ha permesso una riduzione al minimo dei costi di fabbricazione, aumentando al contempo il perfezionamento di tale tecnologia, e ad una reperibilità dell'energia primaria a ragionevole basso costo.

Inoltre, la possibilità di stoccare a bordo del veicolo una grande quantità di energia sotto forma di combustibile allo stato liquido e la fitta rete di infrastrutture adibite al rifornimento, rendono i veicoli equipaggiati con Motori a Combustione Interna estremamente funzionali, motivo per cui, ancora oggi, sono i più utilizzati, soprattutto visto il vantaggio che offrono per tragitti su lunga distanza in termini di praticità; infatti bisogna sottolineare come non vi sia una relazione di tipo lineare tra l'autonomia richiesta e i valori di volume e massa del powertrain¹. In particolare il fattore più impattante riguarda lo stoccaggio di energia a bordo del veicolo, e ciò fa sì che i combustibili costituiti da idrocarburi allo stato liquido rappresentino ancora oggi la soluzione più vantaggiosa all'aumentare dell'autonomia richiesta.

Come riportato in Smallbone et al. 2020, i motori endotermici, in particolare nell'articolo si analizza il caso di un motore ad accensione per compressione, risultano essere i più vantaggiosi, considerando l'unità motrice propriamente detta e il serbatoio, sia in quanto a compattezza, sia per quel che riguarda il peso per unità di energia immagazzinata.

Nella tabella sottostante sono riportati i valori (Smallbone et al. 2020) di energia stoccabile per unità di massa e di energia stoccabile per unità di volume nei tre diversi casi in cui si considerano un serbatoio contenente gasolio, un serbatoio contenente benzina e una batteria elettrica agli ioni di litio.

Sistema di stoccaggio dell'energia	[MJ/kg]	[MJ/l]
serbatoio gasolio	39.3	35.3
serbatoio benzina	43	32.9
batteria elettrica	0.612	1.08

¹Smallbone et al. 2020.

Il trasporto di merci e persone è alla base della società moderna e attualmente è ancora quasi interamente realizzato tramite Motori a Combustione Interna, che utilizzano combustibili fossili allo stato liquido per la loro ampia offerta, convenienza ed economicità. I MCI non sono usati solo per applicazioni di trazione, ma anche per la produzione di energia. Risulta dunque significativo far notare che al momento non ci sono alternative in grado di competere con questa tecnologia sia considerando il solo settore dei trasporti che, soprattutto, se si tengono in conto tutte le applicazioni in cui sono sfruttati.

1.2 Problematiche

I Motori a Combustione Interna consumano ogni anno 3000 milioni di tonnellate di olio combustibile fossile su un totale di 13000 milioni utilizzati globalmente e contribuiscono ad emettere circa il 10% della produzione mondiale di gas serra².

Numerosi studi effettuati negli ultimi anni hanno mostrato l'esistenza di una notevole correlazione tra il fenomeno del surriscaldamento globale e la quantità di CO₂ emessa in atmosfera.

Inoltre, sebbene siano stati fatti grandi progressi per quel che riguarda la quantità di sostanze inquinanti (CO, NO_x, HC e particolato) prodotte e liberate in atmosfera da parte dei veicoli equipaggiati con Motori a Combustione Interna, grazie all'adozione di sistemi di controllo e post trattamento dei gas di scarico, ancora oggi questo tema ricopre un ruolo di primaria importanza e costituisce uno degli ambiti di ricerca più rilevanti per capitale investito, soprattutto per via delle normative sempre più severe che regolano l'emissione di sostanze nocive per l'uomo e per l'ambiente in generale.

Uno dei punti deboli dei Motori a Combustione Interna risiede nel basso valore di rendimento medio di questa tecnologia; infatti, se si esegue un'analisi detta in inglese "tank-to-wheel", letteralmente "dal serbatoio alla ruota" si può notare come i MCI siano nettamente i più sfavoriti (vedi tabella).

Sistema di propulsione	rendimento medio
BEV	> 80%
FCV	~ 50%
MCI	< 15%

Per questo motivo i MCI sono anche quelli per cui è maggiore l'energia richiesta per percorrere l'unità di lunghezza, con valori che per un motore Diesel possono arrivare fino a $\sim 16000 \frac{kJ}{km}$, contro i soli $\sim 4000 \frac{kJ}{km}$ di un BEV.

²Reitz et al. 2020.

1.3 Prospettive

Nel provare ad immaginare il futuro dei Motori a Combustione Interna bisogna effettuare delle considerazioni serie e soprattutto realistiche.

Come riportato in Reitz et al. 2020 la possibilità di avere a disposizione energia economicamente accessibile ha contribuito al miglioramento dello standard di vita anche in quei paesi più poveri ed arretrati; per anni i combustibili fossili sono stati l'unica fonte di energia disponibile e ciò ha fatto sì che l'intero pianeta possa essere attualmente collegato da un sistema di infrastrutture strettamente associato ai Motori a Combustione Interna.

Cambiare improvvisamente ciò che è stato costruito in centinaia di anni non è realisticamente possibile, né economicamente sostenibile ed è per questo che, tenendo ben presente la necessità di un impellente cambiamento che, per essere efficace deve riguardare una modifica a tutto tondo dello stile di vita di ogni singolo individuo, va pensata una transizione controllata, realistica e diretta da esperti del settore, che permetta la diffusione di sistemi che utilizzino fonti di energia pulita e rinnovabile.

In quest'ottica, data la non immediatezza del processo si deve dunque pensare a soluzioni tecnologiche che, nel breve termine, permettano una riduzione delle emissioni di gas serra, sostanze inquinanti e dello sfruttamento di giacimenti di energia primaria di natura fossile.

A tal proposito non bisogna trascurare l'importanza che i Motori a Combustione Interna potrebbero continuare a ricoprire negli anni a venire, pur essendo consapevoli che ci saranno delle modifiche sostanziali, sia per quel che riguarda la tecnologia, sia nel tipo di combustibile utilizzato per l'alimentazione del motore stesso.

La grande maggioranza degli ingegneri che lavorano in ambito automotive è ottimista riguardo all'importanza che i Motori a Combustione Interna continueranno ad avere nel soddisfare i bisogni della popolazione mondiale in quanto a mobilità e produzione di energia; tuttavia, per fare in modo che ciò possa avvenire è necessario che vengano sviluppate innovative tecnologie, che permettano di competere con i sistemi di propulsione emergenti (Reitz et al. 2020).

Ci sono vari aspetti su cui poter lavorare per evitare la scomparsa dei Motori a Combustione Interna, sebbene sia ormai chiaro che il mercato si stia muovendo in un'altra direzione ben delineata, quella di una sempre maggior elettrificazione dei trasporti, sostenuta e promossa da iniziative politiche

mediante incentivi e normative, che sfavoriscono la circolazione dei motori a combustione.

Sempre più paesi stanno comunicando che, chi prima e chi dopo (si parla di date comprese tra il 2030 e il 2050), vieteranno la vendita e l'immatricolazione di veicoli dotati di motori a combustione; tra questi paesi vi sono anche nazioni come la Francia e soprattutto la Germania, in cui risiedono case automobilistiche fra le più importanti al mondo e questo fa comprendere che, se la linea politica venisse mantenuta tale, i Motori a Combustione Interna sarebbero destinati ad aver vita breve.

L'unica alternativa a questo scenario, vista la rotta intrapresa, consiste nell'investire grosse somme di capitale per non interrompere l'evoluzione dei Motori a Combustione Interna, sia in termini di performace, che in termini di emissioni di CO₂ e sostanze inquinanti.

Nel prossimo paragrafo verranno presentati una serie di possibili elementi su cui lavorare per continuare a rendere i MCI competitivi sul mercato.

1.4 Miglioramenti

Per continuare a migliorare i Motori a Combustione Interna e proseguirne il percorso di maturazione, iniziato più di un secolo fa, rendendoli competitivi sul mercato sia in materia di prestazioni, sia in merito al rispetto dei limiti imposti per legge sulle emissioni di CO₂ e sostanze inquinanti, ci sono diverse vie percorribili, alcune delle quali di valenza più generale, altre specifiche per tale tecnologia.

Spesso si rischia di considerare prestazioni ed emissioni inquinanti come due temi totalmente indipendenti l'uno dall'altro, tuttavia sono strettamente collegati in quanto un sistema di propulsione con performance scadenti consumerà di più e dunque inquinerà di più. Per questo motivo le soluzioni per il miglioramento delle performance e la riduzione di CO₂ e sostanze inquinanti verranno trattate contestualmente.

Le piste percorribili a tal proposito sono:

- miglioramenti generali riguardanti il design del veicolo;
- adozione di metodi di combustione avanzati;
- perfezionamento dei sistemi di controllo e post-trattamento dei gas di scarico;
- realizzazione di sistemi di propulsione ibridi;
- utilizzo di combustibili alternativi.

Miglioramenti generali riguardanti il design del veicolo

Questi tipi di miglioramenti non hanno un'attinenza diretta con la tecnologia dei Motori a Combustione Interna, ma sono comunque degli accorgimenti che permettono di incrementare le prestazioni e ridurre i consumi e le emissioni di sostanze indesiderate.

Tra i tanti espedienti possibili i più importanti sono:

1. riduzione del peso del veicolo → uso di materiali più leggeri, adozione di tecniche di produzione avanzate e ottimizzazione topologica dei componenti che permetta l'eliminazione del materiale in eccesso; in tal modo si può avere una riduzione del peso fino al 25 %;

2. ottimizzazione dell'aerodinamica del veicolo \rightarrow modifica del design con conseguente riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica;
3. riduzione dell'attrito tra pneumatici e asfalto \rightarrow uso di pneumatici a bassa resistenza al rotolamento che, pur comportando un maggiore costo d'investimento iniziale, permettono di diminuire i costi d'esercizio con un possibile risparmio del carburante fino al 10 %.

Adozione di metodi di combustione avanzati

Negli ultimi anni la necessità di avere una sempre minore produzione di inquinanti e di CO₂ ed una conseguente riduzione dei consumi di combustibile, ha portato a definire degli obiettivi per quel che riguarda il rendimento di picco dei Motori a Combustione Interna. L'intento è quello di raggiungere un valore del rendimento di picco pari al 55% entro il 2025 ed un valore del 60% entro il 2035 (Smallbone et al. 2020).

Le strade percorribili sono di diverso tipo, ma la gran parte di esse mira a lavorare sulla fase della combustione, poiché ritenuta la più impattante sull'efficienza di conversione da energia chimica a energia termica ed infine meccanica.

Per sviluppare metodi di combustione avanzati in grado di aumentare l'efficienza di conversione dell'energia bisogna innanzitutto conoscere approfonditamente in che modo fattori come le caratteristiche dello spray di combustibile immesso in camera e il movimento dell'aria nel cilindro influenzano lo svolgimento della combustione.

Alcuni di questi metodi sono:

- Low Temperature Combustion (LTC);
- diluted (or lean-burn) gasoline combustion;
- clean Diesel combustion.

Tutti questi metodi avanzati di combustione sono solitamente associati ai concetti di downsizing e boosting che permettono di adottare un motore di cilindrata ridotta, abbinato ad un turbocompressore, in modo tale che possa esprimere le stesse prestazioni, o addirittura migliori, rispetto a motori di cilindrata superiore, ma con consumi ed emissioni inferiori.

Low Temperature Combustion (LTC)

Low Temperature Combustion (LTC), è un processo che avviene senza propagazione del fronte di fiamma e a temperature inferiori rispetto a quelle che si raggiungono in un convenzionale processo di combustione. Può essere realizzato usando sia benzina che gasolio e persino i biocombustibili.

Tramite questo procedimento si può avere un incremento di efficienza nella conversione di energia fino al +20%³.

Questo metodo prevede di comprimere una miscela di aria e combustibile diluita con un eccesso d'aria o con dei gas di scarico riciclati cosicchè, in seguito alla compressione, aumenti la temperatura della miscela ed essa possa autoaccendersi.

Un altro aspetto molto importante è che la combustione avvenga gradualmente, in maniera controllata e questo risultato è raggiunto gestendo il tempo di autoaccensione e il ROHR della combustione.

Sono state sviluppate diverse varianti tutte riconducibili alla Low Temperature Combustion, in cui è differente il modo in cui viene formata la miscela di aria e combustibile e come essa viene accesa.

Le opzioni più interessanti sono:

- Homogeneous-Charge Compression Ignition (HCCI), combina alcuni aspetti dei motori Diesel e altri dei motori a benzina; il combustibile è iniettato in camera durante la fase di aspirazione dell'aria come avviene solitamente nei motori ad accensione comandata, ma invece di accendere la miscela tramite la scintilla scoccata dalla candela, vengono raggiunti quei valori di densità e temperatura tali per cui la miscela reagisce spontaneamente con la sola compressione. In tal modo si ottengono le emissioni tipiche di un motore a benzina (pochi NO_x e particolato nullo) con il rendimento proprio di un motore Diesel; in particolare, l'assenza della valvola a farfalla e dunque la mancanza delle perdite su di essa, è uno dei fattori per cui aumenta il rendimento.

- Stratified-Charge Compression Ignition (SCCI), viene combinata la formazione di una carica stratificata con l'accensione per compressione, prendendo gli aspetti positivi dell'una e dell'altra tecnica. Anche questo metodo si basa sull'aumento di densità e temperatura della miscela in seguito alla compressione, tuttavia il combustibile è iniettato in camera piuttosto tardi, durante la corsa di compressione. La combustione avviene nella zona in

³U.S.Department of Energy 2020b.

cui la miscela presenta un rapporto vicino alla stechiometria; permette di aumentare il rendimento.

- Premixed-Charge Compression Ignition (PCCI), è una strategia nella quale un'iniezione anticipata causa un processo di combustione dove il combustibile brucia in condizioni di premiscelamento. Anche questo metodo combina i vantaggi dei motori ad accensione comandata e quelli dei motori ad accensione per compressione, ottenendo così una riduzione degli inquinanti, in particolare NO_x e particolato, una migliore efficienza di conversione dell'energia e una riduzione del rumore legato alla combustione. La bassa volatilità del gasolio può ostacolare la formazione di una carica premiscelata di aria e combustibile e per ovviare a questo problema è usato un dispositivo che permetta di vaporizzare il gasolio stesso. Il ricircolo dei gas di scarico può essere usato per controllare la temperatura interna del cilindro e la velocità di rilascio del calore (Bhiogade et al. 2016).

- Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI), è una tecnica che è stata sviluppata presso l'Università del Wisconsin e prevede in un primo momento la miscelazione tra un combustibile a bassa reattività e l'aria; questa miscela viene compressa senza raggiungere le condizioni di autoaccensione. In seguito, quando si sta eseguendo ancora la compressione viene iniettato dell'altro combustibile, questa volta ad alta reattività. Infine la miscela che si è formata viene accesa mediante l'iniezione di altro combustibile ad alta reattività quando il pistone si trova vicino al punto morto superiore. Come si può notare, questo procedimento richiede due diversi combustibili, uno altamente reattivo e l'altro poco reattivo; il primo è iniettato quando la pressione in camera è alta, verso la fine della corsa di compressione, il secondo è iniettato durante l'aspirazione. Non è previsto l'uso di una valvola a farfalla; anche questa tecnica consente, come le altre, di aumentare il rendimento e diminuire l'emissione di sostanze inquinanti.

Riassumendo, i vantaggi offerti da un sistema che fa uso della LTC sono:

1. maggior efficienza nella conversione di energia rispetto ai tradizionali sistemi di combustione;
2. minori scambi di calore a parete a causa della più bassa temperatura raggiunta con la combustione; ciò permette di mantenere la pressione nel cilindro più alta per un periodo più lungo e dunque di produrre un maggior lavoro indicato;

3. eliminazione della valvola a farfalla che è tra le maggiori cause di inefficienza negli attuali motori ad accensione comandata;
4. eliminazione del rischio di detonazione presente nei motori ad accensione comandata e conseguente possibilità di aumentare il rapporto di compressione, come nei motori ad accensione per compressione con tutti i vantaggi annessi;
5. produzione minima di sostanze inquinanti allo scarico, con conseguente minore necessità di avere sistemi di post trattamento altamente performanti.

Diluted (or lean-burn) gasoline combustion

Questa tecnica di combustione prevede che il fronte di fiamma si propaghi in una miscela costituita da aria e combustibile che può essere sia di tipo premiscelata, che stratificata.

Come suggerisce il nome della tecnica viene usato un quantitativo di aria in eccesso rispetto alle condizioni stechiometriche (miscela magra); in alternativa o in aggiunta all'eccesso d'aria aspirata, si può anche attuare il ricircolo dei gas di scarico per diluire ulteriormente la miscela.

Il caso con la carica stratificata offre un potenziale maggiore per quel che riguarda l'incremento di efficienza(U.S.Department of Energy 2020b) e prevede l'iniezione di benzina direttamente nel cilindro con la necessità che si formi una miscela di aria e combustibile con caratteristiche adeguate, nella zona limitrofa a quella in cui viene fatta scoccare la scintilla.

Questo sistema risulta vantaggioso perchè:

1. permette di parzializzare la coppia agendo sulla massa di combustibile iniettato e non sulla quantità di aria aspirata, eliminando così la valvola a farfalla che è responsabile di grossa parte delle perdite;
2. a carico parzializzato il rendimento è più alto rispetto ai sistemi convenzionali;
3. la minor temperatura dei prodotti della combustione legata all'eccesso d'aria che genera un "effetto zavorra", comporta minori perdite di calore, soprattutto ai carichi parzializzati.

Clean Diesel combustion

In questa tipologia di combustione il processo inizia in un modo simile a ciò che avviene per i tradizionali motori ad accensione per compressione, dove la combustione è detta diffusiva: il combustibile, immesso ad alta pressione in camera sotto forma di finissime goccioline, formando una sorta di spray, si meschia con l'aria formando localmente una miscela con composizione prossima alla stechiometria. Nella "clean Diesel combustion" occorre una maggiore miscelazione tra aria e combustibile prima che si accenda la fiamma e questo è il motivo per cui viene prodotto meno particolato e aumenta l'efficienza di conversione dell'energia. Se poi si usa anche il ricircolo dei gas di scarico, l'abbassamento della temperatura riduce anche la formazione di NO_x .

Posto che con questo procedimento si ha una minima formazione di inquinanti in camera, non servono grandi sistemi di post-trattamento dei gas per ridurre le emissioni fino ad un livello accettabile e consentito dalla legge.

Questo sistema necessita però di controllo computerizzato, possibilità di iniettare il combustibile in più fasi e ad altissima pressione, possibilità di ricircolare i gas esausti (EGR).

Per fare in modo che questo sistema possa avere successo sul mercato e possa essere disponibile ad un costo ragionevole per tutti i veicoli, vanno superati alcuni aspetti che attualmente risultano ancora critici come:

- il controllo della quantità e della temperatura dei gas esausti ricircolati per minimizzare le emissioni;
- migliorare le diverse fasi riguardanti l'iniezione di combustibile in camera ad alta pressione per controllare al meglio la formazione dello spray di combustibile;
- migliorare le iniezioni post-combustione che servono per ridurre la formazione degli inquinanti in camera e l'espulsione di sostanze nocive che attraversano il sistema di post-trattamento.

Per sviluppare e affinare tali modelli di combustione presi in considerazione è fondamentale l'uso di software di fluidodinamica computazionale, che permettono di modellare, prevedere e giustificare ciò che avviene in camera di combustione, consentendo così di lavorare sugli aspetti necessari a raggiungere il risultato desiderato.

Altri accorgimenti utili per aumentare l'efficienza di conversione dell'energia sono:

-l'iniezione di acqua (nei motori ad accensione comandata), realizzata mediante nebulizzazione della stessa; può essere effettuata sia nel condotto di aspirazione, sia nel cilindro. Essendo l'acqua, che deve essere distillata, un liquido inerte, permette di abbassare la temperatura di alcuni componenti presenti in camera di combustione, diminuendo così il rischio di una preaccensione della miscela che può portare al fenomeno della detonazione. Contestualmente diminuisce la produzione di inquinanti (in particolare CO e NO_x) e può essere aumentato il rapporto di compressione, incrementando così il rendimento complessivo;

-la disattivazione dei cilindri, è uno strumento molto interessante per ottenere il miglior compromesso tra prestazioni, consumi ed emissioni. Consiste nello spegnimento di uno o più cilindri per diminuire gli attriti e far funzionare i restanti in modo più efficiente. Consiste in una sorta di downsizing reversibile, da attuare in caso di necessità, facendo lavorare i cilindri che rimangono attivi a farfalla spalancata; per quanto riguarda i cilindri disattivati vengono lasciate le valvole chiuse, con il gas contenuto che viene compresso e si espande, restituendo il lavoro speso in compressione; mantenendo chiuse le valvole si annullano le perdite legate al fenomeno del pompaggio.

Perfezionamento dei sistemi di controllo e post-trattamento dei gas di scarico

Questa è una frontiera che ha assunto un'importanza sempre maggiore dal momento che sono state redatte normative per la regolamentazione delle sostanze nocive per l'uomo e per l'ambiente. Inoltre, un controllo minuzioso di ciò che avviene a bordo del veicolo durante la sua marcia ed una gestione sistematica di tali processi, consente un notevole incremento prestazionale.

Per continuare a perfezionare questo settore, vanno realizzati sistemi di controllo in grado di regolare in tempo reale ed in maniera sempre più precisa i processi di combustione, al fine di ridurre le variazioni da ciclo a ciclo e di intervenire tempestivamente in caso di eventuali anomalie. Un esempio concreto riguarda i sistemi per il controllo dell'iniezione del combustibile in camera, al fine di realizzare una miscela con le caratteristiche il più possibile vicine a quelle richieste dall'applicazione.

Per assolvere a questi compiti stanno assumendo sempre maggior importanza software che, sfruttando modelli fisici e statistici, riescono ad effettuare previsioni sulla base di determinati input.

Un altro ambito di ricerca relativamente recente riguarda lo sfruttamento dell'interconnettività tra i veicoli di ultima generazione, che consente di comunicare ed integrare dati provenienti da fonti esterne inerenti, per esempio, al traffico o informazioni particolari relative alle infrastrutture stradali. A tal proposito si parla di V2X, in inglese "vehicle-to-everything" (letteralmente "veicolo verso qualsiasi cosa"), un sistema di interconnessione smart e di comunicazione di informazioni tra il veicolo e qualsiasi altra entità dotata della stessa tecnologia, che può portare ad una riduzione nel consumo di combustibile⁴.

Parlando di sistemi di post-trattamento dei gas di scarico è altresì significativo sottolineare l'importanza delle normative che regolano le emissioni di sostanze inquinanti. Come riportato in Joshi 2020 in Europa i dati dimostrano che queste norme stanno funzionando correttamente, in particolare se si confrontano i dati pre e post "Euro 6", si vede una netta diminuzione, soprattutto di NO_x e particolato.

Un aspetto relativamente recente da non sottovalutare è legato allo sviluppo di motori ad accensione comandata ad iniezione diretta; il sistema GDI (Gasoline Direct Injection) prevede infatti l'iniezione del combustibile direttamente in camera di combustione ad una pressione abbastanza elevata e questo ha fatto sì che, dall'avvento di tale tecnologia, anche i motori SI abbiano dovuto iniziare a fare i conti con l'emissione di particolato che tuttavia, per i diversi valori di pressione di iniezione rispetto ai motori CI, presenta dimensioni e morfologia differenti, motivo per cui per essere abbattuto necessita di sistemi ad hoc, diversi da quelli usati nei motori Diesel.

La necessità di poter immatricolare nuovi veicoli che rispettino le norme vigenti ha stimolato lo sviluppo e il miglioramento di sistemi di post-trattamento sempre più performanti.

Gran parte degli studi sui sistemi di post-trattamento sono inerenti al cercare di fare in modo che essi si attivino esattamente nel momento in cui viene acceso il motore, senza che debbano essere raggiunte le temperature tipiche del funzionamento a regime. La stragrande maggioranza degli inquinanti prodotti da un veicolo equipaggiato dei moderni sistemi di post-trattamento

⁴Reitz et al. 2020.

vengono prodotti proprio nei minuti immediatamente successivi all'accensione del motore, in quanto certi elementi, responsabili della diminuzione delle sostanze inquinanti, si attivano solo a determinate temperature, piuttosto alte.

Al giorno d'oggi, infatti, i sistemi sviluppati sono già molto performanti, al punto che, spesso, la quantità di sostanze inquinanti presenti nei gas di scarico, una volta raggiunte le condizioni di funzionamento ottimali, è minore rispetto alla quantità presente nell'ambiente esterno (Joshi 2020).

Realizzazione di sistemi di propulsione ibridi

Quando si parla di veicoli ibridi, cioè veicoli dotati di due motori, uno elettrico e uno termico, non si può non fare un accenno alla tecnologia Mild Hybrid, letteralmente "ibrido leggero". Questo tipo di motorizzazione di sviluppo relativamente recente, contrariamente a quanto possa far pensare il nome, ha poco a che fare con la classica tecnologia ibrida; infatti il motore elettrico utilizzato è piuttosto piccolo e non è in grado di movimentare il veicolo autonomamente, come invece avviene nell'ibrido classico, ma entra in funzione solo in alcuni momenti, come la marcia a bassa velocità e l'accensione⁵.

L'energia elettrica viene recuperata in fase di frenata e accumulata in una batteria al litio di piccole dimensioni; la sua funzione più importante è quella di riscaldare elettricamente i catalizzatori e ridurre così le emissioni di inquinanti all'avvio del motore ed in tutte quelle condizioni in cui la temperatura dei gas di scarico è ancora lontana da quella necessaria per attivare al meglio i sistemi di post-trattamento. Si ha anche una riduzione dei consumi.

Parlando di veicoli ibridi veri e propri se ne possono distinguere di due tipi:

1. Full Hybrid, in cui il motore elettrico funziona sia autonomamente che in sinergia con quello termico e la batteria si ricarica sfruttando l'energia prodotta dal motore termico e l'energia cinetica recuperata in fase di decelerazione;
2. Plug-In Hybrid, dove il motore elettrico può garantire fino a 50/60 km di autonomia e la batteria può essere ricaricata sia con una presa domestica, sia con una colonnina pubblica, oltre che con il recupero

⁵Fraidl et al. 2018.

dell'energia in frenata. Rispetto alle Full Hybrid la batteria utilizzata è più potente.

La diffusione dei veicoli ibridi è iniziata dal momento in cui, negli ultimi anni, è nata l'esigenza di produrre veicoli sempre più ecosostenibili e a ridotto impatto ambientale, non volendo tuttavia rinunciare alle prestazioni e alla funzionalità dei Motori a Combustione Interna.

Il motore termico ha una duplice funzione: trasformare l'energia chimica del combustibile in energia cinetica e caricare la batteria del motore elettrico.

La tecnologia ibrida oltre ad una riduzione dei consumi (e dunque di CO₂) e di sostanze inquinanti, comporta anche numerosi altri vantaggi come:

- spinta addizionale esercitata dal motore elettrico a massimo carico che permette di aumentare le prestazioni, senza incrementare il consumo di combustibile;

- nella partenza da fermo viene usato il solo propulsore elettrico, limitando il consumo di combustibile (aspetto da non sottovalutare nel caso di guida in tratti urbani);

- in fase di frenata l'energia cinetica non viene totalmente dissipata, ma viene convertita in energia elettrica e immagazzinata nella batteria;

- riduzione dell'inquinamento acustico.

Utilizzo di combustibili alternativi

Più del 90% dei trasporti si basa su combustibili derivati dal petrolio, perché hanno un alto rapporto energia/volume, sono facilmente trasportabili, stoccabili, costano ancora relativamente poco ed è per questo che nell'ottica di una riduzione dello sfruttamento di fonti energetiche primarie di natura fossile e della quantità di CO₂ prodotta, assume notevole importanza la ricerca e lo sviluppo di combustibili alternativi.

Tale soluzione infatti consente, non solo di ridurre lo sfruttamento dei giacimenti petroliferi, fonte energetica non rinnovabile, ma permette anche di limitare l'emissione di CO₂ che deriva sia dalla combustione, che dai processi che trasformano il petrolio grezzo in benzina e gasolio.

La necessità principale nello sviluppare alternative agli idrocarburi derivati dal petrolio, sia che essi siano biocombustibili, sia che essi siano combustibili sintetici, consiste nella possibilità di poterli utilizzare nei convenzionali Motori a Combustione Interna con minimi costi di modifica.

Sebbene i vantaggi per quel che riguarda l'emissione di CO₂ in atmosfera non siano in discussione, affinché questi combustibili alternativi possano conquistare una parte importante di mercato e contribuire a ridurre le emissioni di sostanze indesiderate, è necessario che diventino presto ampiamente disponibili ad un prezzo comparabile, se non inferiore, a quello dei combustibili tradizionali; tuttavia, per fare in modo che ciò possa accadere, è necessario investire nello studio, nello sviluppo e nella commercializzazione di questo che potrebbe rivelarsi un buon compromesso per allungare l'aspettativa di vita dei Motori a Combustione Interna, non rinunciando alle prestazioni che essi offrono, ma contenendo le emissioni entro livelli accettabili.

Nei motori SI è stato dimostrato che i biocombustibili possono aumentare il rendimento del motore, abbassare il rischio di detonazione e ovviamente diminuire la quantità emessa di HC, CO e particolato⁶, quest'ultimo divenuto un problema per i motori SI a partire dallo sviluppo della tecnologia GDI.

Normalmente la densità di energia dei biocombustibili è più bassa rispetto a quella dei combustibili derivati dal petrolio e questo è uno svantaggio, in particolare se i prezzi per unità di volume sono circa gli stessi.

Attualmente i combustibili rinnovabili sono prodotti principalmente a partire dalle biomasse pertanto, gran parte delle materie prime necessarie alla realizzazione di questi combustibili richiedono, per poter essere coltivate, campi, macchine, lavoro umano e grande disponibilità di acqua; da qui nasce il problema etico di destinare risorse alla produzione di combustibile, piuttosto che per produrre cibo. Per questo motivo si sono sviluppate alternative a questa modalità di produzione dei biocombustibili, che utilizzano rifiuti agricoli, forestali, scarti alimentari che, altrimenti, non avrebbero alcuna utilità e biomasse come le alghe, per la cui crescita non è necessaria la coltivazione nei campi.

Alcuni esempi di combustibili alternativi sono:

- metanolo;
- etanolo;
- butanolo;
- metil-t-butil etere (MTBE);
- 2-metilfurano (MF) e 2,5-dimetilfurano (DMF);

⁶Larsson et al. 2019.

- biodiesel;
- etere dimetilico;
- bio GPL;
- biogas;
- idrogeno.

Metanolo

Può essere prodotto in numerosi modi come per esempio a partire dal syngas, dalla gassificazione di biomasse come colture alimentari, cellulosa o rifiuti di natura organica, sia domestici, che industriali. E' altamente biodegradabile e presenta il vantaggio di poter essere utilizzato in motori SI, motori CI e anche nel caso in cui si adotti la tecnica Reactivity-Controlled Compression Ignition (RCCI).

Etanolo

E' il biocombustibile attualmente più diffuso e può essere sia miscelato alla benzina per aumentarne il numero di Ottano, che venire usato direttamente come combustibile. Viene prodotto mediante fermentazione di diverse sostanze tra cui i prodotti delle colture di zucchero, la fecola e recentemente anche gli zuccheri contenuti in residui lignei, rifiuti agricoli e forestali, diminuendo così il costo di produzione del combustibile. C'è anche la possibilità di produrlo a partire dal syngas, come per il metanolo.

Butanolo

L'interesse per il butanolo come soluzione sostenibile per combustibili alternativi, da utilizzare sia in motori SI, che in motori CI, si è sviluppata piuttosto recentemente, a partire dal 2012.

E' presente in due forme: n-butanolo, prodotto agevolmente con la fermentazione e iso-butanolo, il quale ha un maggiore numero di Ottano, ma è più complicato da produrre a partire dalle biomasse.

Il grande vantaggio offerto dal butanolo consiste nella sua maggior densità di energia, che porta ad un minor consumo di carburante rispetto agli altri alcoli visti (metanolo e etanolo).

Metil-t-butil etere (MTBE)

E' ancora aperto il dibattito se l'MTBE possa considerarsi o meno un biocombustibile, in quanto pur non essendo anaerobicamente biodegradabile, recenti studi hanno dimostrato che non ha effetti tossici sugli organismi

acquatici (Larsson et al. 2019). Pur possedendo proprietà benefiche che lo rendono un serio candidato ad essere usato come combustibile nei motori SI, il fatto che non sia biodegradabile e che debba essere prodotto a partire da altri combustibili alternativi, come ad esempio il metanolo, lo pone in svantaggio sul mercato, per via di un aumento dei costi di produzione ed una diminuzione nell'efficienza di conversione dell'energia.

2-metilfurano (MF) e 2,5-dimetilfurano (DMF)

Sono due coomposti facenti parte della famiglia dei furani potenzialmente utilizzabili come biocombustibili. E' stato visto che il loro uso può aumentare l'efficienza del motore; presentano inoltre un elevato numero di Ottano. Al giorno d'oggi tuttavia richiedono un processo produttivo a partire da biomasse, come cellulosa e scarti vegetali, piuttosto lungo e per questo non sono ancora ampiamente utilizzati.

Biodiesel

Può essere prodotto a partire da biomasse di diverso tipo come oli vegetali (soia, colza, jatropha, cocco, palma), grasso animale e qualsiasi altro tipo di rifiuto organico. Come suggerisce il nome, è un'alternativa rinnovabile al convenzionale Diesel derivato dal petrolio, da usare nei motori CI.

Le proprietà del biodiesel cambiano abbastanza a seconda delle materie prime utilizzate per produrlo, ma allo stesso tempo, l'ampia gamma di soluzioni disponibili a partire dalle quali si ricava biodiesel, costituisce un fattore di notevole importanza per la sua diffusione ad un costo pari, se non inferiore, a quello del Diesel tradizionale. Infatti, come riportato in Knothe et al. 2016 il 75-80% del costo del biodiesel è determinato dal costo delle materie prime da cui deriva ed è per questo che è molto importante il fatto che si possa ottenere a partire da oli alimentari esausti e altri rifiuti di natura organica perchè, non solo essendo rifiuti da eliminare non hanno un costo, ma chi produce questi rifiuti evita di dover pagare per il loro smaltimento.

Le proprietà del biodiesel si misurano in termini di: viscosità cinematica, numero di Cetano, stabilità all'ossidazione, densità e altre proprietà legate alla combustione. Può essere miscelato al Diesel classico in una proporzione che spazia dal 5% al 100% di biodiesel.

Etere dimetilico

E' un'alternativa ecosostenibile al Diesel convenzionale che non presenta alcuna forma di tossicità, nè cancerogenicità; tuttavia, venendo prodotto a partire dal syngas, attraverso il metanolo, in costosi reattori operanti

ad alte temperature ed in presenza di catalizzatori estremamente specifici⁷, attualmente ha un costo di produzione abbastanza elevato.

Numerosi studi stanno cercando di capire come produrre etere dimetilico a partire da metanolo in fase liquida a temperatura ambiente, grazie all'uso di intensi campi elettrici. Qualora i suddetti studi dovessero dare esiti positivi, verrebbero risolti in un colpo solo, sia i problemi di produzione, che quelli di trasporto di tale combustibile e si aprirebbe una frontiera molto importante per l'utilizzo di questa sostanza ad impatto ambientale nullo.

Bio GPL

Costituisce l'alternativa rinnovabile ai gas di petrolio liquefatti (GPL). E' prodotto a partire da materie prime 100% rinnovabili come rifiuti, residui organici, tra cui grassi animali scartati dall'industria alimentare, oli vegetali e oli da cucina esausti, integrati con altri bioprodotti.

Esso risulta pressochè identico al tradizionale GPL e può essere sia miscelato ad esso, sia usato da solo, senza dover apportare modifiche alla tecnologia esistente.

Il basso tenore di carbonio, combinato all'uso di materie prime rinnovabili, anch'esse a basse emissioni di carbonio, può contribuire a ridurre ampiamente le emissioni di gas serra.

Biogas

E' una miscela di vari gas tra i quali, quello presente in maggior quantità, è il metano. Viene prodotto in appositi impianti a partire da residui organici vegetali e animali, grazie alla fermentazione eseguita da particolari batteri in condizioni anaerobiche.

Le materie prime utilizzate possono essere ottenute con colture apposite oppure possono essere rifiuti organici urbani, fanghi di depurazione, residui dell'agroindustria o dell'industria zootecnica.

Uno dei vantaggi da non sottovalutare del biogas (chiamato anche biometano), oltre al fatto che viene prodotto a partire da materie prime rinnovabili, consiste nell'evitare che si diffonda nell'atmosfera il metano che viene prodotto durante la decomposizione della materia organica animale e vegetale. Il metano è uno dei gas serra più potenti, molto più della CO₂ e, per questo, è auspicabile la sua degradazione in H₂O e CO₂, piuttosto che la sua liberazione direttamente in atmosfera. Per lo stesso motivo bisogna fare grande attenzione che non vi siano fuoriuscite di biogas dagli impianti di produzione e stoccaggio dello stesso.

⁷Consiglio Nazionale delle Ricerche 2017.

Va tuttavia tenuto in considerazione che, per produrre una quantità di biogas accettabile, si necessita di un'enorme abbondanza di materia organica e biomasse, non sempre disponibile se non si dedicano intere colture alla produzione di materie prime per la produzione di combustibile.

Idrogeno

E' l'elemento più presente in natura, fornisce la combustione più efficace rispetto a qualsiasi altro combustibile e quella più pulita in quanto, in linea teorica, oltre a liberare calore, l'unico prodotto è H_2O .

Sebbene un veicolo dotato di Motore a Combustione Interna, alimentato ad idrogeno, non comporti la liberazione di CO_2 come prodotto della combustione, gran parte dell'idrogeno (circa il 96%) è attualmente prodotto a partire da combustibili fossili, tramite il processo di steam reforming, che utilizza prevalentemente metano liberando CO , che essendo tossico viene poi trasformato in CO_2 .

Una piccola quantità di idrogeno (circa il 4%) è prodotta tramite elettrolisi dell'acqua; anche in questo caso per poter affermare che l'idrogeno sia prodotto in maniera ecosostenibile e pulita, bisogna che l'energia elettrica sia ottenuta mediante lo sfruttamento di fonti rinnovabili come l'energia solare o quella eolica.

Vi è anche una terza modalità per produrre idrogeno, ancora in via di sviluppo, ma realmente ecosostenibile, che fa uso di particolari alghe le quali, una volta private dello zolfo, non producono più ossigeno con la fotosintesi, ma idrogeno.

Infine, vi è anche la possibilità di produrre idrogeno a partire da materiali di scarto, grazie all'uso di particolari batteri.

Per poter essere usato come combustibile nei Motori a Combustione Interna l'idrogeno va compresso, fino ad essere portato ad una pressione molto elevata, e va liquefatto per poterne trasportare, a parità di volume del serbatoio disponibile, una maggior quantità; tuttavia, affinché la quantità di idrogeno stoccata sia sufficiente a garantire una autonomia accettabile, è richiesto un peso aggiuntivo molto elevato per via delle condizioni particolari di stoccaggio e trasporto (come detto in precedenza va mantenuto ad una pressione molto elevata, anche di diverse centinaia di bar).

Un'altra barriera, probabilmente la più considerevole, alla diffusione di veicoli che utilizzano l'idrogeno come carburante, è costituita dalla scarsità di infrastrutture per il trasporto ed il rifornimento lungo la rete stradale.

Capitolo 2

FUEL CELL VEHICLES

2.1 Vantaggi dei veicoli a celle a combustibile

La soluzione che propone di realizzare sistemi di propulsione basati sulle celle a combustibile appartiene all'ampia gamma di possibilità studiate per decarbonizzare e, allo stesso tempo, rendere più ecosostenibile e pulito il settore dei trasporti, ad oggi ancora pesantemente connesso a modalità di movimentazione basate su fonti fossili non rinnovabili, responsabili di emissioni inquinanti e climalteranti.

Le celle a combustibile costituiscono un sistema avanzato di conversione dell'energia chimica direttamente in energia elettrica, senza passare per lo stadio intermedio di energia termica, come invece avviene nei tradizionali cicli motore; infatti, con il passaggio per lo stadio intermedio di calore, il rendimento, in condizioni ideali, è limitato superiormente dal rendimento del ciclo di Carnot (in condizioni reali è decisamente inferiore a quest'ultimo), poichè il calore non può essere convertito integralmente in elettricità.

Il fatto che venga saltato il passaggio intermedio attraverso l'energia termica è perciò la ragione per cui questi sistemi presentano un rendimento globale di conversione maggiore; inoltre, quando, come nei cicli motore, si converte l'energia chimica in energia termica, si è costretti a passare dalla temperatura di reazione ad una temperatura tecnologicamente accettabile, solitamente molto inferiore alla prima e questo degrado dell'energia concorre a ridurre ulteriormente l'efficienza globale di conversione.

Una cella a combustibile (detta anche pila a combustibile) altro non è che un dispositivo elettrochimico che consente di ottenere energia elettrica, facendo reagire, tipicamente, idrogeno ed ossigeno, senza che avvenga alcun processo di combustione termica.

L'elemento fondamentale di un sistema a celle a combustibile è la singola cella, costituita da due elettrodi, un anodo e un catodo, separati da un elettrolita, che può essere un liquido, un solido costituito da una sottile membrana polimerica o ceramica.

All'interno della cella a combustibile avviene una reazione elettrochimica, in seguito alla quale nasce una forza elettromotrice, responsabile della rottura delle molecole di combustibile (idrogeno) e comburente (ossigeno), in ioni positivi ed elettroni; questi ultimi passando dall'anodo al catodo, attraverso un circuito esterno, generano corrente elettrica.

Il combustibile utilizzato è l'idrogeno, perchè facilmente ionizzabile. Esso, tuttavia, presenta una bassa densità energetica per unità di volume, motivo

per cui vanno previsti dei particolari sistemi di stoccaggio, come ad esempio serbatoi in pressione.

Sono stati studiati combustibili alternativi all'idrogeno, come per esempio il metanolo e l'acido formico; queste soluzioni tuttavia, sono in grado di produrre una potenza specifica decisamente inferiore rispetto all'idrogeno e hanno dunque avuto successo solamente nel campo dell'elettronica.

Attualmente i veicoli a celle a combustibile di ultima generazione alimentati ad idrogeno risultano sicuri, pratici, con un'elevata affidabilità e facili da guidare.

I vantaggi che essi offrono sono:

- elevata autonomia → dispongono di un serbatoio che con un pieno di carburante garantisce un'autonomia paragonabile a quella di un'auto a benzina delle stesse dimensioni;
- minimi tempi di rifornimento → a serbatoio vuoto il tempo richiesto varia tra i tre e i cinque minuti;
- guida silenziosa → la presenza di un motore elettrico, alimentato dall'energia elettrica prodotta dalle celle a combustibile, permette una riduzione significativa dell'inquinamento acustico;
- buone prestazioni;
- assenza totale di emissioni allo scarico → la reazione tra idrogeno e ossigeno fornisce come unico prodotto il vapore acqueo, che dunque è la sola sostanza emessa in atmosfera. In tal modo viene risolto il problema riguardante l'emissione di sostanze inquinanti e CO_2 durante la marcia del veicolo;
- possibilità di accumulare l'energia elettrica in eccesso in una batteria → ogniqualvolta il veicolo frena o rallenta, si ha un recupero di energia che viene poi accumulata nella batteria e permette un notevole risparmio di carburante;

Un confronto molto interessante è riportato in Smallbone et al. 2020, dove viene eseguito un paragone tra numerosi sistemi di propulsione. Tra le diverse soluzioni analizzate è significativo concentrarsi sul confronto tra quelle che, se si escludono sistemi di propulsione ibridi, sono le tre principali opzioni proposte attualmente dal mercato e che, con tutta probabilità, si troveranno a competere anche negli anni a venire.

Nell'articolo è presentato il caso di un mezzo pesante di massa pari a 7.5 tonnellate, con coefficiente di resistenza aerodinamica uguale a 0.7, sezione di ingombro frontale di 4.65 m², al quale è richiesta una autonomia di 500 km.

L'analisi effettuata dimostra che il sistema di propulsione fondato sull'utilizzo delle celle a combustibile fornisce per molti aspetti la migliore risposta alle specifiche richieste di questa particolare applicazione.

Come riportato anche nel paragrafo 1.2 il rendimento medio di un FCV è maggiore di quello di un convenzionale MCI alimentato Diesel, ma minore di quello di un BEV. Una diretta conseguenza di questo fatto riguarda la quantità di energia da stoccare per poter garantire una autonomia di 500 km, come previsto dall'applicazione considerata. Tale dato risulta inversamente proporzionale al rendimento medio del sistema di propulsione, infatti è pari a ~ 930 kWh per un MCI-DIESEL, ~ 300 kWh per un FCV e ~ 200 kWh per un BEV.

Un aspetto nel quale l'opzione FCV si rivela vincente rispetto alle altre due considerate, riguarda la massa dell'unità motrice e del serbatoio (contenente idrogeno nel caso di FCV e Diesel nel caso del MCI) o della batteria (nel caso del BEV), come riportato in tabella.

SISTEMA DI PROPULSIONE	MASSA UNITA' MOTRICE E SERBATOIO/BATTERIA [Kg]
MCI-DIESEL	~ 800
FCV	~ 500
BEV	~ 1300

Lo stesso vantaggio si può riscontrare anche se, invece della massa, si considera il volume occupato dall'unità motrice e dal sistema di accumulo dell'energia (serbatoio o batteria a seconda del sistema di propulsione considerato), come si può evincere dalla tabella sottostante.

SISTEMA DI PROPULSIONE	VOLUME UNITA' MOTRICE E SERBATOIO/ BATTERIA [l]
MCI-DIESEL	~ 1000
FCV	~ 500
BEV	~ 700

Un ulteriore vantaggio offerto dalle celle a combustibile utilizzate come tecnologia di propulsione per un mezzo pesante, riguarda le emissioni di CO₂ espresse in g/km. Non bisogna fare l'errore di pensare che, un FCV, non producendo emissioni dirette di anidride carbonica allo scarico, possa considerarsi un sistema a bilancio di CO₂ nullo; infatti, attualmente, gran parte della produzione, stoccaggio e trasporto dell'idrogeno è realizzato sfruttando fonti fossili non rinnovabili che comportano l'emissione di CO₂.

Nonostante ciò lo studio riportato in Smallbone et al. 2020 dimostra come, tra le tre possibilità, le minori emissioni di CO₂, si abbiano proprio con un sistema di propulsione basato sull'uso di celle a combustibile, come si può vedere dalla seguente tabella.

SISTEMA DI PROPULSIONE	EMISSIONI DI CO₂ [g/km]
MCI-DIESEL	~ 120
FCV	~ 50
BEV	~ 620

Un ulteriore vantaggio da non trascurare offerto dall'idrogeno è quello di essere il combustibile con il più alto contenuto di energia per unità di massa (3 volte più alto di quello della benzina), come si può notare dalla figura 2.1.

Esso presenta, tuttavia, un basso contenuto energetico per unità di volume, motivo per cui va compresso fino a valori di pressione molto elevati (700 bar); questo, ad oggi, è un problema che può essere risolto in modo agevole, mediante l'uso di semplici serbatoi in pressione da installare a bordo del veicolo.

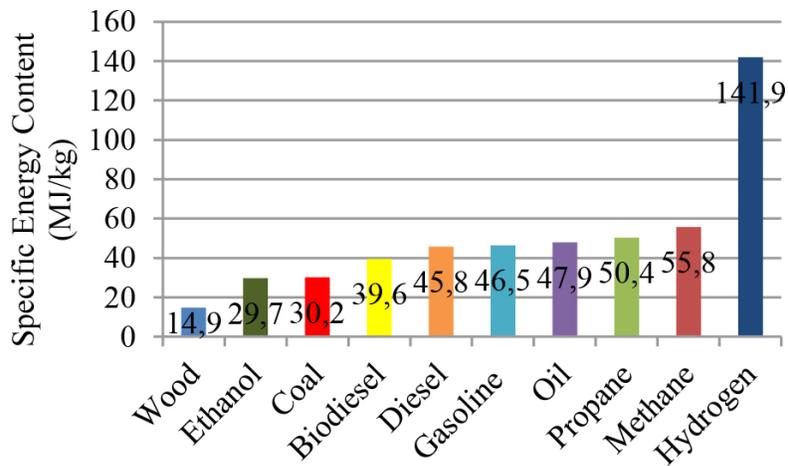


Figura 2.1: energia specifica di vari combustibili

La figura 2.2 mostra come, per bassi valori di autonomia, sia più conveniente, dal punto di vista del costo, un veicolo elettrico; tuttavia, la dimensione, la massa e il costo di una batteria aumentano enormemente all'aumentare dell'autonomia richiesta e questo fa sì che, l'andamento del costo di un veicolo elettrico, cresca molto rapidamente.

Un veicolo a celle a combustibile presenta invece un costo abbastanza alto anche per bassi valori di autonomia, ma poi cresce con un gradiente molto minore. Ciò fa sì che, attualmente, per un valore di autonomia elevato, sia più economico un FCV, rispetto ad un veicolo elettrico.

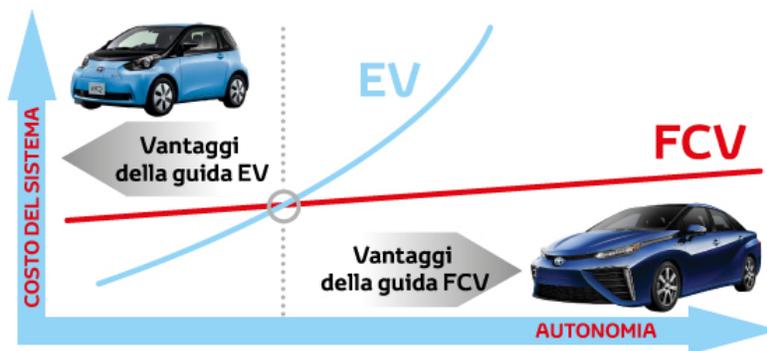


Figura 2.2: andamento del costo di un veicolo elettrico a batteria e di un veicolo con celle a combustibile al variare dell'autonomia richiesta

Grazie agli investimenti effettuati negli ultimi 15 anni e ai numerosi progetti di ricerca promossi e finanziati, sia da enti pubblici, che da aziende private, si è potuta raggiungere una significativa riduzione del costo delle celle a combustibile che, come riportato in Sinigaglia et al. 2017, è passato, in 10 anni, dai $124 \frac{\$}{kW}$ del 2006 ai soli $53 \frac{\$}{kW}$ del 2016, con prospettive di ulteriore diminuzione. Questo risultato è legato principalmente allo sviluppo di soluzioni per rendere gli elettrodi più performanti, ma soprattutto più duraturi; infatti, la durata di vita di una cella corrisponde attualmente a circa 200.000 km, un valore che rende la tecnologia alla base dei FCV sempre più competitiva.

2.2 Zero emissioni?

Sebbene la mobilità che fa uso dell'idrogeno possa apparire come totalmente pulita ed ecosostenibile, se si esegue un'analisi, che in inglese è denominata "well-to-wheel" (tradotto, "dal pozzo alla ruota"), ci si accorge che questo non è necessariamente vero. Questo tipo di studio permette di determinare l'impatto ambientale ed energetico del combustibile, non solo considerando le emissioni dirette allo scarico del veicolo, che per i FCV sono costituite solo da vapore acqueo (come mostrato in figura 2.3), ma anche tutto ciò che riguarda la sua produzione, il suo stoccaggio ed il trasporto.

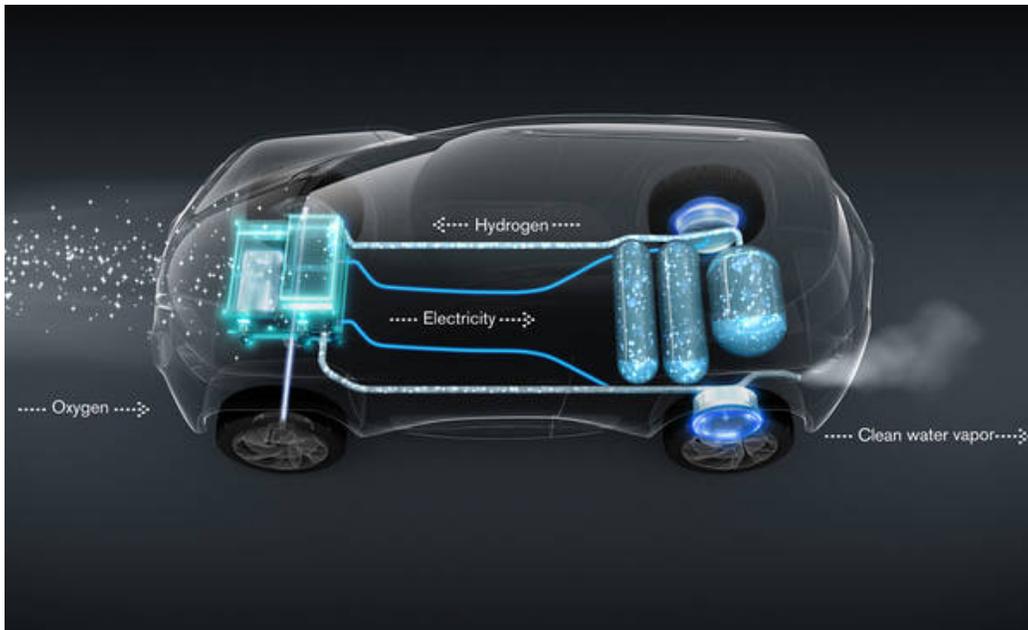
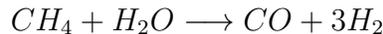


Figura 2.3: automobile a cella a combustibile

Come già anticipato nel paragrafo precedente, i veicoli a celle a combustibile non hanno un impatto nullo per quel che riguarda l'emissione di CO_2 in atmosfera. Infatti, pur essendo vero che un FCV non presenta emissioni inquinanti, nè di CO_2 durante la propria marcia, al giorno d'oggi, la quasi totalità dell'idrogeno (circa il 96%) è prodotta tramite operazioni di steam reforming che utilizzano principalmente metano, ma anche petrolio e carbone, tutte fonti fossili di energia non rinnovabili.

In realtà, come visto nella parte finale del paragrafo 1.4, l'idrogeno può essere prodotto in diversi modi; esso infatti, essendo l'elemento più diffuso in natura, è contenuto in un numero elevatissimo di composti, tuttavia, non sempre è ugualmente semplice ed economico estrarlo dalle sostanze in cui esso è contenuto.

Il processo di steam reforming che fa uso di metano è quello più utilizzato per la produzione industriale di idrogeno, poichè risulta il più efficiente per una produzione in grandi quantità ed il più economico; è costituito da una reazione tra metano e vapore acqueo che avviene ad una temperatura compresa tra i 700 °C e i 1100 °C (reazione endotermica). I prodotti della reazione sono idrogeno e monossido di carbonio, la cui miscela prende il nome di syngas.



Il calore richiesto per far avvenire la reazione viene solitamente generato bruciando dell'altro metano e liberando in tal modo CO₂.

Dell'ulteriore idrogeno può essere prodotto a partire dal monossido di carbonio, mediante la seguente reazione esotermica, detta reazione di spostamento del gas d'acqua:



Dall'analisi di queste reazioni chimiche, alla base della produzione industriale di idrogeno, risulta evidente come il processo per la sua estrazione a partire dagli idrocarburi, oltre ad utilizzare fonti fossili non rinnovabili, è responsabile della formazione sia di monossido di carbonio, che è una sostanza inquinante, sia di anidride carbonica.

Un'altra possibilità per produrre idrogeno, anche questa già citata alla fine del paragrafo 1.4, è tramite l'elettrolisi dell'acqua, un processo elettrolitico nel quale il passaggio di corrente elettrica causa la scomposizione dell'acqua in ossigeno ed idrogeno gassosi.



Anche in questo caso però, per poter affermare che la produzione di idrogeno e dunque anche l'utilizzo di un FCV, considerandone l'intero ciclo di vita, non determini emissioni di CO₂, è necessario che l'energia elettrica utilizzata per questo processo sia prodotta a partire da fonti rinnovabili, come per esempio l'energia solare, eolica o geotermica.

Ci sono anche altri metodi per produrre idrogeno che, pur essendo totalmente ecosostenibili, rinnovabili e puliti, ad oggi sono ancora in fase di sviluppo e non permettono una produzione di idrogeno sufficiente per consentire una commercializzazione su larga scala. Tali metodi fanno uso di particolari alghe in grado di produrre idrogeno con una sorta di fotosintesi o di batteri in grado di produrre idrogeno a partire da materia organica di scarto.

La scelta del miglior metodo per produrre H_2 richiede l'analisi di diversi criteri, tra cui i più importanti sono: il costo di produzione per unità di massa (€/kg), l'efficienza energetica del processo e il GWP (Global Warming Potential), che è un indice del contributo all'effetto serra rispetto a quello della CO_2 , preso come riferimento. La produzione a partire da fonti fossili tramite steam reforming è quella con il minor costo al chilogrammo e la maggior efficienza energetica, ma presenta anche il più alto GWP tra tutti i possibili processi produttivi; dall'altro lato, la produzione che si basa sull'utilizzo di materia organica ha un GWP prossimo allo zero, ma un costo al chilogrammo di H_2 prodotto decisamente più elevato.

Lo step da eseguire per rendere i veicoli a celle a combustibile realmente a zero emissioni consiste, contestualmente, nel continuare ad implementare e migliorare i metodi di produzione che utilizzano biomasse e materia organica di scarto, caratterizzati da un basso GWP, ma soprattutto, nell'abbandonare le operazioni di steam reforming che fanno uso dei combustibili fossili, per rimpiazzarle con l'elettrolisi che usufruisca però, esclusivamente di energia elettrica prodotta a partire da fonti rinnovabili. Inoltre, in un'ottica che considera l'intero ciclo di vita dell'idrogeno utilizzato in un veicolo a celle a combustibile, anche le operazioni di stoccaggio e trasporto andrebbero eseguite utilizzando energia pulita, proveniente da fonti rinnovabili.

Ad oggi, tutta la produzione di idrogeno in Danimarca proviene da fonti rinnovabili e l'adozione di questa tipologia "verde" di produzione è prevista anche in Germania e in altri paesi nei prossimi anni.

2.3 Problematiche per uno sviluppo massivo

L'idrogeno può essere considerato un vettore energetico ed in quanto tale, è in grado di veicolare l'energia da una forma all'altra; esso non può essere ritenuto una fonte energetica, poichè non è presente sulla terra in forma molecolare per poter essere utilizzato direttamente, ma va estratto dai composti che lo contengono, mediante quegli appositi processi citati nei paragrafi precedenti.

Il grande vantaggio offerto dall'idrogeno rispetto all'elettricità consiste nel poter essere utilizzato come "sistema di accumulo dell'energia" nel medio-lungo periodo; l'elettricità, infatti, una volta prodotta e trasmessa deve essere utilizzata e non può essere accumulata in nessun modo. Utilizzando l'idrogeno si ha un vantaggio anche rispetto alle batterie al litio, che non permettono l'accumulo di grandi quantità di energia, con tempi di scarica non superiori ai giorni¹.

L'idrogeno essendo un vettore energetico prevede, per poter essere utilizzato, diverse fasi:

- a) generazione a partire dalla fonte primaria;
- b) stoccaggio;
- c) trasporto;
- d) distribuzione;
- e) impiego finale.

Tralasciando le modalità di produzione dell'idrogeno a partire dalle fonti primarie in cui esso è contenuto, di cui si è già parlato, è significativo soffermarsi sulle fasi di stoccaggio, trasporto e distribuzione agli utenti per l'impiego finale.

Queste fasi hanno un costo che non è trascurabile e presentano ognuna diverse problematiche da affrontare.

Per quanto riguarda lo stoccaggio, il basso valore di energia per unità di volume dell'idrogeno, che comporta un elevato costo di trasporto, rende necessario non solo portarlo ad alta pressione, ma anche liquefarlo. La temperatura di liquefazione dell'idrogeno è molto bassa (circa $-259,2$ °C), perciò tale operazione richiede una grande quantità di energia per essere portata a termine. L'energia spesa in questa fase determina una diminuzione dell'efficienza globale da attribuire all'idrogeno.

¹Casalegno et al. 2018.

Una soluzione per ovviare a questo problema consiste nel trasportare sostanze liquide contenenti idrogeno, come il metanolo o l'ammoniaca e provvedere poi all'estrazione dell'idrogeno da questi composti in loco, attraverso apposite stazioni di decomposizione². Tale opportunità resta comunque applicabile solo nel caso in cui la quantità di idrogeno richiesta dagli utenti sia piuttosto bassa.

Il trasporto può avvenire in due modi: con l'idrogeno in forma liquida (movimentato su gomma o su rotaia) oppure in forma gassosa mediante un sistema di tubazioni, come avviene per il metano. Quest'ultima soluzione di trasporto è economicamente più conveniente sulle lunghe distanze, ma per l'idrogeno non risulta efficiente come lo è per il gas naturale, poiché per poter mantenere contenuto il costo è necessaria una domanda stabile, cosa che per l'idrogeno ancora non si verifica continuamente, o quantomeno non agli stessi livelli del metano. L'opzione del trasporto in forma liquida è invece vantaggiosa sulle medio-piccole distanze.

L'alternativa per non dover fronteggiare tutti i problemi di costi e infrastrutture legati a stoccaggio, trasporto e distribuzione è rinunciare alla produzione centralizzata dell'idrogeno, che tuttavia permette di mantenere contenuti i costi di produzione, per la possibilità di poter usufruire di attrezzature e impianti più costosi, ma anche più efficienti, e optare per una produzione dell'idrogeno decentralizzata, che provveda a generarlo in loco mediante stazioni che operano steam reforming o elettrolisi su piccola scala. In particolare, la produzione sul posto mediante elettrolisi a partire da fonti rinnovabili, come l'energia solare o quella eolica, non solo consente di aggirare tutti gli ostacoli legati ai costi e alla mancanza di infrastrutture che si avrebbero nel caso di una produzione centralizzata, ma soprattutto azzerare le emissioni inquinanti e climalteranti a partire dalla produzione fino ad arrivare alla distribuzione, rendendo l'idrogeno realmente una forma energetica a zero emissioni.

Nonostante i tanti passi in avanti fatti dalla tecnologia che fa uso delle celle a combustibile, rimane dunque un grande problema, non trascurabile: la questione infrastrutture. Infatti, sebbene il livello tecnologico raggiunto da un FCV sia tale da permettere una guida sicura e con buone prestazioni, la quasi totale assenza di una fitta rete di infrastrutture per lo stoccaggio, ma soprattutto per il trasporto e la distribuzione dell'idrogeno, pongono questo tipo di veicolo un passo indietro, soprattutto rispetto ai Motori a Combustione.

²Agbossou et al. 2007.

stione Interna, che possono fare affidamento su un sistema di fornitura ed erogazione ormai altamente radicato in tutto il territorio, ma anche ai veicoli elettrici che possono cominciare a contare su un insieme di infrastrutture in costante crescita.

Oltre ad assicurare una presenza capillare, è importante che i punti di servizio per il rifornimento siano ubicati in posizioni strategiche, in grado di servire le principali città e le principali strade di collegamento.

Nella figura 2.4 sono riportati alcuni numeri che fanno comprendere lo sforzo attuato da alcuni paesi per implementare e accrescere lo sviluppo di una mobilità ad idrogeno.

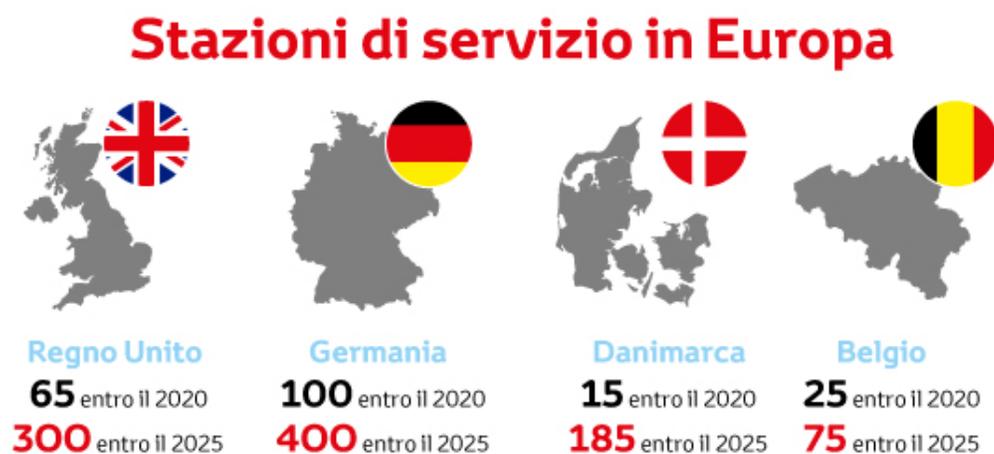


Figura 2.4: stazioni di servizio nei paesi europei in prima linea per lo sviluppo della mobilità ad idrogeno

Affinchè l'impegno di alcuni paesi possa portare a risultati significativi nella commercializzazione di questi veicoli, è necessario che anche le restanti nazioni investano per promuovere lo sviluppo di un numero sempre più considerevole di stazioni; infatti, se la mobilità ad idrogeno dovesse rimanere un fenomeno locale, confinato solo in alcuni territori, oltre a non raggiungere le aspettative desiderate per quel che riguarda l'impatto ambientale di questa modalità di movimentazione, potenzialmente a zero emissioni, essa sarà destinata in breve tempo ad essere abbandonata e ciò vorrebbe dire, non solo non aver sfruttato a pieno il potenziale di una risorsa energetica molto promettente, ma anche aver sprecato tempo ed ingenti risorse finanziarie.

Negli ultimi anni le case automobilistiche stanno sempre più di frequente abbandonando i progetti volti allo sviluppo dei veicoli con celle a combustibile, per dedicare le proprie risorse alla produzione di veicoli elettrici a batteria; la già citata scarsità di infrastrutture per l'idrogeno e decisioni politiche mirate a favorire la crescita di un mercato basato sull'elettrico, hanno costretto numerose aziende a dover rinunciare ad alcuni progetti nati e pensati negli anni passati, perchè ad oggi non garantirebbero un ritorno economico tale da giustificare l'investimento.

Nonostante ciò, i potenziali vantaggi offerti dall'idrogeno al settore energetico, come la flessibilità e la possibilità di appianare i picchi di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, la capacità di fungere da elemento di congiunzione tra il settore del gas e quello dell'energia elettrica e soprattutto l'opportunità di poter impiegare l'idrogeno in settori diversi da quello dei trasporti, come l'industria pesante (chimica e siderurgica), il campo del riscaldamento domestico, potrebbero garantire la diffusione di una rete di infrastrutture che porrebbe anche il settore automotive nella condizione di poterne beneficiare.

Rispetto anche solo a pochi anni fa, grazie ad un ampliamento dell'orizzonte tecnologico, il costo di tutte le operazioni legate a produzione, stoccaggio e trasporto dell'idrogeno è drasticamente diminuito e, se il trend dovesse rimanere lo stesso, è ragionevole supporre che entro breve possa divenire realmente competitivo sul mercato dei combustibili.

Come sempre, molto dipenderà dalle scelte che verranno fatte a livello politico e se, effettivamente, si propenderà per un suo largo impiego, rendendolo in tal modo uno dei protagonisti della transizione energetica da fonti fossili a fonti rinnovabili, che sta avendo luogo in tutto il pianeta.

2.4 Possibili ambiti di utilizzo

La tecnologia basata sulle celle a combustibile può essere utilizzata in diverse applicazioni nel campo della movimentazione e del trasporto di merci e persone; i veicoli alimentati a idrogeno mediante celle a combustibile sono in grado di offrire autonomie maggiori rispetto a quelle garantite da veicoli elettrici a batteria, rappresentando quindi la soluzione ideale per automobili, camion, autobus e, in generale, tutti i veicoli che necessitano di percorrere lunghe distanze.

L'orizzonte applicativo più vasto è sicuramente quello riguardante l'autotrazione, ma ad oggi esistono soluzioni, alcune delle quali solo a livello prototipale, per quasi tutte le tipologie di trasporti, compresi treni, barche ed aeromobili.

Numerosi sono gli esempi di autoveicoli a celle a combustibile realizzati da case automobilistiche, alcune di esse tra le più importanti al mondo, come Toyota e Hyundai, le quali hanno scommesso negli ultimi anni su questa nuova frontiera di movimentazione.

Nonostante il grande impegno da parte di queste aziende per garantire agli utilizzatori una rete di infrastrutture esauriente, il livello attualmente raggiunto non assicura un servizio ancora del tutto soddisfacente e ciò rende le automobili a celle a combustibile tuttora un bene di nicchia, al momento non predisposto per una commercializzazione su larga scala, ma solo per specifici segmenti di mercato (le ragioni sono riportate nel paragrafo 2.3).

Da questo punto di vista per gli autobus si può fare un discorso diverso, infatti non è un caso che questi mezzi di trasporto siano quelli che, fino ad ora, hanno avuto più successo in termini di unità prodotte e di servizi resi. Il grande vantaggio che possiedono gli autobus, in particolare quelli che eseguono tratte urbane ma anche extraurbane, purchè siano percorsi sistematici e ripetuti nel tempo, rispetto alle automobili, è proprio legato alla possibilità di poter centralizzare il sistema di rifornimento, posizionando stazioni in punti strategici, determinati in base ai percorsi che i diversi mezzi devono effettuare. Questo permette di poter realizzare una rete di infrastrutture meno fitta, dunque meno costosa, ma comunque funzionale all'applicazione considerata.

Nel 2018 erano già più di 450 gli autobus presenti tra Stati Uniti, Europa, Giappone e Cina e si prevede che tale flotta supererà le 20.000 unità entro il 2030 (Casalegno et al. 2018).

Per la medesima opportunità di poter centralizzare il sistema di rifornimento, disponendo le stazioni in punti strategici di determinate rotte commerciali, anche il settore del trasporto merci su gomma è tra quelli che può beneficiare maggiormente della tecnologia a celle a combustibile. In particolare, un tipo di trasporto che può facilmente trarne giovamento è quello effettuato da mezzi pesanti, che eseguono tratte alle cui estremità si trovano dei porti, poichè in tali luoghi è semplice poter instaurare delle stazioni comode sia dal punto di vista dell'utente finale, sia perchè, se dell'idrogeno allo stato liquido viene trasportato via mare, non deve essere spostato ulteriormente verso altre località, ma può essere subito utilizzato per rifornire i camion.

Più in generale, qualsiasi applicazione che prevede percorsi regolari nel tempo e nello spazio, con la conseguente possibilità di agevolare il rifornimento centralizzando l'approvvigionamento di idrogeno, rappresenta una valida fascia di mercato per le celle a combustibile.

A tal proposito ambiti interessanti di sviluppo che già si avvalgono di questa tecnologia sono i veicoli da cantiere, i trattori portuali, quelli agricoli ed i mezzi per lo spostamento di merci e persone da utilizzare anche in ambienti chiusi.

Quest'ultima categoria di veicoli unita ai carrelli elevatori per applicazione indoor, costituisce una frontiera molto interessante per tre motivi:

1. non producendo emissioni inquinanti, ma solo vapore acqueo, sono particolarmente indicati nel caso di utilizzo al chiuso, permettendo di mantenere una qualità dell'aria accettabile;
2. possono essere utilizzati anche all'interno di magazzini frigoriferi, in quanto le prestazioni non sono influenzate dalla bassa temperatura dell'aria;
3. un pieno di idrogeno viene effettuato in pochi minuti, garantisce un funzionamento continuativo fino ad 8 ore e l'aspettativa di vita di questi mezzi varia tra gli 8 e i 10 anni.

Gli ultimi anni hanno visto nascere anche i primi treni mossi da sistema Fuel Cell. Nel settembre 2018 è entrato in funzione il primo esemplare in Europa, avente un'autonomia pari a 1000 km con un pieno di idrogeno, del tutto paragonabile a quella di un treno Diesel.

Come la Germania, anche i Paesi Bassi, il Regno Unito e altri paesi, stanno progettando e lanciando diversi altri prototipi di treni a celle a combustibile; il motivo principale è legato alla necessità di una transizione graduale dai treni Diesel, ancora largamente diffusi ed utilizzati, ad un'opzione più pulita ed ecosostenibile, come quella che utilizza l'idrogeno, senza dover necessariamente elettrificare tutta la linea, operazione logisticamente pesante ed economicamente costosa³.

In campo aeronautico, a partire dai primi anni 2000 sono state realizzate diverse prove e sperimentazioni su velivoli alimentati da un sistema a celle a combustibile. Per i prototipi realizzati però non si è provveduto alla commercializzazione; oggi, in ambito aeronautico, le celle a combustibile sono impiegate perlopiù per fornire alimentazione di potenza ausiliaria nel caso di un eventuale richiesta di potenza extra, piuttosto che come fonte primaria. Anche questo tipo di applicazione può comunque contribuire a ridurre le emissioni di CO₂, sostanze inquinanti e rumore di cui il traffico aereo è responsabile.

Nei prossimi anni è prevista l'introduzione sul mercato di aeromobili dotati di un sistema di propulsione basato interamente o solamente in parte sulle celle a combustibile; la possibilità di poter disporre le stazioni di approvvigionamento negli aeroporti e dunque poter centralizzare il sistema di rifornimento, rende teoricamente più agevole la conquista di una porzione importante di mercato da parte di questa tecnologia, rispetto al settore prettamente automobilistico.

Se nel settore dei trasporti le celle a combustibile possono ricoprire un ruolo di grande importanza nei prossimi anni, lo stesso vale anche per applicazioni stazionarie, infatti l'energia richiesta dagli edifici residenziali e dalle industrie è di gran lunga maggiore di quella consumata dai trasporti.

Una soluzione interessante è rappresentata da sistemi cogenerativi con celle a combustibile alimentate ad idrogeno atti a produrre energia elettrica e termica.

Per sfruttare appieno in tutti i campi possibili l'enorme potenziale dell'idrogeno, sarà tuttavia necessario che i Governi ed i policy makers prendano in seria considerazione questa soluzione, sia in termini economici che tecnici, creando un contesto che sostenga concretamente lo sviluppo di questo settore.

³TOGREEN 2019.

Capitolo 3

BATTERY ELECTRIC VEHICLES

3.1 Benefici e criticità

Nell'ottica di una transizione che rispetti l'ambiente per quanto riguarda l'esteso e diversificato settore dei trasporti, stanno assumendo sempre più importanza i veicoli elettrici a batteria.

Questo sistema di propulsione ha potuto beneficiare negli ultimi anni delle innumerevoli politiche economiche, fatte di incentivi e finanziamenti, provenienti sia dal comparto pubblico che da quello privato e ciò ha contribuito ad una sua crescita esponenziale; in pochi anni è passato dall'essere una futuristica modalità di trasporto, a costituire una concreta realtà, ormai diffusa in tutto il mondo, pronta a competere, non solo con i tradizionali sistemi di propulsione, ma con tutte le innovative forme di circolazione che verranno pensate per diminuire l'impatto ambientale dei trasporti.

Come anticipato, la principale motivazione per cui la mobilità elettrica sta avendo così tanto successo è da attribuire alla mancanza di emissioni inquinanti e climalteranti imputabili alla marcia di un veicolo elettrico a batteria. Allo stesso tempo, la totale assenza di emissioni allo scarico e l'apparente ecosostenibilità dei veicoli elettrici rischiano però di oscurare il problema principale, che non viene risolto semplicemente elettrificando i trasporti; infatti, se l'energia elettrica è prodotta a partire da fonti fossili non rinnovabili, si ha semplicemente una traslazione dell'emissione di CO₂ dalla fase di marcia del veicolo al momento in cui viene prodotta l'energia elettrica. I dati come quelli riportati nel paragrafo 2.1, in cui si fa riferimento ad un mezzo pesante (ma lo stesso vale anche per le automobili e altri mezzi), mostrano che nell'intero ciclo di vita le emissioni di CO₂ espresse in g/km, nel caso di un veicolo elettrico a batteria, sono di gran lunga superiori a quelle di un convenzionale veicolo dotato di Motore a Combustione Interna.

La crescente attenzione verso questa tipologia di veicoli ed il loro sempre maggior successo non devono dunque distogliere l'attenzione dal problema principale e sicuramente più impellente, che riguarda l'adozione di sistemi che utilizzino fonti rinnovabili ed ecocompatibili per la produzione di energia, in questo caso elettrica, ma più in generale di qualsiasi forma in cui essa sia necessaria.

Come riportato in Reitz et al. 2020, uno studio della società BP plc, azienda del Regno Unito operante nel settore energetico, ha previsto che entro il 2040 solamente il 14 % dell'energia globalmente richiesta sarà prodotta a partire da fonti rinnovabili e di questo 14 % la maggior parte della produzione sarà concentrata in circoscritte regioni virtuose che avranno avuto il merito

di investire sull'energia rinnovabile, mentre nella restante parte del mondo i combustibili fossili, incluso il carbone, continueranno ad essere la fonte energetica principale.

Risulta dunque evidente che i veicoli elettrici a batteria non possono, autonomamente, risolvere il problema legato all'emissione di gas serra, ma solo una transizione verso tecnologie di produzione dell'energia a bilancio nullo di CO₂ può far fronte alla situazione attuale.



Figura 3.1: la mobilità elettrica come trampolino per un'energia sempre più "verde"

Benefici

Numerosi sono i vantaggi che derivano dallo sviluppo e dall'utilizzo di veicoli elettrici a batteria, alcuni dei quali sono già stati accennati.

I più importanti sono:

- assenza di emissioni allo scarico, specialmente di sostanze inquinanti che presentano un impatto locale cioè contribuiscono, data la loro tossicità, a peggiorare la qualità dell'aria e la salute della popolazione nella zona in cui vengono emesse;
- maggior rendimento totale del motore rispetto alle restanti modalità di propulsione;

- recupero dell'energia cinetica in fase di decelerazione e maggior durata dei freni grazie alla frenata rigenerativa;
- riduzione notevole dell'inquinamento acustico riconducibile ai trasporti;
- buone prestazioni offerte, in particolare ottima accelerazione;
- minor numero di componenti e di parti in movimento nel motore con conseguente riduzione della richiesta di manutenzione periodica;
- minor costo dell'energia elettrica (costo oscillante tra i €0.20 e €0.30 per kilowattora) rispetto a quella di origine fossile (benzina, diesel, metano...);
- i liquidi necessari al funzionamento del motore elettrico vengono cambiati meno frequentemente rispetto ad un convenzionale veicolo dotato di MCI;
- vantaggi di tipo "amministrativo", grazie alle politiche promosse dai governi per favorire la mobilità elettrica, come la possibilità di non pagare il bollo per i primi 5 anni e di pagare una quota ridotta nei successivi periodi, il libero accesso alle Zone Traffico Limitato (ZTL) e l'opportunità di ricevere Ecobonus, cioè incentivi per l'acquisto di auto nuove, la cui entità varia in base al grado di ecologia del veicolo;
- rete di distribuzione parzialmente già presente sul territorio per via dell'ampio utilizzo dell'elettricità in svariati altri settori e infrastrutture per servizi di ricarica in costante crescita per quel che riguarda lo specifico campo della mobilità elettrica;
- convenienza in tratti urbani trafficati ad andatura ridotta rispetto ai MCI che, nelle stesse condizioni, presentano un rendimento molto più basso.

Criticità

Nonostante i tanti passi in avanti fatti in pochissimo tempo dai veicoli elettrici a batteria, essi presentano ancora diversi punti deboli su cui lavorare per completare il percorso di crescita e rendere questi veicoli realmente competitivi su tutti i fronti.

Gli svantaggi che ancora oggi ostacolano un BEV sono:

- l'elevato valore di CO₂, espressa in g/km, da attribuire ad un veicolo elettrico considerandone l'intero ciclo di vita, per via della produzione di energia elettrica in centrali che sfruttano combustibili di natura fossile;
- costo d'acquisto complessivo del veicolo ancora elevato rispetto a quello dei modelli endotermici tradizionali;
- elevato costo della batteria che può arrivare a rappresentare fino ad 1/3 del costo totale di un'automobile elettrica;
- valori garantiti di autonomia non ancora del tutto soddisfacenti e conseguente aumento notevole del peso e dello spazio occupato dalla batteria all'aumentare dell'autonomia richiesta;
- minor convenienza in situazioni di traffico scorrevole ad andatura costante o sostenuta ed in generale nel caso di lunghe distanze da percorrere;
- implicazioni ambientali e sociali nei processi di estrazione dei minerali (cobalto, litio, terre rare . . .) alla base della produzione delle batterie e dei motori elettrici. Tali operazioni, svolte perlopiù nel sud del Mondo, oltre a richiedere una grande quantità di energia necessitano anche di acqua in abbondanza;
- necessità di smaltimento delle batterie per le quali, contenendo sostanze chimiche nocive per l'uomo e per l'ambiente, vanno previsti particolari trattamenti che ne permettano l'eliminazione o una sorta di riutilizzo;
- tempo di ricarica generalmente superiore alla durata di un rifornimento per MCI e FCV;
- inadeguatezza dell'attuale rete di infrastrutture che, per quanto soggetta ad un processo di continua crescita, non è ancora pronta per garantire e soddisfare le esigenze che si avrebbero nel caso in cui i veicoli elettrici a batteria conquistassero la maggior parte del mercato, com'è previsto accada nei prossimi anni.

Il grande impegno profuso in questi anni in ricerca e sviluppo sta contribuendo a migliorare e rendere sempre più convenienti i veicoli puramente elettrici, motivo per cui è ragionevole pensare che gran parte delle criticità verranno presto superate, soddisfacendo così tutti i requisiti necessari per rendere questa tipologia di veicoli pienamente idonea a dominare il mercato.

3.2 Prospettive di diffusione

Recentemente il calo dei costi delle batterie, dovuto essenzialmente ai maggiori fondi investiti nella ricerca in questo ambito ed il conseguente aumento del numero di veicoli elettrici a batteria in circolazione, ha portato sempre più case automobilistiche a concentrarsi su questa innovativa tipologia di veicolo, abbandonando, completamente o solo in parte, i restanti progetti, tra i quali quelli comprendenti la realizzazione di auto dotate di un sistema a celle a combustibile, alimentate ad idrogeno.

Ad oggi, oltre al ruolo giocato dalle decisioni prettamente politiche che continuano a favorire la diffusione di un sempre più ampio mercato dell'elettrico, bisogna riconoscere che, complessivamente, i veicoli elettrici a batteria risultano più efficienti delle restanti categorie di mezzi, non solo considerando unicamente il rendimento totale del motore, che per altro risulta decisamente superiore a tutti i restanti sistemi di propulsione, ma anche valutando l'intero processo che comprende la fase di produzione dell'energia, la sua distribuzione ed il suo impiego finale. A tal proposito, tralasciando la fase di produzione dell'energia elettrica, che pure risulta meno dispendiosa a livello energetico rispetto alla produzione di idrogeno, anche considerando semplicemente le fasi di stoccaggio, trasporto e distribuzione di idrogeno all'utente finale, queste costituiscono operazioni, attualmente, decisamente meno efficienti rispetto al trasporto di energia elettrica ed alla ricarica delle batterie utilizzando la rete pubblica.

Il primo esemplare di veicolo con sistema di guida elettrico a batteria è comparso nel 1997 con la Toyota Prius, un veicolo ibrido che tuttavia non poteva essere ricaricato sfruttando la rete elettrica; questo evento è stato seguito nei primi anni 2000 dalla creazione di Tesla Motors, il cui obiettivo era accelerare l'adozione da parte dei consumatori di veicoli elettrici. Negli anni seguenti qualche altra casa automobilistica ha mostrato interesse verso questa nuova frontiera di veicoli, facendo un ulteriore step importante con l'introduzione di veicoli ibridi plug-in. Nonostante ciò, per diversi anni la domanda dei consumatori si è mantenuta piuttosto bassa, principalmente per i costi elevati, la bassa autonomia garantita da questi veicoli, la mancanza di una rete di infrastrutture adeguata per la ricarica delle batterie e il tanto tempo necessario per l'operazione stessa di ricarica.

La grande inversione di tendenza è avvenuta quando, a partire dagli ultimi anni, temi come quello dell'impatto ambientale e dei cambiamenti climatici hanno portato gran parte delle nazioni più potenti al mondo a prendere prov-

vedimenti per cercare di arginare i problemi dovuti all'utilizzo di combustibili fossili, all'emissione di gas serra e di sostanze inquinanti. In tal senso la mobilità elettrica è stata vista come una delle possibili vie per ridurre l'effetto nocivo del settore dei trasporti sull'ambiente; eppure, come già detto e come riportato anche in Romejko et al. 2017, l'adozione dei veicoli elettrici, se si prende in considerazione l'intero ciclo di vita del prodotto, non contribuisce necessariamente a ridurre l'emissione di gas serra se l'elettricità non deriva da fonti rinnovabili, ma può e deve essere un punto di partenza per facilitare la transizione energetica che, nei prossimi anni, dovrebbe portare ad abbandonare l'utilizzo di fonti fossili non rinnovabili, per proiettarsi verso quelle forme di energia pulite e soprattutto rinnovabili, fondamentali per preservare il pianeta.

In Romejko et al. 2017 sono anche riportati diversi studi nei quali le previsioni per il 2025 mostrano tutte una netta diminuzione di emissioni inquinanti in seguito ad una sempre maggior adozione di veicoli elettrici. In queste analisi vengono considerate sia la fase di produzione delle batterie, che la generazione di energia elettrica, segno che, se le premesse per una maggior ecosostenibilità ed ecocompatibilità dovessero venir finalizzate, il vantaggio che ne deriverebbe non sarebbe solo ambientale, ma anche economico, viste le ingenti somme che ogni anno sono destinate alla sanità per curare malattie, direttamente o indirettamente, causate dall'inquinamento dell'aria; quando si parla di emissioni inquinanti ci si riferisce a sostanze nocive con impatto locale, ovvero influiscono solamente sulla salute delle persone che abitano nelle zone in cui tali elementi vengono emanati. Non vanno confuse le sostanze inquinanti con quelle climalteranti, come la CO₂ e gli altri gas serra, che invece danno un contributo al surriscaldamento della terra ed il cui effetto agisce a livello globale, prescindendo dal luogo di emissione.

Nell'articolo Joshi 2020 sono riportate varie analisi aventi l'anno 2030 come orizzonte temporale; tali studi prevedono uno scenario nel quale, entro tale data, i veicoli puramente elettrici costituiranno una quota del mercato automobilistico che oscilla tra il 20 % e il 30 %. Nella figura 3.2 sono riportati alcuni numeri che consentono di mettere in evidenza in maniera ancora migliore le prospettive di crescita dei veicoli elettrici nei principali mercati mondiali.

La diffusione dei veicoli elettrici a batteria è agevolata dalla presenza sul mercato dei veicoli ibridi che, ad oggi, sono già sufficientemente performanti, affidabili e pratici, vista la possibilità di poter utilizzare indistintamente sia il motore elettrico che quello termico con tutti i vantaggi che l'uno e l'altro

	2017	2020	2025	2030
Cina	1.2	4.0	20.5	73.7
Europa	0.8	1.5	9.5	45.4
USA	0.5	2.2	11.3	45.0
TOTALE	2.5	7.6	41.2	164.0

Fonte: elaborazione Osservatorio Autopromotec su dati PwC

Figura 3.2: scenario di diffusione del parco circolante di auto elettriche al 2030 nei principali mercati mondiali (in milioni di unità)

comportano; in questo modo l'elettrificazione del mercato risulta graduale permettendo di costruire progressivamente le infrastrutture che diventeranno indispensabili dal momento in cui i veicoli puramente elettrici saranno realmente pronti per una commercializzazione di massa.

Un altro aspetto interessante che può contribuire a rendere meno brusco l'impatto dell'elettrico sul mercato è costituito dalla soluzione che, per poter aumentare l'autonomia del veicolo, utilizza un Range Extender System, ovvero un generatore di energia elettrica alimentato da un motore a combustione interna di dimensioni ridotte. A differenza di quanto accade in un veicolo ibrido, nel quale il motore termico garantisce trazione alle ruote, la tecnologia che utilizza un Range Extender si differenzia per il fatto che il motore termico alimentato con un tradizionale combustibile fossile, contenuto in un serbatoio di capacità ridotta, non è collegato alle ruote, ma solamente al generatore di bordo attraverso il quale può essere ricaricata la batteria del veicolo. Questo sistema permette di aumentare l'autonomia di un veicolo elettrico consumando una quantità modesta di combustibile e generando emissioni limitate, ma fornisce il grande pregio di poter equipaggiare il mezzo con una batteria più piccola, dunque meno pesante, a tutto vantaggio dell'energia necessaria per movimentare il veicolo. Il secondo beneficio consiste nel permettere l'introduzione sul mercato di veicoli elettrici che, in tal modo, offrono una autonomia accettabile e soprattutto, come avviene per i veicoli ibridi, permettono la crescita graduale delle infrastrutture necessarie al trasporto elettrico, nell'attesa che, tramite studi e ricerche, vengano messe a punto delle batterie sempre più performanti, leggere e capaci di immagazzinare energia nel minor spazio

e con la minor aggiunta di peso possibile.

Per massimizzare la crescita e lo sviluppo dei veicoli elettrici sta diventando sempre più comune l'impiego di software di simulazione e modellazione che creano veicoli virtuali attraverso particolari sistemi di testing avanzati che utilizzano dati raccolti da veicoli in strada.

Trascurando per il momento il discorso inerente alle batterie, che verrà trattato a parte nel successivo paragrafo vista l'importanza che ricopre, ci sono diversi altri componenti su cui lavorare per garantire una diffusione dei veicoli elettrici sempre più ampia. Di tali dispositivi, che costituiscono il sistema di guida elettrico i più importanti sono il motore elettrico, l'inverter, il DC/DC converter e l'on-board charger. I punti da seguire per migliorare a livello globale l'intero Electric Drive System sono:

1. ridurre costo, peso e volume;
2. migliorare performance, efficienza ed affidabilità;
3. sviluppare sistemi modulari, da attivare solo all'occorrenza, che permettano di risparmiare energia quando possibile;
4. migliorare le fasi di realizzazione dei componenti, in particolare lavorare sul ciclo di produzione, riducendo tempi e costi e velocizzandone così l'introduzione sul mercato.

Un ambito sul quale si stanno concentrando parecchi ricercatori consiste nello sviluppo di materiali innovativi, da usare per il motore e per tutti i componenti che costituiscono il sistema di guida elettrico, in modo tale che, oltre a permettere la sostituzione dei materiali attuali, riducendo il costo complessivo dei veicoli, consentano anche di superare i limiti di quelli attualmente impiegati, migliorandone le prestazioni¹.

Un esempio può essere il caso dei semiconduttori utilizzati in alcuni dispositivi come gli inverter; attualmente vengono impiegati semiconduttori a base di Silicio, ma si stanno mettendo a punto dei nuovi semiconduttori detti a banda larga ("Wide Band Gap Semiconductors"), che rispetto a quelli comunemente usati possono operare a temperature maggiori riducendo i costi complessivi del sistema, essendo sufficiente un Thermal Management System meno elaborato per mantenere le temperature di esercizio entro livelli ammissibili.

¹U.S.Department of Energy 2020c.

Un altro campo di ricerca che sta attirando grande attenzione è quello riguardante lo studio di soluzioni alternative all'uso delle terre rare nei motori elettrici. Numerosi sono i progetti aventi come obiettivo l'introduzione di soluzioni innovative sia dal punto di vista dei materiali, sia da quello propriamente strutturale.

3.3 Il futuro delle batterie

Quando si parla di veicoli elettrici, il componente sicuramente più critico e sul quale vengono investite le maggiori risorse è la batteria. A partire dal momento in cui i primi veicoli elettrici hanno cominciato ad affacciarsi sul grande mercato dei trasporti sono stati fatti numerosi passi in avanti e molteplici sono state le variazioni apportate a questo dispositivo elettrochimico. Grazie al grande lavoro di ricerca svolto da scienziati e studiosi di tutto il mondo, ad oggi, il livello tecnologico raggiunto dalle batterie destinate ad applicazioni legate all'autotrazione garantisce ai veicoli elettrici prestazioni accettabili in termini di autonomia; tuttavia, per assicurare una diffusione ancor maggiore di questa tipologia di veicoli sono necessari ulteriori perfezionamenti. In particolare i punti su cui ancora è necessario uno step importante e su cui la ricerca continua a concentrare i propri sforzi sono:

- riduzione del costo → il costo della batteria è quello che più impatta sul costo totale di un veicolo elettrico e riducendo tale voce si rendono questi veicoli sempre più economici e dunque competitivi sul mercato;
- aumento dell'energia immagazzinabile per unità di massa e per unità di volume → con una batteria dello stesso peso e che occupa lo stesso spazio aumenta l'autonomia del veicolo, essendo maggiore l'energia immagazzinata a bordo oppure, a parità di autonomia, la batteria occupa meno spazio e ha un peso minore permettendo un aumento di efficienza, comfort e guidabilità del veicolo;
- riduzione del tempo di ricarica → è un aspetto fondamentale dal punto di vista degli utilizzatori finali per allineare tale tecnologia ai restanti mezzi dotati di MCI o di sistema con celle a combustibile, per i quali i tempi di rifornimento sono decisamente inferiori rispetto al tempo di ricarica della batteria;
- aumento della durata di vita della batteria → nell'ottica di valutare la convenienza di investire in un veicolo elettrico a batteria piuttosto che in un veicolo con un'altra tecnologia di propulsione, risulta svantaggioso dover sostituire la batteria essendo il componente di gran lunga più costoso;

Bisogna sottolineare come il grande interesse nello sviluppo della mobilità elettrica, testimoniato e confermato dal numero dei veicoli immatricolati co-

stantemente in crescita ogni anno, ha fatto sì che i progressi, sia dal punto di vista tecnologico delle prestazioni, che da quello economico della riduzione dei costi, siano andati decisamente oltre le aspettative e per questo motivo, se la tendenza dovesse continuare a rimanere tale è ragionevole supporre che entro pochi anni la maturità e l'economicità delle batterie renderanno i veicoli elettrici la modalità di trasporto prediletta in assoluto.

Per rendersi conto di questa rapida evoluzione e apprendere quali siano stati gli aspetti su cui si è lavorato maggiormente, quali ancora sono gli ostacoli e che tipo di soluzioni si sono adottate, comprendendo così a fondo l'evoluzione di questi dispositivi e provando ad immaginare cosa aspettarsi dal futuro, può essere interessante analizzare i vari tipi di batterie che si sono succeduti nel tempo, mettendo in evidenza per ogni modello il punto debole dalla cui ottimizzazione si è potuti giungere al prototipo seguente.

I fattori che guidano nella scelta di una batteria per veicoli elettrici sono:

1. energia specifica della singola cella [$\frac{Wh}{kg}$];
2. energia per unità di volume della singola cella [$\frac{Wh}{l}$]
3. potenza specifica [$\frac{W}{kg}$]
4. costo [$\frac{\$}{kWh}$];
5. durata di vita (in inglese "lifetime") espressa in numero di cicli ²;
6. livello di sicurezza
7. tasso di autoscarica [%]³

Le caratteristiche di ciascuna batteria dipendono dagli elementi chimici contenuti al suo interno, così come l'intervallo di temperature da mantenere per garantire una vita sicura e durevole alla batteria.

Negli ultimi anni un concetto molto importante è diventato quello del "second-life battery", cioè il garantire una "seconda vita" alla batteria, la

²nel campo dei veicoli elettrici la durata di vita di una batteria corrisponde al numero di cicli di carica/scarica in corrispondenza del quale la capacità di energia immagazzinabile dalla batteria raggiunge l'80% della capacità iniziale

³l'autoscarica è un fenomeno per cui, all'interno delle celle che costituiscono la batteria, avvengono delle reazioni chimiche che riducono la carica accumulata senza che vi sia alcun collegamento tra gli elettrodi, nè con alcun circuito esterno; viene espressa in riduzione percentuale della capacità iniziale al giorno.

quale dopo un certo numero di cicli non offre più quel livello di prestazioni richiesto per poter essere utilizzata in un veicolo elettrico, ma può comunque continuare a dare il proprio contributo, per esempio come supporto alla rete elettrica oppure in qualsiasi altro sistema commerciale o residenziale in cui sia richiesta della potenza elettrica.



Figura 3.3: la seconda vita delle batterie per auto elettriche

Considerando anche l'utilità della batteria nella sua "seconda vita" si può stimare il reale costo di stoccaggio dell'energia ed eseguire in tal modo una valutazione complessiva della redditività di un investimento in un Battery Electric Vehicle (Chemali et al. 2016).

Modelli di batterie esistenti

Di seguito sono elencati i modelli che sono stati utilizzati nel tempo come batterie per veicoli elettrici:

- batterie al piombo;
- accumulatori Nichel-metallo idruro (NiMH);
- batterie ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activities);
- batterie agli ioni di litio.

Batterie al piombo

Ormai non vengono più utilizzate sulle auto elettriche, ma trovano ampio spazio in applicazioni a basso voltaggio e, vista la maturità raggiunta da questo modello, continueranno ad essere usate anche nei prossimi anni.

Accumulatori Nichel-metallo idruro (NiMH)

Sono stati impiegati per diversi anni, soprattutto sui veicoli ibridi. Il principale problema di questo modello che ha portato al suo superamento è l'elevato tasso di autoscarica.

Batterie ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activities)

Sono chiamate così le batterie al Nichel-Cromo-Sodio; possiedono un'energia specifica di circa $90-120 \frac{Wh}{kg}$, maggiore rispetto a quella offerta dagli accumulatori Nichel-metallo idruro. Presentano inoltre una maggior quantità di energia per unità di volume.

Nonostante i miglioramenti attuati anche per questo modello il problema resta l'alto tasso di autoscarica.

Batterie agli ioni di litio

Attualmente sono la tipologia più diffusa ed utilizzata sulle auto elettriche. Inizialmente sono state sviluppate per computer e applicazioni di telefonia mobile, in seguito hanno trovato fortuna anche nel campo dei veicoli elettrici.

Presentano un'elevata energia per unità di massa e di volume ma, come riportato in Chemali et al. 2016 il loro principale limite riguarda la possibilità di soddisfare la richiesta ravvicinata di picchi di potenza senza che ciò comporti un degrado delle celle che costituiscono il pacco di batterie.

I due più grandi vantaggi delle batterie agli ioni di litio rispetto agli altri modelli esistenti sono: una maggior durata di vita della batteria ed un più basso tasso di autoscarica.

Esistono diverse varianti di queste batterie, tutte quante accomunate dalla funzione svolta dagli ioni di litio il cui compito è trasportare gli elettroni avanti e indietro tra gli elettrodi. La possibilità di poter eseguire tale trasferimento ad un alto voltaggio e l'impiego di materiali più leggeri ha permesso di aumentare rispetto agli altri modelli l'energia specifica ed il voltaggio nominale della singola cella.

Le versioni di batterie agli ioni di litio più diffuse sono tre:

1. LiFePO_4 (LFP);
2. LiNiMnCo (NMC);

3. LiNiCoAlO₂ (NCA).

La 1) è la versione più sicura per via dell'elevata temperatura di instabilità, la 2) e la 3) sono le varianti dominanti nel mercato dei veicoli elettrici a batteria a causa dell'alto livello di performance offerto, soprattutto in termini di energia specifica, potenza specifica ed energia per unità di volume.

Grazie ai tanti fondi investiti nello sviluppo delle batterie agli ioni di litio per applicazioni in ambito automotive è stato possibile raggiungere grandi risultati quali una riduzione del costo superiore al 40 % a partire dal 2012 che ha portato il prezzo d'acquisto di questa tipologia di batterie al di sotto dei $200 \frac{\$}{kWh}$ (U.S.Department of Energy 2020c); inoltre la densità di energia volumetrica della singola cella è stata più che triplicata in meno di 10 anni superando al contempo i 400 km di autonomia, come si può vedere dalla figura 3.4.

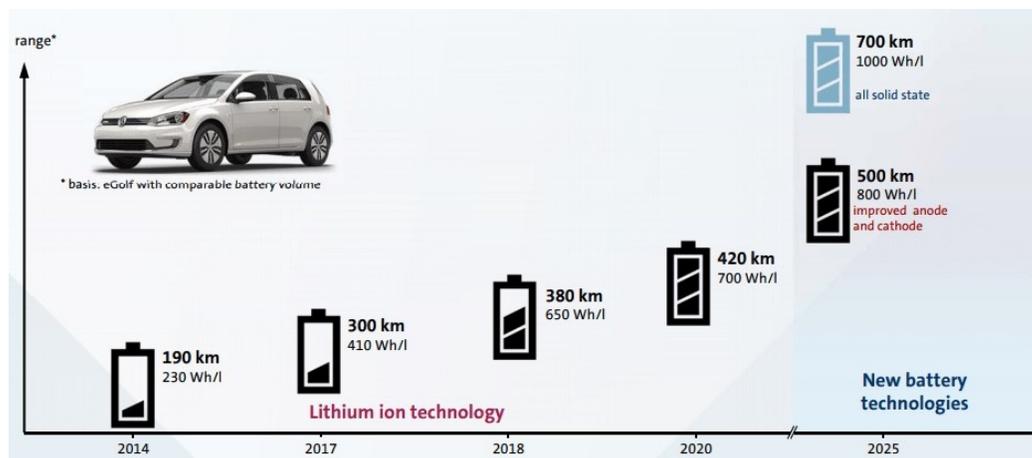


Figura 3.4: i progressi delle batterie agli ioni di litio

Sistemi di accumulo dell'energia innovativi

Tra gli stessi membri della comunità scientifica che ogni giorno si dedicano allo studio e alla messa a punto di sistemi di accumulo dell'energia per auto elettriche, ci sono pareri discordanti su quale via sia da prediligere per sostenere, nel modo migliore possibile, l'evoluzione e la diffusione dei veicoli elettrici a batteria. C'è chi sostiene che le convenzionali batterie al litio non

abbiano ancora raggiunto il più alto livello tecnologico possibile e che dunque, prima di passare ad occuparsi di altri modelli, convenga perfezionare al massimo questo tipo di batterie; allo stesso tempo vi sono diversi ricercatori che, pur continuando a pensare che il litio debba restare il punto fermo dei prossimi modelli, sostengono vadano sviluppate tecnologie differenti rispetto a quelle comunemente impiegate oggi. Infine altri esperti del settore sono convinti che, per dare una spinta decisiva e definitiva all'elettrificazione dei trasporti, sia fondamentale lo sviluppo di sistemi di accumulo dell'energia del tutto rivoluzionari.

Per quel che riguarda le nuove batterie al litio le soluzioni attualmente al vaglio dei ricercatori sono due:

1. batterie Litio-Aria (LiO_2);
2. batterie Litio-Zolfo (LiS).

I vantaggi che offrono questi due modelli sono: un'elevata energia specifica, che in linea teorica può arrivare fino a $3582 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ per le Litio-Aria e a $2567 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ per le Litio-Zolfo e un basso costo delle materie prime, in particolare del catodo, come risultato della grande abbondanza degli elementi di cui è costituito (in un caso ossigeno e nell'altro zolfo).

Gran parte dell'incremento dell'energia specifica teorica di questi modelli è una conseguenza del fatto che l'anodo può essere formato da litio puro che dunque può trattenere più carica rispetto alle convenzionali batterie agli ioni di litio in cui l'anodo è fatto di grafite.

Le batterie Litio-Aria sono state confinate per più di 40 anni nei laboratori di ricerca perchè, nonostante i risultati incoraggianti a livello teorico, non si è mai riuscito a risolvere il reale problema di questo modello, costituito dalla bassa stabilità chimica dei suoi componenti che può portare all'ossidazione dell'anodo e alla produzione di sottoprodotti dannosi sul catodo risultanti dalla combinazione degli ioni di litio con anidride carbonica e vapore acqueo presenti nell'aria. La conseguenza di questi fenomeni è una riduzione della capacità di energia immagazzinabile del 50% dopo solo 20 cicli di carica/scarica. Come riportato in Spagnolo 2018 un gruppo di ricercatori provenienti dall'Università dell'Illinois e dell'Argonne National Laboratory, negli USA, è riuscito a creare la prima cella elettrochimica litio-aria in grado di funzionare in un ambiente reale raggiungendo gli oltre 750 cicli di carica/scarica variando opportunamente l'architettura delle celle elettrochimiche.

Lo stesso problema di una breve vita ciclica della batteria penalizza anche le batterie Litio-Zolfo; per provare a porre rimedio a questo inconveniente si sta studiando una soluzione alternativa che prevede di realizzare l'anodo a base di carbonio e silicio. I primi risultati hanno mostrato una riduzione di capacità del solo 3 % dopo 1000 cicli e ciò rende questa prospettiva molto interessante⁴.

Recentemente stanno incontrando sempre maggior fortuna sistemi ibridi di accumulo dell'energia che prevedono la combinazione di un pacco di batterie con un ultracondensatore (UC).

Gli ultracondensatori sono in grado di immagazzinare sia energia potenziale elettrostatica, come i normali condensatori costituiti da due armature fra le quali è interposto un mezzo solido dielettrico, sia sotto forma di energia elettrochimica. Invece del materiale solido dielettrico viene utilizzata una soluzione elettrolitica.

Dal momento che non sono ancora disponibili batterie in grado di soddisfare contemporaneamente tutti i requisiti richiesti dall'applicazione su un veicolo elettrico, sono stati pensati dei sistemi ibridi di accumulo dell'energia costituiti dall'unione di più dispositivi così da sfruttare i punti di forza di ciascuno di essi. Infatti, sebbene le batterie abbiano un tempo di scaricamento più lungo degli ultracondensatori, questi ultimi hanno una maggior potenza specifica e possono fornire picchi di potenza al veicolo in caso di improvvise accelerazioni. Questo infatti, come messo in evidenza in precedenza, costituisce uno dei maggiori problemi delle batterie agli ioni di litio in quanto, se sollecitate con grandi richieste di potenza ravvicinate, tendono ad un degrado che ne riduce la capacità; facendo in modo che i picchi di potenza siano forniti dall'ultracondensatore, la batteria mantiene un profilo di scaricamento più uniforme e ciò comporta un aumento della durata di vita della batteria, in termini di numero di cicli di carica/scarica. Allo stesso tempo gli ultracondensatori non possono immagazzinare una quantità di energia tale da garantire un'autonomia accettabile. A differenza delle batterie gli ultracondensatori non hanno una durata di vita limitata, ma possono essere usati per un numero di cicli di carica/scarica pressochè infinito, senza presentare problemi di deterioramento, in quanto non avvengono quelle reazioni chimiche responsabili del degrado che si verificano nelle celle delle batterie.

Sistemi ibridi di accumulo dell'energia garantiscono un possibile incremento dell'autonomia del veicolo fino al 30% grazie al fatto che i picchi di

⁴Chemali et al. 2016.

richiesta di potenza sono soddisfatti dall'ultracondensatore non consumando la carica della batteria. Una diretta conseguenza di questo vantaggio è la possibile riduzione sia della taglia che del costo della batteria a parità di autonomia richiesta.

Riassumendo i vantaggi offerti da un sistema ibrido di accumulo dell'energia sono:

- maggior potenza specifica;
- maggior durata di vita della batteria;
- maggior autonomia con una singola ricarica;
- riduzione del costo della batteria.

3.4 Ricarica delle batterie e modifica della rete elettrica

Nel tentare di capire quali step eseguire per modificare la rete elettrica rendendola idonea per la ricarica contemporanea di un numero sempre crescente di veicoli elettrici a batteria, bisogna considerare che non si arriverà mai ad una elettrificazione completa della mobilità perchè, in futuro, è presumibile supporre che il trasporto non convergerà verso un'unica modalità com'è stato fino alla fine degli anni '90, dove si è verificato un dominio totale da parte dei Motori a Combustione Interna; dunque, sebbene vada prevista una grande implementazione della rete elettrica perchè, inevitabilmente, il numero di veicoli elettrici in circolazione è destinato ad aumentare di diversi milioni di unità, nella progettazione di una rete elettrica atta a soddisfare la richiesta di energia, bisogna altresì tenere presente che esisteranno anche altre tipologie di veicoli che non avranno la necessità di ricaricarsi in tal modo e che andranno a completare quello che sarà un sistema di mobilità integrato costituito da diversi mezzi interconnessi vicendevolmente e dipendenti l'uno dall'altro.

Per capire come modificare la rete elettrica per fare in modo che sia in grado di fornire l'energia necessaria ai veicoli elettrici, può essere utile capire quali modalità di ricarica vengono ad oggi utilizzate e quali sono ancora in via di sviluppo.

Attualmente la maggior parte delle ricariche delle auto elettriche avviene di notte, tuttavia per poter garantire un servizio comparabile a quelle delle auto tradizionali a combustione interna è indispensabile predisporre un adeguato numero di stazioni pubbliche di ricarica.

Le tecnologie oggi disponibili per ripristinare il livello di carica delle batterie possono essere individuate in tre grandi famiglie:

1. ricarica conduttiva;
2. ricarica induttiva;
3. battery swap.

Ricarica conduttiva

La ricarica conduttiva tradizionale permette il ripristino della carica per mezzo di un collegamento fisico, attraverso il cavo di alimentazione, tra veicolo e infrastruttura di ricarica.

Può essere eseguita collegando la batteria alla presa domestica, alle colonnine pubbliche di ricarica o ad altre tipologie di stazioni pubbliche; è richiesto che il veicolo sia fermo.

Per cercare di porre rimedio al problema del lungo tempo di ricarica necessario, ancora oggi uno dei fattori che limitano la diffusione delle auto elettriche, stanno avendo sempre più successo le stazioni di ricarica veloce. Questa modalità di ricarica in corrente continua, detta DC Fast Charger, risulta compatibile con tutti i veicoli elettrici ed è in grado di ricaricare in meno di un'ora la batteria del veicolo fino all'80 % del suo totale; tale soluzione è ideale per ricaricare flotte aziendali, ma soprattutto permette di fornire un comodo servizio di ricarica veloce al pubblico in luoghi come centri commerciali, parcheggi pubblici, ristoranti e cinema. In figura 3.5 l'esempio di una stazione di ricarica veloce nel parcheggio di un ristorante.



Figura 3.5: stazione di ricarica veloce

A differenza della ricarica "a destinazione" che poco impatta sulla rete elettrica e viene effettuata prevalentemente di notte, a casa, in un deposito o in qualunque parcheggio adibito alle operazioni di ricarica, il problema legato alla ricarica veloce contemporanea di tanti veicoli consiste nel grande impatto che essa ha sulla rete elettrica ed in particolare per il fatto che determina un incremento del carico termico agente sul trasformatore di distribuzione (dispositivo che serve per ridurre la tensione dall'altissimo voltaggio usato per la distribuzione della potenza elettrica fino ai bassi valori richiesti dalle

utenze) che può causarne un invecchiamento precoce. Non a caso le attività di ricerca e sviluppo svolte dalle aziende che si occupano di produrre utenze elettriche sono prevalentemente volte a migliorare questo aspetto, cercando così di rendere l'attuale rete elettrica idonea al compito da svolgere. Il secondo problema della ricarica veloce, anche questo non trascurabile, è che a lungo andare può causare un degrado prematuro della batteria, cosa assolutamente da evitare dato l'elevato costo di questo componente. Per questo motivo la ricarica veloce va eseguita solo in caso di necessità

Recentemente sono state messe a punto innovative tecniche di ricarica conduttiva grazie alle quali è stato possibile eliminare i cavi di alimentazione. Un esempio è quello della ricarica conduttiva automatizzata, una soluzione che si basa su ID centralizzati e blockchain. Questo sistema sfrutta un impianto di comunicazione wifi protetto per far interagire una piastra di ricarica installata a terra con il connettore estendibile integrato nel fondo dell'auto: una volta parcheggiato il veicolo sulla piattaforma, infatti, i due componenti dialogano fra loro e l'utente non deve fare altro se non aspettare che la ricarica venga ultimata.

Ricarica induttiva

Si basa sul trasferimento di energia attraverso l'accoppiamento elettromagnetico di un circuito composto da due bobine: una annessa nel terreno o posizionata sopra il manto stradale e l'altra installata sul pianale dell'auto. La forza elettromotrice che si genera tra le due bobine viene usata per ricaricare la batteria.

Questo metodo sta venendo studiato per vedere se può essere utilizzato anche come modalità di ricarica degli autobus che devono sostare alle fermate durante la salita e la discesa dei passeggeri. I problemi in questo caso sono di due tipi: il primo riguarda le interferenze del campo elettromagnetico con eventuali altri componenti del veicolo che possono causare una ricarica non ottimale della batteria, il secondo consiste nell'eventuale esposizione dei passeggeri e dell'autista a radiazioni elettromagnetiche di cui si sta ancora valutando la pericolosità. Sono al vaglio dei ricercatori nuove soluzioni per ridurre i rischi potenziali di questa nuova frontiera per ricaricare i mezzi; tuttavia, bisogna mettere in evidenza che l'intensità dei campi elettromagnetici che si sviluppano crollano appena ci si allontana dalle bobine.

Uno svantaggio di questa tecnologia, oltre alla maggiore complessità del sistema di ricarica, è rappresentato dal rendimento di trasferimento, che risulta normalmente pari al 90 %. Ciò comporta che un 10 % dell'energia

elettrica vada persa nel processo di passaggio tra trasmettitore e ricevitore. I più recenti sviluppi della ricarica induttiva hanno portato ad una riduzione di tali perdite.

Battery swap

Non è una vera e propria tecnologia di ricarica, infatti prevede la sostituzione delle batterie scariche con altre già cariche in apposite stazioni attrezzate per eseguire tali operazioni. Questi procedimenti comportano elevati investimenti per costruire le infrastrutture robotizzate necessarie e per questo motivo ad oggi non sono molto diffusi. Questa idea è stata già attuata in passato ma non ha avuto grande successo per due motivi: il primo è l'elevato costo per realizzare le infrastrutture e la relativa rete, sostenibile soltanto con sussidi pubblici e con un ampio parco auto circolante; il secondo è la necessità di standardizzare dimensioni e tecnologia degli accumulatori tra tutti i costruttori, cosa che ad oggi non è pensabile da attuare. In questo momento solo la Cina risulta fortemente interessata a questo scenario, in quanto è uno dei pochi paesi dove il forte controllo da parte dello stato può imporre degli standard commerciali. Attualmente in Europa oltre che per un problema di costi delle infrastrutture si è contrari alla standardizzazione delle batterie in quanto sono componenti chiave nella progettazione delle auto elettriche e standardizzarle significherebbe rinunciare a qualsiasi possibilità di diversificare e caratterizzare i vari modelli, le prestazioni e il segmento di mercato (Tedeschini et al. 2020).

Sono in fase di studio anche dei metodi di ricarica dinamica il cui obiettivo è ricaricare continuamente la batteria, anche a veicolo in movimento. Tra i tanti gruppi di ricercatori di diverse università interessati a questo tema spunta anche la casa automobilistica francese Renault, la quale sta dando il proprio contributo per questa innovazione che, sebbene ad oggi sia ancora lontana dall'essere ultimata, se portata a termine, costituirebbe un incredibile passo in avanti per tutto il settore della mobilità elettrica, poiché permetterebbe l'adozione di batterie più piccole, più leggere, tempi di ricarica più brevi e una maggiore autonomia dei veicoli.

Posto che la rete elettrica è in continua evoluzione, se si passano in rassegna gli espedienti necessari a fare in modo che il sistema odierno di infrastrutture per la produzione e la distribuzione dell'elettricità sia pronto a soddisfare i picchi di richiesta dovuti alla ricarica contemporanea dei milioni di mezzi elettrici che tra qualche anno solcheranno le strade di tutto il

mondo, non si può non pensare, almeno in prima battuta, ad una serie di provvedimenti per una gestione intelligente e programmata della ricarica di questi veicoli. Un esempio può essere regolare e pianificare le soste in prossimità delle stazioni di ricarica in base al percorso da eseguire; questa modalità risulta largamente applicabile soprattutto nel caso di pullman e mezzi pesanti adibiti al trasporto di merci i quali, percorrendo lunghe tratte, devono effettuare per legge un numero prestabilito di soste ad intervalli di tempo regolari. Questo può contribuire a distribuire la richiesta di potenza elettrica evitando picchi che con la rete attuale sarebbero difficilmente gestibili.

Uno scenario molto interessante è quello che prende il nome "vehicle-to-grid" (letteralmente "dal veicolo alla rete"), che si può presentare in due modalità: la prima avente come sigla l'espressione V1G, che sta ad indicare che l'energia può viaggiare in una sola direzione, ovvero dalla rete al veicolo. Il vantaggio di questa modalità è costituito dalla possibilità di eseguire una ricarica intelligente che consente di modificare tempestivamente la velocità della ricarica opportunamente a seconda delle esigenze della rete elettrica. La seconda modalità, indicata con la sigla V2G, prevede uno scambio di energia bidirezionale dalla batteria alla rete e viceversa. Questo modo di agire può arrivare a fornire alla rete diversi MW di potenza elettrica aggiuntivi e risulta tanto più interessante quanto maggiore è il numero dei veicoli elettrici in circolazione. Un lato negativo di questo scenario è una certa accelerazione dell'invecchiamento delle batterie, a causa dei maggiori flussi di energia attraverso le batterie stesse, sebbene allo stesso tempo permetta all'utente di recuperare fino al 60-70 % dei costi. Lo stesso concetto è alla base del "vehicle-to-home", la cui sigla è V2H, che invece di cedere potenza elettrica alla rete pubblica la fornisce direttamente all'abitazione(Re 2020).

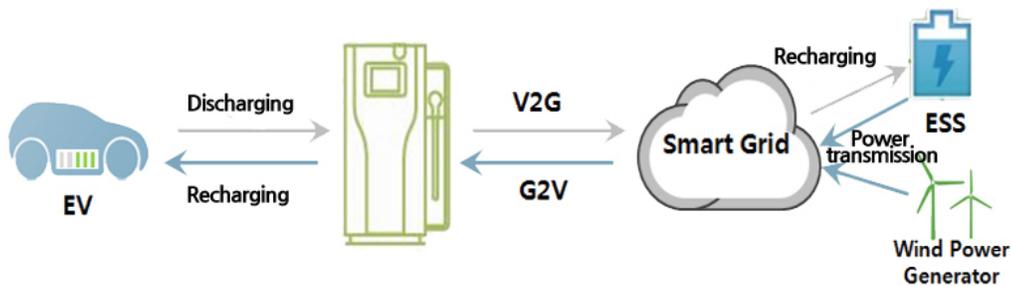


Figura 3.6: rappresentazione dei concetti di V2G e smart grid

Tutto questo rientra nel concetto più ampio di "smart grid", ovvero una

"rete elettrica intelligente" in grado di comunicare con i vari sistemi richiedenti e cedenti potenza elettrica e capace di variare le modalità di erogazione dell'elettricità per fare in modo di essere pronta in caso di eventuali picchi di richiesta. In figura 3.6 è riportata una schematizzazione di questo tema di recente implementazione.

Altri modi per supportare la rete nazionale nel fornire potenza alle batterie da ricaricare consistono nel realizzare sistemi di produzione locale di energia elettrica che facciano uso di fonti rinnovabili. Tali sistemi come lo sono per esempio i pannelli fotovoltaici possono essere gestiti autonomamente stoccando e fornendo localmente energia elettrica e svincolando, almeno in parte, la rete pubblica da tale compito (vedi figura 3.7).



Figura 3.7: un esempio di produzione locale di energia per BEV a supporto della rete elettrica pubblica

In conclusione, in base a quanto visto possiamo affermare che i futuri

sistemi di mobilità richiederanno una comprensione profonda dell'interconnessione esistente tra molteplici aspetti da cui la necessità di mettere a punto sistemi energetici di mobilità integrati; in particolare, rispetto agli apparati ad oggi comunemente usati che si basano sull'uso dei combustibili fossili, assumerà sempre più rilevanza la gestione spazio temporale dell'erogazione dell'energia. Per fare un esempio, mentre al momento il luogo e l'istante in cui un'automobile viene rifornita con del combustibile di origine fossile non porta ad alcuna conseguenza, quando nei prossimi anni i veicoli elettrici saranno sempre più numerosi, la fase di ricarica dei veicoli impatterà enormemente sulla rete elettrica e più in generale sull'intero sistema energetico e dunque andrà gestita opportunamente.

Conclusioni

L'analisi effettuata riguardante le future tecnologie che con ogni probabilità domineranno il settore dei trasporti, ed in particolare l'ambito automotive, nei prossimi anni, permette di cogliere l'estrema varietà delle alternative che si stanno delineando. È stato documentato che ogni tecnologia ha dei punti di forza ma anche degli aspetti per cui risulta sfavorita ed è proprio la mancanza di una soluzione che soddisfi tutti i requisiti richiesti la motivazione di una gamma di opzioni così differenziata.

L'estrema varietà di proposte presenti sul mercato è tuttavia anche ciò che stimola ricercatori, studiosi e produttori ad un continuo perfezionamento delle tecnologie e allo stesso tempo alla progettazione di sistemi di propulsione completamente all'avanguardia che possano costituire una risposta concreta e realizzabile a tutte le esigenze in termini ambientali, prestazionali e di costi, sia del sistema stesso che, soprattutto, delle infrastrutture richieste.

Come sottolineato più volte, il problema del surriscaldamento globale con la conseguente impellente necessità di ridurre le emissioni climalteranti, mediante una transizione energetica verso forme di energia alternative è, e verosimilmente continuerà ad essere, la motivazione alla base dello sviluppo di tecnologie di movimentazione differenti da quelle che nell'ultimo secolo hanno dominato il panorama mondiale. Infatti, in mancanza di provvedimenti seri per la riduzione di emissioni, la temperatura media terrestre potrebbe registrare un innalzamento di diversi gradi in pochi anni. Il clima che cambia ha anche un volto economico, infatti la mancanza di interventi peserebbe in termini di eventi estremi come alluvioni, roghi, infrastrutture danneggiate, aumento del divario sociale e danni ingenti ai terreni agricoli.

Alla luce di tutto ciò assume un'importanza fondamentale il ruolo ricoperto dal settore dei trasporti che può allo stesso tempo contribuire e beneficiare dell'implementazione di sistemi che facciano largo uso di fonti rinnovabili a basso impatto ambientale.

La strada intrapresa a partire dai primi anni 2000 è indubbiamente quella corretta, ma al momento i dati climatici mostrano che quanto si sta facendo non è ancora sufficiente per arrestare i cambiamenti in atto. La tempestività richiesta per ciò che riguarda i provvedimenti necessari indica che non si può più procrastinare e affinché gli sforzi messi in campo non risultino vani non è pensabile che gli accorgimenti attuati riguardino solo specifici settori come quello dei trasporti. Infatti, a supporto di quanto detto e come mostra la figura 1, i trasporti, contrariamente a quanto si possa pensare, contribuiscono "solo" per il 14 % al totale dei gas serra emessi.

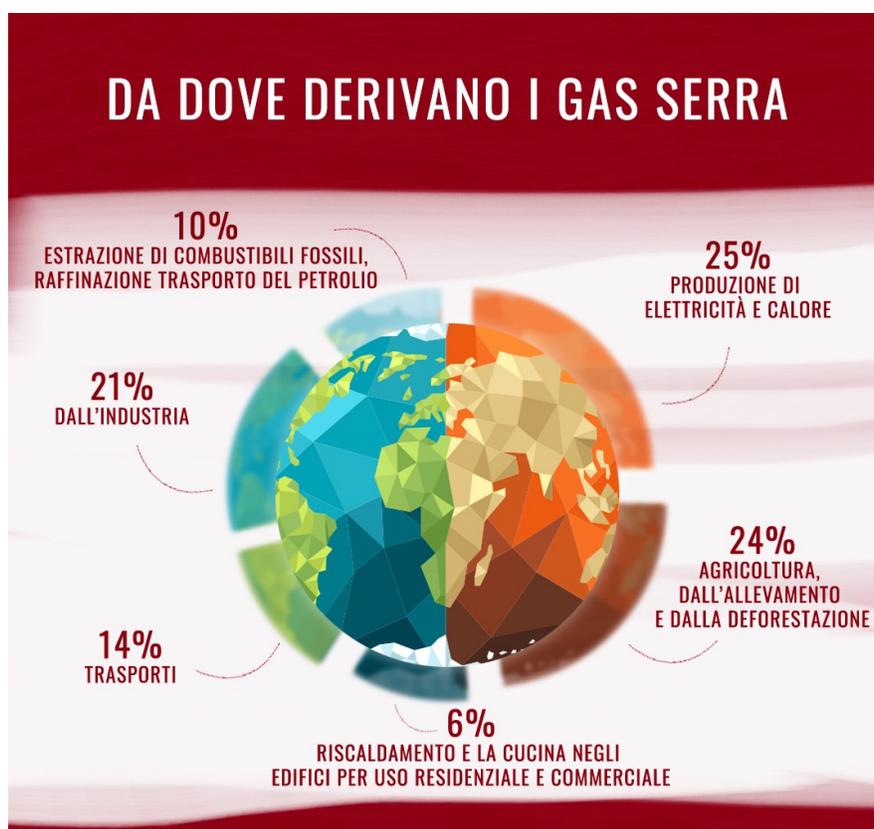


Figura 1: settori responsabili dell'emissione di gas serra e relativo contributo % di emissione

Il successo nella salvaguardia del pianeta è responsabilità del singolo cittadino ed è un'operazione di cui ogni individuo può e deve essere artefice.

Bibliografia

- Agbossou, Kodjo et al. (2007). «Renewable Hydrogen Production and Distribution Options for Fuel Cells Use». In: *SAE technical paper series*.
- Akshay, Vij (nov. 2018). *Understanding consumer demand for new transport technologies and services, and implications for the future of mobility*.
- Bhiogade, Girish et al. (2016). «Investigations on Premixed Charge Compression Ignition (PCCI) Engines: A Review». In: *Fluid Mechanics and Fluid Power – Contemporary Research*.
- Casalegno, Andrea et al. (2018). *L'idrogeno come vettore energetico*. URL: <https://ceimagazine.ceinorme.it/ceifocus/lidrogeno-come-vettore-energetico/>.
- Chemali, Ephrem et al. (2016). «Electrochemical and Electrostatic Energy Storage and Management Systems for Electric Drive Vehicles: State-of-the-Art Review and Future Trends». In: *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*.
- Chowdhury, Sunetra et al. (2016). *Battery Storage and Hybrid Battery Supercapacitor Storage Systems: A Comparative Critical Review*. relazione. Electrical Engineering Department, University of Cape Town, South Africa.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per i processi chimico-fisici, cur. (2017). *Verso una nuova sintesi elettrochimica di un combustibile green: l'etere dimetilico*. URL: <https://www.cnr.it/en/news/7615>.
- Fraidl, Gunter et al. (2018). *Internal Combustion Engine 4.0*. URL: <https://autotechreview.com/technology/internal-combustion-engine-4-0>.
- Frigo, Stefano et al. (2012). *Motori a combustione interna innovativi a ridotto impatto ambientale*. relazione. Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi.

- Joshi, Ameya (2020). «Review of Vehicle Engine Efficiency and Emissions». In: *SAE Technical Paper 2020-01-0352*.
- Knothe, Gerhard et al. (2016). «Biodiesel fuels». In: *Progress in Energy and Combustion Science*.
- Larsson, Tara et al. (2019). «Future Fuels for DISI Engines: A Review on Oxygenated, Liquid Biofuels». In: *SAE Technical Paper 2019-01-0036*.
- Long, Pan et al. (2019). «Environmental Effects of BEV Penetration Considering Traffic Status». In: *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*.
- Monjid, Hamdan (2019). «Demonstration of Integrated Hydrogen Production and Consumption for Improved Utility Operations». In: *2019 Fuel Cell Seminar Energy Exposition*. A cura di Giner ELX.
- Muratori, Matteo et al. (2020). «Future integrated mobility-energy systems: A modeling perspective». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Orecchini, Fabio (2020). *Idrogeno, a Chubu in Giappone nasce l'energia del 2030*. URL: <https://www.fabioorecchini.it/idrogeno-a-chubu-parte-la-societa-del-2030/>.
- Re, Luca (2020). *Vehicle-to-Grid: cos'è, cosa può fare, quali prospettive in Italia*. URL: <https://www.qualenergia.it/articoli/vehicle-to-grid-cose-cosa-puo-fare-quali-prospettive-in-italia/>.
- Reitz, Rolf Deneys et al. (2020). «The future of the internal combustion engine». In: *International Journal of Engine Research*.
- Rizzoni, Giorgio (set. 2019). *Transformational Technologies Reshaping Transportation - An Academia Perspective*.
- Romejko, Kamila et al. (2017). «Life Cycle Analysis of Emission from Electric and Gasoline Vehicles in Different Regions». In: *International Journal of Automation Technology*.
- Sanghai, Bishnu et al. (2019). «Refurbished and Repower: Second Life of Batteries from Electric Vehicles for Stationary Application». In: *SAE Technical Paper 2019-26-0156*.
- Sinigaglia, Tiago et al. (2017). «Viability and Impacts of Hydrogen Economy in Mobility- A Review». In: *SAE technical paper series*.
- Smallbone, Andrew et al. (2020). «The impact of disruptive powertrain technologies on energy consumption and carbon dioxide emissions from heavy-duty vehicles». In: *Energy Conversion and Management: X*.

- Spagnolo, Mauro, cur. (2018). *Batterie litio-aria, superati i 750 cicli di carica*. URL: <https://www.rinnovabili.it/innovazione/batterie-litio-aria>.
- Tedeschini, Mauro et al., cur. (2020). *Standardizzazione e battery swapping: la Cina ci riprova*. URL: <https://www.vaielettrico.it>.
- TOGREEN, S.R.L., cur. (2019). *Idrogeno: combustibile e vettore energetico. A che punto siamo?* URL: <https://www.rinnovabili.it/energia/idrogeno/combustibile-vettore-energetico/>.
- U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency et Renewable Energy (2020a). *H2@Scale*. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale>.
- U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Office, cur. (2020b). *Advanced Combustion Strategies*. URL: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/advanced-combustion-strategies>.
- cur. (2020c). *Batteries, Charging, and Electric Vehicles*. URL: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/batteries-charging-and-electric-vehicles>.
- cur. (2020d). *Emission Control*. URL: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/emission-control>.
- cur. (2020e). *Fuel Effects on Advanced Combustion*. URL: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/fuel-effects-advanced-combustion>.
- U.S. Energy Information Administration, Office of Energy Analysis, cur. (2020). *Annual Energy Outlook 2020 with projections to 2050*. URL: <https://www.eia.gov/aeo>.
- Walker, Ryan et al. (ago. 2013). *Use of Low-Pressure Direct-Injection for Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Light-Duty Engine Operation*.