

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Energetica



STATO DELL'ARTE DEI VEICOLI IBRIDI

Relatore: Prof. Angelo ONORATI

Tesi di Laurea di:

Paolo LOCATELLI

Matr. 750021

Anno Accademico 2011 - 2012

Indice Generale

Introduzione

1	Schemi costruttivi	4
2	Accumulatori elettrici	7
2.1	Caratteristiche e tipologie	7
2.2	Batterie Piombo-Carbonio	10
2.3	Batterie agli ioni di litio	13
2.4	Supercondensatori	33
3	Motori elettrici	38
3.1	Motori ad induzione	38
3.2	Motori Brushless	39
3.3	Motori a riluttanza variabile	39
4	Tipologie veicoli ibridi	41
4.1	Micro ibridi	41
4.1.1	Sistema Stop&Start	41
4.1.2	Frenata rigenerativa	44
4.2	Mild Hybrid	46
4.2.1	Honda Insight e Honda Jazz Hybrid	47
4.3	Full Hybrid	49
4.3.1	Toyota Prius	50
4.4	Extended-Range Hybrid	72
4.4.1	Possibili range extender	72
	Motore a combustione interna tradizionale	
	Motore rotativo Wankel	
	Turbina a gas	
	Stirling free piston	
	Motore OPOC	
4.5	Plug in Hybrid	82
4.5.1	Chevrolet Volt/Opel Ampera	84
5	Biocarburanti	93
5.1	Il bioetanolo per l'autotrazione	95
5.2	Emissioni	99
5.3	SAAB Bio-Power Hybrid Concept	101
5.4	SCANIA: Autobus ibrido alimentato a bioetanolo	105
	Conclusioni	109
	Bibliografia	112

Introduzione

Il crescente numero di veicoli circolanti nel mondo ha, tra le sue conseguenze dirette, l' aumento delle emissioni di anidride carbonica e il crescente sfruttamento delle risorse di combustibile di natura fossile.

La dipendenza dal petrolio porta con sé problemi di natura geopolitica ed economica e pone l'esigenza di attuare delle politiche energetiche che riducano l'utilizzo di carburanti fossili e diversifichino le risorse utilizzate.

A questo riguardo i veicoli ibridi rappresentano una possibile soluzione immediatamente realizzabile per:

- Migliorare l'efficienza dei veicoli per ottenere una riduzione dei consumi di combustibile e minori emissioni di CO₂;
- Ridurre le emissioni inquinanti nelle aree urbane;⁽¹⁾
- Diminuire la dipendenza dalle fonti energetiche fossili;

Un veicolo ibrido, più propriamente veicolo a propulsione ibrida, è un veicolo dotato di due sistemi di propulsione, ad esempio motore elettrico con motore termico, l'accoppiata più diffusa.

I due propulsori sono adatti a coesistere in quanto hanno caratteristiche complementari. Il motore a combustione interna trasforma l'energia chimica del combustibile (di notevole densità energetica e facilmente approvvigionabile dalla rete di rifornimento) con una efficienza accettabile solo in alcuni punti di funzionamento. Il motore elettrico invece converte con una maggiore efficienza e versatilità un'energia disponibile a bordo in minori quantità.

I veicoli a propulsione ibrida si pongono l'obiettivo di sfruttare in modo ottimale il motore a combustione interna ricorrendo ad un sistema di accumulo, in linea di principio contenuto, per erogare i picchi di potenza necessari nei periodi di maggior richiesta (accelerazioni, salite, tratti ad alta velocità) o per immagazzinare la potenza in eccesso durante la frenata o la discesa generando energia altrimenti dissipata nei freni ed evitando la dispersione in atmosfera delle polveri dovute all'usura delle pastiglie o delle ganasce dei freni.

In alcuni casi (full hybrid) è anche possibile marciare a motore endotermico spento, seppure per brevi tratti ed eventualmente a basse velocità, come ad esempio nei centri urbani.

L'energia elettrica si può immagazzinare con l'utilizzo di vari dispositivi che possono essere utilizzati anche in contemporanea.

Batterie (vedi cap. 2): hanno densità energetica inferiore a quella del carburante, possono essere dimensionate per accumulare la massima energia, per scambiare la massima potenza o con un compromesso fra i due estremi. Le batterie funzionano con processi elettrochimici distribuiti al loro interno e non è banale controllare

tutte le condizioni, ad esempio di temperatura, per limitare quanto possibile il decadimento di elettrodi ed elettroliti.

Supercondensatori: rispetto alle batterie, hanno minore densità energetica ma possono cedere e ricevere maggiori potenze. Sono basati su un processo fisico, maggiormente controllabile (vedi par. 2.4)

Volani ad azionamento elettrico: l'energia è immagazzinata come energia cinetica di un volano messo in rotazione da una macchina elettrica, è un processo del tutto meccanico e presenta problemi di controllo ancora differenti dai precedenti.

A seconda del grado di ibridazione (potenza del propulsore elettrico rispetto alla potenza totale installata) e della capacità del sistema di propulsione ibrido di immagazzinare energia elettrica si definiscono alcuni livelli di ibridazione caratterizzati da una crescente percorrenza in modalità elettrica pura e da un crescente grado di ibridazione:

Auto ibride denominate "Microibride"

Le auto denominate in gergo tecnico microibride sono auto dove la parte elettrica, in pratica la normale batteria da 12 Volt al piombo e il motorino di avviamento da 2 -3 kW, consente la funzione Stop&Start del propulsore termico. Praticamente il motore si spegne quando non serve (ad es. durante l'attesa al semaforo), per poi riaccendersi automaticamente quando si premono l'acceleratore o il pedale della frizione. I vantaggi rispetto una vettura tradizionale sono una ricarica parziale della batteria tramite l'alternatore sfruttando l'energia dispersa in fase di ogni decelerazione e un consumo ridotto del 5%, valore che può aumentare ulteriormente con uso dell'auto prevalentemente cittadino.

Auto ibride denominate "Mild-Hybrid"

Queste auto ibride rappresentano il passo successivo rispetto alle micro-ibride dalle quali si differenziano per l'impianto elettrico, composto da motori elettrici da 10-15 kW alimentati da batterie NiMH o al Litio da 42 a 150 Volt. Il propulsore termico, oltre a sfruttare la funzione Stop&Start, viene aiutato da quelli elettrici in fase di accelerazione. Ogni volta che l'auto ibrida subisce una decelerazione l'energia, altrimenti dispersa, viene recuperata e utilizzata per ricaricare le batterie.

Auto ibride denominate "Full-Hybrid"

Le auto ibride denominate Full-Hybrid sono le uniche in grado di viaggiare in modalità solo elettrica, anche se a volte solo a bassa velocità (50 - 60 Km/h), grazie a motori elettrici e batterie più potenti. Questa caratteristica può essere sfruttata principalmente in città, ed è proprio per questo motivo che le auto ibride godono, in alcuni casi, di incentivi statali e possono circolare liberamente anche in

quelle città in cui vigono limitazioni al traffico. Attualmente i tragitti percorribili con la sola trazione elettrica sono molto ridotti, in genere non più di qualche chilometro, a causa della limitata capacità delle normali batterie. Tutti i costruttori stanno eseguendo test su prototipi alimentati con batterie al Litio che hanno il vantaggio di avere un'autonomia superiore ma lo svantaggio di essere troppo costose per un immediato impiego sulle auto di serie. Grazie alle vantaggiose caratteristiche delle batterie al Litio è nata anche una nuova generazione di auto ibrida denominata "**Range-extender**", vetture che normalmente viaggiano in modalità elettrica e sfruttano il motore termico esclusivamente per ricaricare le batterie in caso la loro potenza diventasse insufficiente e non si potesse provvedere ad una ricarica immediata.

Auto ibride denominate "Plug-in"

Le auto ibride denominate plug-in si differenziano dalle normali auto ibride "Full Hybrid" per la possibilità di essere ricaricate direttamente alla presa elettrica di casa o presso le speciali colonnine di carica. Avendo a disposizione questa possibilità non è più necessario attendere che il motore termico provveda a recuperare l'energia durante la marcia normale per ricaricare le batterie.

I veicoli ibridi possono essere interpretati come una soluzione "ponte" in attesa dello sviluppo di sistemi di vetture elettriche più competitivi.

Infatti i sistemi di accumulo elettrochimico non sono ancora in grado di competere con i combustibili convenzionali nel settore dei trasporti; le principali carenze delle batterie rispetto ai combustibili fossili risiedono in una bassa densità di energia ed in tempi di ricarica non paragonabili ai tempi di rifornimento del carburante per una vettura tradizionale.

A questo va aggiunto la difficoltà di creare delle infrastrutture, capillarmente distribuite sul territorio, dedicate alla ricarica delle batterie.

(1) I veicoli ibridi possono essere considerati una soluzione per ridurre le emissioni inquinanti solo in determinati contesti di utilizzo come nel traffico delle aree urbane dove l'uso dei veicoli è caratterizzato da frequenti fermate e ripartenze e da basse velocità di spostamento.

Per altri contesti, come i lunghi spostamenti autostradali, i recenti sviluppi tecnologici dei motori endotermici in termini di riduzione delle emissioni nocive dimostrano che, sotto questo aspetto, non ci sarebbero ad oggi sensibili vantaggi nel passare a tecnologie di propulsione alternative. [1]

Capitolo 1

Schemi costruttivi

Esistono due schemi costruttivi principali per l'integrazione di un motore termico ed una macchina elettrica: *ibrido serie* e *ibrido parallelo*. La combinazione dei due dà origine all'*ibrido misto*.

IBRIDO SERIE

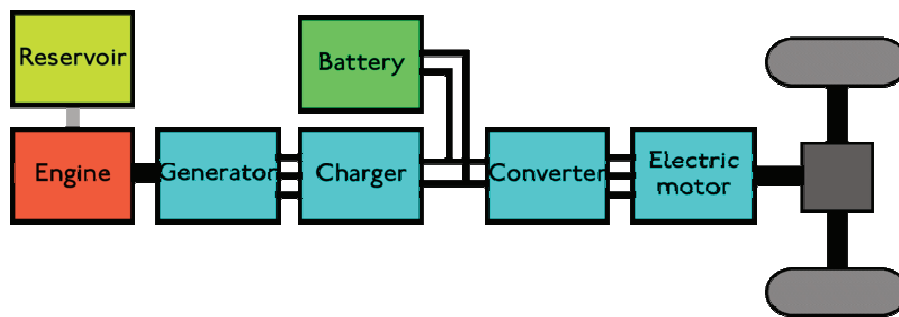


Figura 1.1 Schema di un ibrido serie

È un veicolo ibrido in cui la potenza necessaria alla propulsione è fornita esclusivamente da un motore elettrico;

L'ibrido serie si avvicina all'idea del veicolo elettrico puro, a cui sia stata data la possibilità di effettuare a bordo la ricarica, tramite un sistema di generazione;

In questa tipologia il motore termico non è collegato alle ruote, esso ha il compito di generare la corrente per alimentare il motore elettrico che la trasforma in moto, mentre l'energia superflua viene utilizzata per ricaricare le batterie.

Nei momenti in cui viene richiesta una grande quantità di energia, essa viene attinta sia dal motore termico che dalle batterie. Poiché i motori elettrici sono in grado di operare su di una grande vastità di regimi di rotazione, questa struttura permette di rimuovere o ridurre la necessità di una trasmissione complessa. L'efficienza dei motori a combustione interna cambia al variare del numero di giri, nei sistemi *ibrido serie* i giri del motore termico vengono impostati per ottenere sempre la massima efficienza non dovendo subire né accelerazioni né decelerazioni. Data questa condizione e per compensare l'ulteriore trasformazione energetica, si può usare un motore termico (generatore) che abbia una fascia di sfruttamento/funzionamento molto stretta rispetto ai regimi totali e che per questo abbia un rendimento più elevato dei motori termici classici, per lo meno in quella fascia di regimi.

In alcuni prototipi sono installati piccoli motori elettrici per ogni ruota. Il notevole vantaggio di questa configurazione è di poter controllare la potenza erogata per ogni ruota. Uno scopo possibile potrebbero essere di semplificare il controllo della trazione o inserire/disattivare la trazione integrale.

Il maggiore svantaggio degli *ibridi serie* consiste nella seria riduzione di efficienza rispetto ai motori solo termici in condizioni di elevata e costante velocità (come le percorrenze autostradali). Questo è causato dal fatto che nella conversione termico-elettrico-moto parte dell'energia viene persa mentre non accadrebbe con una trasmissione diretta. Questo inconveniente non è presente negli *ibrido parallelo*. Gli *ibridi serie* sono i più efficienti per i veicoli che necessitano di continue frenate e ripartenze come le auto ad uso urbano, autobus e taxi.

Molti modelli di *ibridi serie* hanno, in dotazione, un pulsante per spegnere il motore termico. La funzione viene utilizzata specialmente per la circolazione nelle zone a traffico limitato. L'autonomia è limitata alla carica delle batterie, il motore termico, comunque, può essere riattivato con la pressione del medesimo pulsante. Il motore termico viene inoltre spento automaticamente durante le soste.

IBRIDO PARALLELO

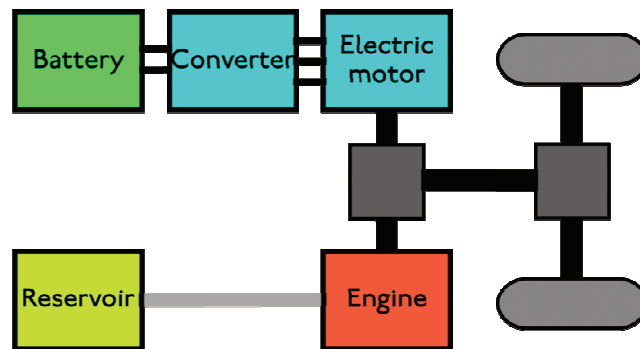


Figura 1.2 Schema di un ibrido parallelo

L'ibrido parallelo è più strettamente legato al concetto di veicolo tradizionale, nel quale il motore elettrico lavora in parallelo con quello a combustione interna, per coprire i picchi di richiesta e consentire il recupero in frenatura.

Tale architettura è tra le più usate nelle auto ibride. È caratterizzata da un nodo meccanico di accoppiamento della potenza, per cui entrambi i motori (l'elettrico ed il termico) forniscono coppia alle ruote. Il motore termico può inoltre essere utilizzato per ricaricare le batterie in caso di necessità. La realizzazione costruttiva del nodo meccanico e la sua posizione nell'ambito del sistema di propulsione servono a distinguere ibridi paralleli pre-trasmissione (motore elettrico a monte del cambio), post-trasmissione (motore elettrico a valle del cambio) e post-ruote (i

due assali hanno due motorizzazioni meccanicamente indipendenti, l'accoppiamento è dunque costituito dalla strada). Gli *ibridi parallelo* possono ulteriormente essere classificati a seconda del bilanciamento dei due motori nel fornire potenza motrice. Nella maggior parte dei casi, ad esempio, il motore a combustione interna è la parte dominante e il motore elettrico ha la semplice funzione di fornire una maggiore potenza nei momenti di necessità (principalmente in partenza, in accelerazione, ed alla velocità massima).

La maggior parte dei progetti combinano un grande generatore elettrico e un motore in una singola unità, spesso situata tra il motore a combustione interna e la trasmissione, nel posto del volano, rimpiazzando sia il motorino di avviamento che l'alternatore. Solitamente il cambio è automatico.

Il vantaggio sta nell'eliminazione delle marce basse (quelle che consumano più carburante) e del consumo a ruote ferme o a passo d'uomo. Inoltre permette cilindrate più basse in quanto alla massima velocità il motore termico può essere supportato da quello elettrico (anche se solo per qualche chilometro). Questo ne fa dei veicoli adatti ai ritmi cittadini piuttosto che alle lunghe percorrenze autostradali.

IBRIDO MISTO

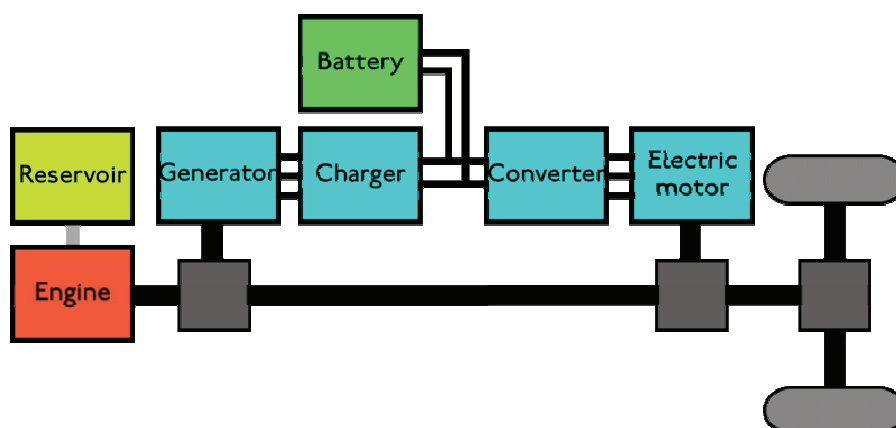


Figura 1.3 Schema di un ibrido misto

Gli *ibridi misti* sono caratterizzati da un nodo meccanico, come negli ibridi paralleli, e da un nodo elettrico, come negli ibridi serie. Come questi ultimi, presentano due macchine elettriche. La modalità costruttiva per realizzare tale doppio accoppiamento può variare. Un esempio relativamente semplice è dato dall'architettura della Toyota Prius (vedi par.4.3.1), che realizza l'accoppiamento meccanico tra il motore termico, le due macchine elettriche e l'albero di trasmissione finale attraverso la combinazione di un rotismo epicicloidale ed un riduttore.

Capitolo 2

Accumulatori elettrici

2.1 Caratteristiche e tipologie

Le caratteristiche che contraddistinguono i sistemi di accumulo dell'energia elettrica a bordo veicolo sono i seguenti:

1. *Efficienza.* E' una misura di quanta energia viene effettivamente restituita dalla batteria dopo che è stata caricata. Tutte le batterie in uso sono abbastanza buone in questo senso; con rese di almeno il 70%, ma alcune sono ancora migliori.
2. *Densità di energia.* Una misura di quanta energia può accumulare la batteria per unità di massa. Questo parametro è, ovviamente, importantissimo per un veicolo stradale ed è uno dei limiti principali delle attuali batterie, in particolar modo di quelle al piombo. La densità di energia viene misurata di solito in Wh/kg o kWh/kg
3. *Densità volumetrica di energia.* Una misura dell'energia che può accumulare la batteria per unità di volume. Questo è un parametro forse meno importante della densità per unità di massa, ma le batterie di un veicolo non possono comunque essere troppo voluminose e ingombranti.
4. *Durata di vita.* Tutte le batterie si degradano gradualmente via via che vengono utilizzate. Il numero di cicli ammissibile determina la vita media di una batteria. Questo ne influenza, ovviamente, il costo e le problematiche legate allo smaltimento.
5. *Tempo di ricarica.* Un parametro molto importante per un veicolo ibrido così come per uno elettrico. Meno tempo ci vuole per ricaricare, più è pratico l'uso del veicolo.
6. *Autoscarica.* Tutte le batterie perdono progressivamente un po' di carica quando sono lasciate ferme. Questo non è normalmente un problema, ma può diventarlo se il veicolo deve essere lasciato fermo per un tempo molto lungo, parecchi mesi per esempio. L'effetto può essere veramente distruttivo per quei tipi di batteria che vengono danneggiati da scariche profonde.

7. *Costo*. Questo è un parametro importantissimo, che dipende sia dai materiali utilizzati sia dalla vita media della batteria. Una batteria costosa può essere accettabile se dura a lungo. Viceversa, si può accettare di dover cambiare una batteria spesso, posto che costi poco.

Per gli accumulatori che sfruttano processi elettrochimici, esistono molti tipi differenti:

Piombo

La batteria al piombo ci accompagna ormai da più di un secolo, anche se non è certamente la soluzione ottimale per il trasporto elettrico. Il piombo è uno degli elementi più densi che esistono e il risultato è che le batterie al piombo sono molto pesanti. Ci sono altri inconvenienti delle batterie al piombo, sono sensibili al caldo e al freddo, contengono acido solforico, che è corrosivo e pericoloso; in più richiedono parecchie ore per la ricarica. Forse il problema principale è la loro durata limitata; nella pratica non amano quello che viene chiamata la “scarica profonda”, ovvero sfruttare tutta l'energia contenuta per poi essere ricaricate. Una batteria al piombo, in media, regge circa 300 cicli di scarica profonda prima che diventi inutilizzabile.

Nichel-cadmio (Ni-Cd)

Le batterie al NiCd sono state uno dei primi tentativi di superare i limiti delle batterie al piombo per veicoli elettrici. In effetti, hanno una densità di energia maggiore di quella delle batterie al piombo, si ricaricano molto più velocemente (basta all'incirca un'ora) e hanno una durata di vita che può arrivare a 800-1000 cicli.

Le batterie al NiCd hanno principalmente due controindicazioni; il primo è che il cadmio è molto tossico, quindi ci sono problemi con la gestione delle batterie usate. Il secondo è il cosiddetto “effetto memoria” che fa sì che la batteria si ricordi di quanto è stata scaricata nei cicli precedenti e si genera una forte caduta di voltaggio in quel punto.

La questione dell'effetto memoria è controversa e non è universalmente riconosciuta, c'è chi nega che esista o che ritenga sia un problema risolvibile. Le batterie al NiCd, a oggi, non si usano quasi più.

Nichel-metallo idruro (Ni-MH)

Sono la tipologia di accumulatori che ha sostituito quella al NiCd ed è stata alla base dello sviluppo dei dispositivi elettronici portatili fino a non molto tempo fa. La densità energetica delle batterie Ni-MH è superiore a quella delle batterie al NiCd di un fattore circa una volta e mezzo, o anche doppio in certi casi. Si caricano anche abbastanza rapidamente e reggono un migliaio di cicli e anche di più. Un inconveniente, non particolarmente grave, è l'autoscarica, leggermente superiore a quello delle NiCd; un altro è la sensibilità alle alte temperature. Il principale ostacolo al loro utilizzo nel settore della mobilità è rappresentato dal

costo elevato. Questo è dovuto al fatto che contengono al loro interno anche terre rare e quindi materiale costoso. Le batterie al Ni-MH sono state utilizzate su alcuni veicoli ibridi prodotti.

Sodio -cloruro di nichel (batterie “zebra”)

Queste batterie sono di origine militare, le si usavano, e le si usano tuttora, nei sommergibili e per delle buone ragioni. Sono eccellenti batterie, leggere e che durano molti anni. Si ricaricano alla svelta, sono robuste, hanno tantissimi vantaggi. Il loro problema sta nel fatto che funzionano soltanto ad alta temperatura, intorno ai 300 gradi. Se questo non è un problema per un sommergibile, la cosa diventa difficilmente gestibile per una normale autovettura. Queste batterie sono ancora un po' costose ma potrebbero rivelarsi una tecnologia importantissima per il trasporto pesante e per mezzi pubblici tipo autobus e comunque per veicoli che non rimangono a lungo inutilizzati.

Litio (litio ioni o litio polimeri)

La batteria al litio usa il metallo più leggero che esista, il litio come mezzo di stoccaggio dell'energia.

Il tipo più comune è quello detto “litio-ioni” dove lo stesso ione litio si muove tra due elettrodi diversi, uno di grafite, l'altro di ossido metallico, tipicamente cobalto. La batteria al litio-polimeri è più recente e non ancora comune, anche se un modello commerciale viene prodotto in corea dalla Kokam. Come si evince dal nome, questa batteria usa polimeri solidi come elettrolita. Ha il grosso vantaggio di essere completamente solida, ovvero è robusta e, in certi modelli, anche meccanicamente flessibile. Le litio-ioni e le litio-polimeri sono le batterie con la più alta densità di energia esistenti, si ricaricano alla svelta e durano a lungo. Gli unici inconvenienti imputabili a questo tipo di batterie sono il costo elevato e la necessità di mantenere condizioni di temperatura controllate durante il loro funzionamento (vedi par.2.3).

	NiCd	NiMH	Piombo acido	Li-ioni	Li- polimeri	Na-NiCl ₂
Densità energetica (Wh/Kg)	45-80	60-120	30-50	110-160	100-130	120
Numero cicli (fino all'80% della capacità iniziale)	500	1000-1200	200-300	500-1000	1200-1500	1000
Tempo di ricarica	1h	2-4h	8-16h	2-4h	2-4h	4-8h
Autoscarica (per mese a T ambiente)	20,00%	30,00%	5,00%	10,00%	10,00%	14% al giorno per mantenere la temperatur a
Temperatura di utilizzo	-40 + 60°C	-20 +60° C	-20 +60° C	-5 +60° C	0 +60°C	300°C

Tabella 2.1 Caratteristiche batterie elettriche

2.2 Batterie Piombo-Carbonio

Le batterie utilizzate per i veicoli micro-ibridi devono presentare una buona caratteristica dinamica di carica e una predisposizione per i cicli di stop & start. Inoltre quando il motore viene spento, durante l'utilizzo del veicolo, le batterie devono fornire la potenza necessaria a tutte le funzioni della vettura.

Le normali batterie al piombo, anche quelle più avanzate, non sono la soluzione ottimale per lo stoccaggio dell'energia nei veicoli micro-ibridi a causa della loro scarsa efficienza nei cicli stop & start e nella dinamica di carica.

Axiom Power International ha sviluppato una nuova tecnologia basata sul carbonio (PbC) che, presentando caratteristiche migliori su questi aspetti, si presta egregiamente all'utilizzo sui veicoli ibridi e presenta il vantaggio di riuscire a soddisfare i carichi delle funzioni accessorie dei veicoli. [2]

Il ruolo delle normali batterie al piombo è quello di provvedere all'avviamento del motore, all'illuminazione e all'iniezione del combustibile (SLI: Starting, Lighting, Ignition).

Le batterie per le applicazioni SLI sono mantenute al 100% della carica per

evitare la formazione di solfato di piombo con conseguenze negative sulla corrosione e sulla manutenzione del prodotto.

Le batterie impiegate sui veicoli che utilizzano funzioni integrate di stop & start e recupero di energia dalla frenata devono essere predisposte per forti riduzioni di carica e rapide ricariche, inoltre le batterie non sono mai riportate a un livello di ricarica piena.

Gli accumulatori al piombo in condizioni di carica parziale presentano una formazione di solfato di piombo sull'elettrodo negativo che viene generato durante la fase di scarica durante la quale il piombo sul polo negativo si ossida (perdita di elettroni) e forma ioni solubili di piombo che si combinano con il solfato.

Durante la ricarica questi cristalli di solfato di piombo devono prima dissolversi per riformare ioni di piombo solubili ("dissoluzione"), poi gli ioni si riducono (guadagno di elettroni) per tornare allo stato di piombo ("deposizione").

Questo processo in due fasi limita la possibilità di ricarica delle batterie al piombo perché la disponibilità degli elementi intermediari della reazione (ioni di piombo solubili) è ridotta.

Inizialmente i cristalli di solfato di piombo sono caratterizzati da dimensioni ridotte e ampia superficie e in questo stato si dissolvono facilmente (vedi fig.2.1).

In seguito ai cicli di scarica/ricarica essi aumentano la loro dimensione e la loro dissoluzione diventa più difficile.

Questo cambiamento nella morfologia dei solfati limita il numero di ioni solubili disponibili durante la ricarica e porta a ridurre la capacità di ricarica e la sua durata.

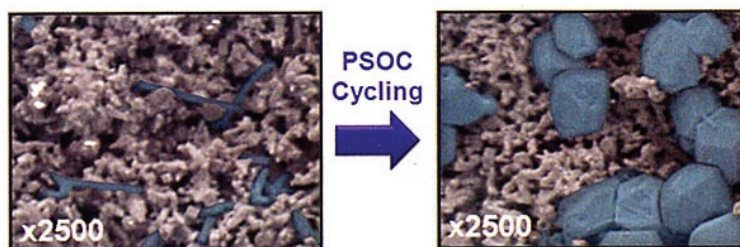


Figura 2.1 I cristalli di solfato di piombo aumentano la loro dimensione durante i cicli di ricarica parziale nelle batterie al piombo-acido (nota: le immagini al microscopio elettronico sono in scala di grigio; il colore blu è stato aggiunto per evidenziare i cristalli)

Maggiore sarà la corrente di ricarica, più velocemente la batteria tornerà al proprio stato di carica completo e sarà quindi pronta per il successivo ciclo di stop & start. In altre parole, più velocemente la batteria può essere caricata (idealmente attraverso la frenata rigenerativa), più vi sarà disponibilità ai cicli stop & start con il risultato di un incremento dell'efficienza dell'uso del combustibile e una proporzionale riduzione di emissioni di CO₂.

La base della batteria PbC è una combinazione tra un elettrodo positivo di una convenzionale batteria al piombo e un supercapacitore con carbonio attivato come elettrodo negativo.

La reazione sull'elettrodo positivo rimane quella ad alto contenuto energetico di transizione di fase dal biossido di piombo al solfato di piombo, mentre l'accumulo di energia sull'elettrodo negativo è basato su un processo altamente reversibile di assorbimento elettrostatico di ioni sulla superficie del carbonio che non implica le fasi di dissoluzione/deposizione.

Per questo la batteria PbC permette di ottenere una velocità di ricarica elevata e una maggiore durata del prodotto.

Nei test eseguiti si sono riscontrate velocità di ricarica da 5 a 10 volte superiori dopo un periodo di funzionamento equivalente del veicolo da 2 a 9 mesi.

L'architettura costruttiva delle batterie PbC è basata sui componenti, le tecnologie di lavorazione e produzione utilizzate per le convenzionali batterie al piombo e alcuni componenti critici (elettrodi positivi, coperchi, elettroliti, ...) risultano identici a quelli finora prodotti, l'unico componente nuovo risulta essere l'elettrodo negativo.

Questo permette una rapida industrializzazione delle nuove batterie.

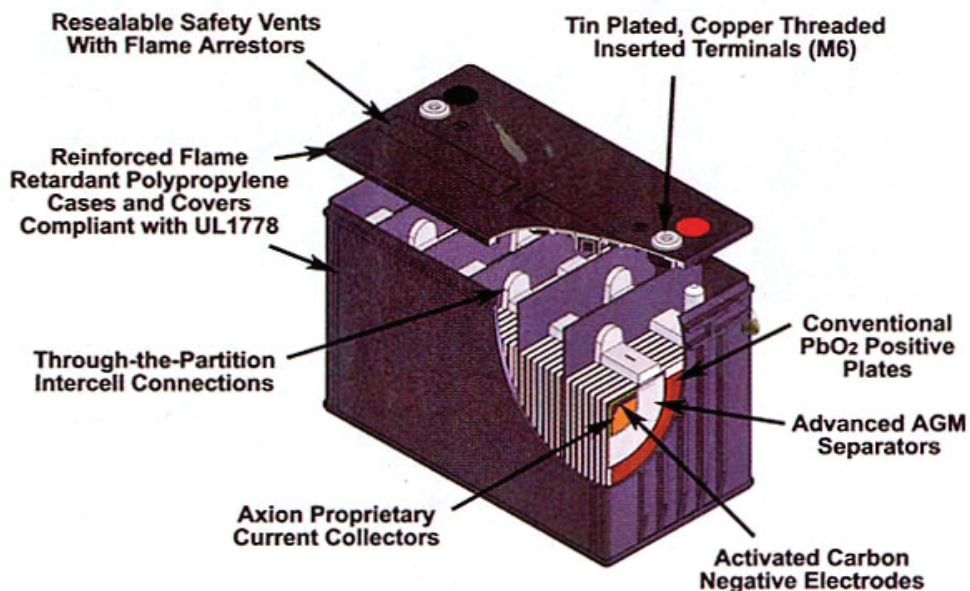


Figura 2.2 Architettura costruttiva delle batterie PbC

2.3 Batterie agli ioni di litio

Le batterie agli ioni di litio sono leggere, compatte e possono lavorare con una tensione dell'ordine di 4 V per cella con una energia specifica compresa tra 110 Wh/kg e 160 Wh/kg.

L'accumulatore al litio è l'ultima e più promettente generazione di accumulatori per le applicazioni più diverse, in particolare quelle dei veicoli elettrici e ibridi. Infatti, il litio è un metallo alcalino, terzo elemento della scala periodica, con modesto peso atomico, una notevole reattività ed il potenziale elettrochimico più negativo rispetto all'elettrodo standard ad idrogeno: le batterie con tecnologia al litio hanno conseguentemente alta tensione e densità di potenza ed energia, che le rendono notevolmente vantaggiose rispetto a quelle di altre tecnologie (come evidenzia la Figura 2.4) e particolarmente adatte all'uso nei veicoli elettrici ed ibridi. Con i materiali per gli elettrodi attualmente usati, l'intervallo della tensione di esercizio delle batterie è approssimativamente da 2,7 a 4,2 V; la tensione di scarica (media) nominale è circa 3,6 V e la maggior parte della capacità utile viene resa tra 4,0 e 3,5 V. [23]

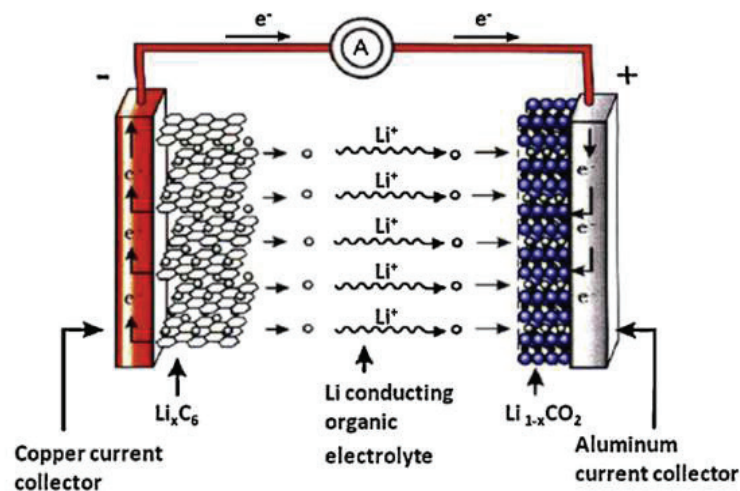


Figura 2.3 *meccanismo di funzionamento delle batterie Li-ion*

Il meccanismo di funzionamento delle batterie al litio-ione si basa sulla migrazione di ioni di litio che vengono ciclicamente estratti e introdotti in una matrice ospite (il cosiddetto “elettrodo ad intercalazione”) durante i processi di carica e scarica. Parallelamente alla migrazione degli ioni avviene la riduzione/ossidazione della matrice ospite, che provoca il flusso esterno di elettroni (Figura 2.3).

Le batterie al litio utilizzano una varietà di materiali elettrodici ed elettrolitici, dando vita ad un elevato numero di coppie elettrochimiche, e conseguentemente ad una classe di prodotti “al litio”, oggi commercialmente disponibili od in fase di avanzata ricerca e sviluppo. La scelta dei materiali anodici e catodici e dell’elettrolita determina la tensione di lavoro ed ha effetto sull’energia specifica della singola cella: la maggior parte delle celle a litio supera facilmente i 3 V di tensione a vuoto.

Materiali catodici.

Attualmente i materiali più promettenti per la costruzione del catodo (elettrodo positivo) sono ossidi di Mn, Ni, Co, i quali presentano una struttura cristallina piuttosto aperta con canali e spazi all’ interno dei quali si inseriscono facilmente gli ioni di litio, ma presentano minore affidabilità e sicurezza rispetto al Ferro Fosfato.

La tecnologia delle batterie al litio è ancora in fase di sviluppo: le ricerche si sono focalizzate principalmente sullo sviluppo di materiali catodici. I materiali catodici tipicamente hanno capacità di accumulare carica (in forma di litio), per unità di massa e di volume, che è significativamente inferiore a quella dei materiali disponibili per formare l’elettrodo positivo. Quindi i maggiori miglioramenti di prestazioni, in termini di più grandi densità di energia e di potenza, devono essere ottenuti dallo sviluppo dei materiali catodici.

Diossido di Cobalto

Il diossido di cobalto - LiCoO_2 - è stato il materiale catodico più ampiamente usato per molti anni. Esso ha buona capacità di accumulare gli ioni litio, buona reversibilità elettrochimica, fornisce una densità di energia ed un numero di cicli moderati. Ha adeguata stabilità chimica ed una buona stabilità termica, anche se è meno termicamente stabile rispetto ad altri ossidi metallici o al fosfato e ciò lo rende altamente combustibile in caso di estreme condizioni d’abuso: la penetrazione di una cella o valori di corrente troppo alti, possono generare un aumento incontrollato di temperatura o anche l’incendio. Inoltre è relativamente più costoso per kWh di energia accumulata rispetto ad altri ossidi. Queste caratteristiche lo rendono non attraente per l’uso nei veicoli elettrici ed ibridi.

Ferro Fosfato

La tecnologia basata sul ferro fosfato - LiFePO_4 – denominato **LFP**, possiede una elevata stabilità termica e chimica che fornisce caratteristiche di maggior sicurezza rispetto alle altre tecnologie litio-ione. Le celle ferro fosfato sono incombustibili nell’eventualità di errori di gestione durante la carica o scarica, sono più stabili in condizioni di sovraccarica o di corto circuito e possono resistere ad alte temperature. Quando avviene un abuso, il materiale catodico a base di

fosfato non rilascia ossigeno, non brucia ed è molto meno suscettibile ad un aumento incontrollato della temperatura.

Le celle ferro fosfato hanno una densità di energia inferiore a quelle al cobalto. In compenso possono sopportare più alte correnti e quindi più alte potenze, offrono una vita più lunga e costituiscono un significativo miglioramento in termini di costo, sicurezza e tossicità.

Ossido di Manganese Spinello

L'ossido di manganese (LiMn_2O_4 o, più propriamente, $\text{Li}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$), denominato **LMO**, ha struttura a spinello. Rispetto alle chimiche basate sul cobalto è termicamente e chimicamente più stabile, in virtù della stabilità intrinseca della sua struttura cristallina, ed anche la potenza è superiore, grazie alla migliorata capacità d'inserzione dello ione litio nella struttura. Invece la densità di energia e la ciclabilità sono inferiori. Il Manganese, a differenza del cobalto, è un materiale catodico sicuro e rispettoso dell'ambiente. Altri benefici includono costi più bassi, che renderanno l'LMO attraente se avranno successo gli sforzi per stabilizzare il materiale contro la dissoluzione elettrochimica del manganese nell'elettrolita.

Ossido di Nichel

L'ossido di nichel (LiNiO_2) ha una capacità specifica ed un potenziale molto più alti rispetto al cobalto, ma ha molti problemi di sicurezza ed è molto meno stabile. Per ottenere un compromesso di prestazioni, costo e sicurezza, può essere stabilizzato con aggiunta di cobalto ed alluminio, formando il composto LiNiCoAlO_2 , chiamato **NCA**, oppure cobalto e manganese, formando il composto $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$, sufficientemente stabili per essere usati negli accumulatori.

Complessivamente la capacità e la densità di energia sono superiori a quelle del LiFePO_4 e del LiCoO_2 . In termini di densità di potenza le prestazioni elettrochimiche sono migliori di quelle del LiCoO_2 , ma non sono così alte come quelle del LiFePO_4 .

Materiali anodici.

Grafite

Per l'anodo (elettrodo negativo) è molto utilizzata la grafite. La grafite presenta una struttura a strati, con piani di atomi disposti in strutture esagonali fortemente legati tra loro, mentre i vari piani sono tenuti assieme da legami deboli. Dal momento che gli ioni di Litio si legano più debolmente alla grafite che agli ossidi metallici, il loro spostamento verso il catodo durante la scarica è energeticamente favorito. Durante la carica questa tendenza è invertita.

Titanato di litio

Anodi al titanato di litio sono recentemente divenuti commercialmente disponibili. In questo tipo di anodo, si sostituisce la grafite con il titanato di litio. Questo anodo è compatibile con tutte le tipologie di catodo suddette, ma è generalmente usato in congiunzione con materiali a base di manganese. Il titanato di litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), denominato **LTO**, offre potenza elevata combinata con un ampio range delle temperature di esercizio dovuto ad una grande stabilità termica, ed è considerato un'alternativa più sicura all'anodo in grafite. Si aggiunge una notevolissima ciclabilità ed accelerati tempi di ricarica. Questo è in gran parte dovuto alla struttura del materiale ed alla sua quasi nulla deformazione durante il ciclaggio, che si traduce in una lunghissima vita dell'accumulatore rispetto alle batterie di altre tecnologie. Nessuna interazione indesiderata avviene con l'elettrolita: questo consente alla batteria di essere caricata molto rapidamente, senza il rischio di corto circuiti o fuga termica.

D'altro verso, l'energia delle batterie con anodo litio titanato risulta essere leggermente inferiore rispetto a quella delle batterie con anodo basato sulla grafite.

Elettrolita.

Elettrolita in soluzione liquida

L'elettrolita è usualmente una soluzione di sale di litio (solitamente LiFP_6) dissolto in un solvente organico non acquoso, capace di sciogliere il sale di litio e trasportare corrente mediante ioni di litio. I separatori sono usualmente membrane microporose fatte di polietilene o polipropilene. A causa della bassa conducibilità degli elettroliti organici, un'adeguata potenza della cella o della batteria può essere ottenuta solamente con elettrodi e separatori che sono molto più sottili di quelli usati nelle batterie con elettroliti acquosi. La necessità di elettrodi sottili ha determinato che l'avvolgimento a spirale dell'elettrodo positivo, il separatore e l'elettrodo negativo è divenuto il metodo preferito per la fabbricazione delle celle ioni litio, ma stanno ora ricevendo consensi configurazioni di cella piatta impacchettata in involucri in plastica (spesso metallizzata).

Elettrolita polimerico

Le batterie al litio polimero si differenziano da quelle convenzionali nel tipo di elettrolita usato. Il progetto originale usava un elettrolita polimerico solido secco. Questo elettrolita somiglia ad un film plastico che non conduce l'elettricità ma consente lo scambio ionico. L'elettrolita polimerico sostituisce il tradizionale separatore poroso, che è imbevuto con l'elettrolita. Il progetto del polimero secco offre semplificazioni a riguardo della costruzione, robustezza, sicurezza e geometria con spessore sottile. Sfortunatamente, il polimero secco garantisce bassa conducibilità. La resistenza interna è troppo alta e non è possibile

consegnare le alte correnti richieste dalle moderne applicazioni. Per compromesso, sono stati aggiunti alcuni elettroliti gelificati. Le celle commerciali usano un separatore/elettrolita a membrana preparato dallo stesso polietilene poroso tradizionale o separatore polipropilenico riempito con un polimero, che gelifica sostituendo l'elettrolita liquido. Così le celle commerciali al litio-ione polimero sono molto simili nella chimica e nei materiali alle loro controparti con elettrolita liquido e rispetto ad esse presentano i vantaggi di avere un profilo molto basso, fattore di forma flessibile (i costruttori non sono vincolati da formati di cella standard), leggerezza (l'elettrolita gelificato semplifica il packaging), sicurezza (maggiore resistenza alla sovraccarica, minori possibilità di perdita di elettrolita). Nonostante tali vantaggi, la tecnologia litio-ione polimero non si è diffusa tanto velocemente come era nelle attese. Infatti, la sua superiorità rispetto agli altri sistemi e i bassi costi di fabbricazione non sono stati pienamente realizzati: rispetto alla tecnologia litio-ione tradizionali, la capacità è lievemente inferiore e permane un alto rapporto costo – energia.

Si riportano di seguito i vantaggi e gli svantaggi derivanti dall'impiego di batterie al litio:

Vantaggi.

- Alta tensione di cella, fino a 3,7 V nominali, diretta conseguenza del potenziale altamente negativo del litio. Ciò significa che, per una data tensione di batteria, sono necessarie un minor numero di celle ed associate connessioni ed elettronica per sistemi batterie ad alta tensione (una cella al litio può sostituire tre celle al NiCd o NiMH, che hanno una tensione di soli 1,2 V).
- Massa ridotta.
- Densità di energia molto alta (circa quattro volte meglio delle piombo acido), come conseguenza dell'alta tensione di cella, e densità di potenza molto alta. L'alta densità di potenza ed energia sono una conseguenza dell'esiguo spessore delle celle.
- La piccola dimensione consente l'intercalazione elettrochimica reversibile degli atomi di litio negli elettrodi negativi a base di carbonio, con piccolo sforzo e stress strutturale. Analogamente, le dimensioni molto piccole dello ione litio rendono quest'ultimo facilmente e reversibilmente incorporabile in una varietà di ossidi che formano l'elettrodo positivo. Queste caratteristiche mantengono l'integrità degli elettrodi durante i cicli di carica – scarica, requisito chiave per i cicli vita, specialmente quelli con scarica profonda: le batterie possono essere ciclata con intensi DOD senza influenzare negativamente il ciclo vita o l'abilità a fornire alta potenza di uscita.
- Possibilità di ottimizzazione per applicazioni che richiedono energia o potenza. Le celle per batterie al litio si dividono in celle per applicazioni di

energia e celle per applicazioni di potenza: queste ultime hanno un rapporto superficie/volume più grande delle precedenti in modo da dissipare il maggiore calore prodotto.

- Possibilità di scarica ad un alto rate di corrente (attualmente sono disponibili sul mercato batterie che consentono scariche fino a 40 volte il valore della corrente nominale). L'alto rate di scarica significa che per l'uso automotive la potenza richiesta per l'avviamento a freddo o la potenza di spinta per veicoli ibridi può essere fornita da una batteria di capacità inferiore.
- Possibilità di ricarica rapida.
- Autoscarica molto bassa ($3 \div 5\%$ al mese), circa la metà rispetto alle batterie al nickel.
- Efficienza coulombiana (rapporto tra capacità in scarica e capacità in carica) molto alta, pari quasi al 100%: quindi si perde molta poca capacità durante il ciclaggio carica – scarica.
- Alta efficienza energetica.
- No effetto memoria.
- Bassa manutenzione.
- Possibilità di esecuzione di micro cicli.
- Lunga vita. Il ciclo vita può essere significativamente esteso usando circuiti di protezione per limitare i possibili DOD della batteria. Ciò compensa gli alti costi iniziali della batteria.
- Disponibilità di un ampio intervallo di valori di capacità (da 50 mAh fino a 1000 Ah) e di un ampio numero di produttori.

Svantaggi

- E' necessario un circuito elettronico di protezione per mantenere tensione e corrente nei limiti di sicurezza in quanto le batterie al litio non tollerano la sovraccarica e la sovrascarica.
- E' necessaria una gestione termica per mantenere la temperatura nel campo di valori definiti dal costruttore ed evitare la deriva termica. La temperatura influenza notevolmente sicurezza, prestazioni e vita delle batterie. Quindi è essenziale una gestione termica per raggiungere le desiderate prestazioni e vita, specialmente nel caso di grandi pacchi batterie e sistemi. In un veicolo elettrico, è possibile che le batterie debbano essere scaldate durante l'esercizio a freddo e raffreddate durante l'esercizio a caldo.
- Le batterie sono soggette ad invecchiamento, anche se non in uso (il mantenimento in un luogo fresco al 40% di carica riduce l'effetto di invecchiamento).
- La sovraccarica può danneggiare le batterie ed originare condizioni rischiose, includendo la perdita di gas ed il rilascio di vapori infiammabili del solvente elettrolitico. Per evitare la sovraccarica, le batterie agli ioni di

litio richiedono accurato controllo della tensione di ogni singola cella. L'accurato ed affidabile controllo della tensione di cella e temperatura è quindi un requisito essenziale per la lunga vita e la sicurezza delle batterie litio-ioni per tutti gli usi, ma in particolare per applicazioni automotive.

- Restrizioni nei trasporti: le spedizioni di grandi quantità di batterie sono soggette a normativa.

Applicazione al settore automotive

La tecnologia delle batterie agli ioni di litio (Li-ion) e la loro applicazione su veicoli ibridi, plug-in ed elettrici puri sta maturando e giocherà presto un ruolo importante per la crescita delle vendite di questi veicoli. [3]

La produzione di massa è stata raggiunta con la vettura *Mercedes-Benz S400 hybrid* e batterie agli ioni di litio sono state utilizzate per la *Tesla Roadster*, vettura sportiva con produzione limitata.

Dall'introduzione della tecnologia Li-ion nel settore automotive si è passati dalla capacità di 1200 mAh delle prime celle, introdotte da Sony nel 1991, a quella di 2900 mAh nel 2008.

Oltre alla richiesta di grandi dimensioni per avere maggiore energia totale occorre considerare che le batterie per i veicoli sono esposte a dei valori di temperature operative molto diversi rispetto a quelle utilizzate nel settore elettronico.

A valori molto bassi di temperatura la potenza fornita si riduce mentre ad alti valori di temperatura le batterie agli ioni di litio riducono il proprio periodo di vita utile.

Questo secondo aspetto è molto importante nel settore dei veicoli ibridi dove il cliente si aspetta una durata della vita utile delle batterie di una decina d'anni e durante questo periodo si dovranno sostenere centinaia, migliaia e anche un milione di cicli di carica/dscarica.

A causa di questo elevato numero di cicli le batterie utilizzano circa solo il 20% della loro capacità per poter prolungare la vita utile delle celle.

Diversamente i veicoli elettrici saranno caricati molto meno frequentemente, circa 3000 volte in dieci anni di utilizzo e le celle delle loro batterie usano intorno all'80% della propria capacità.

Per avere un'idea degli obiettivi da raggiungere per la durata delle batterie si può ipotizzare un periodo maggiore di 12 anni di utilizzo con percorrenze di 240.000 km.

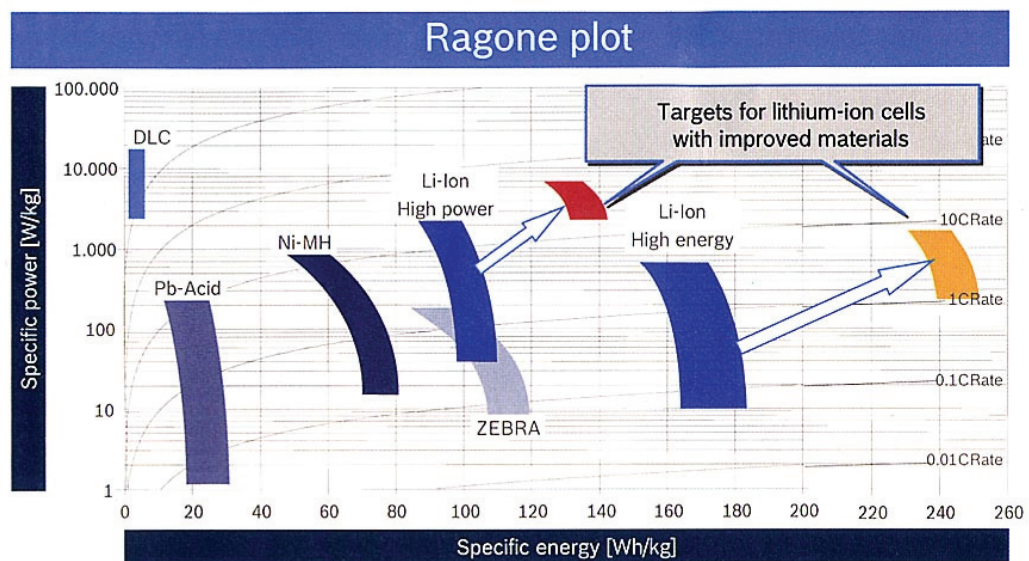


Figura 2.4 Caratteristiche delle batterie e possibili sviluppi delle batterie agli ioni di litio

Per evitare problemi di surriscaldamento i produttori stanno cercando di migliorare diversi aspetti come piccoli sistemi elettronici per gestire le celle individualmente, separatori di celle resistenti e durevoli nel tempo, elettroliti che riducano il rischio di surriscaldamento, prodotti chimici che producano meno ossigeno all'interno delle celle per evitare pericoli di incendio, migliori sistemi di raffreddamento e un assemblaggio flessibile meno sensibile all'aumento di pressione dovuto alla produzione di gas all'interno delle celle.

Il costo delle batterie al litio è ancora molto alto e si attesta intorno ai 500 €/kWh ma si prevede che per il 2015 si possano produrre batterie ad un costo di circa 350 €/kWh.

In termini di costo, il componente più caro della batteria è il materiale delle celle che viene importato dall'Asia.

Importanti riduzioni di costo si potranno ottenere sviluppando un sistema di approvvigionamento nazionale.

Un altro modo per ridurre i costi è quello di ridurre la necessità di raffreddamento della batteria in modo da semplificare il sistema di raffreddamento.

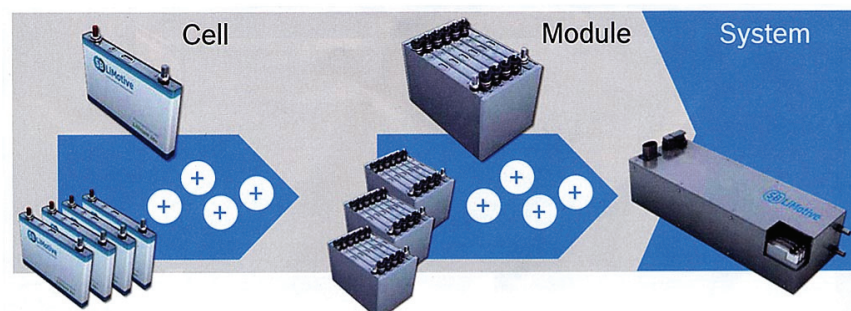


Figura 2.5 Componenti delle batterie Li-ion

Controllo della temperatura

Le batterie agli ioni di litio richiedono un particolare sistema di controllo della temperatura (raffreddamento e riscaldamento). [4]

Sebbene siano presenti differenze all'interno delle varie tipologie costruttive, in generale durante il loro funzionamento vanno evitate temperature superiori ai 60°C in ricarica e ai 40°C in utilizzo e vi è una sensibile riduzione nel potenziale di scarica/ricarica a temperature inferiori ai -5°C.

Temperature all'esterno di questo range di funzionamento danneggiano irreversibilmente le celle di litio e riducono la vita utile del componente.

Nei veicoli elettrici questo si traduce in un ridotto apporto elettrico per la trazione mentre nei veicoli ibridi può portare anche ad un guasto del sistema.

La gestione termica delle batterie assicura un corretto funzionamento del veicolo e riduce le perdite delle batterie che sono componenti costosi particolarmente negli ibridi plug-in e nelle vetture elettriche.

Raffreddamento

In estate le temperature dell'aria esterna possono raggiungere valori troppo vicini ai 40° C massimi consentiti per poter raffreddare le batterie con la sola ventilazione, occorre quindi prevedere un sistema di raffreddamento che può utilizzare aria condizionata, lo stesso liquido refrigerante o un circuito di raffreddamento dedicato.

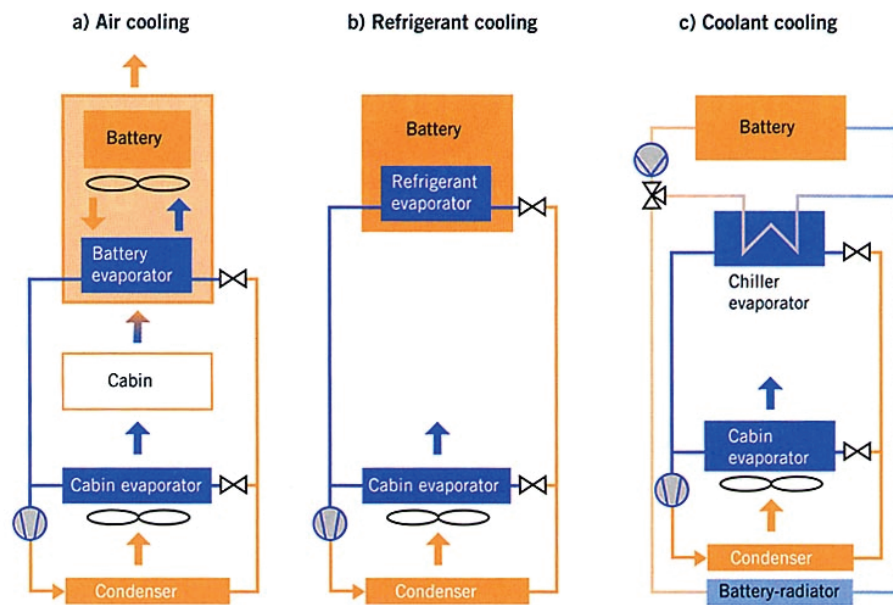


Figura 2.6 Schemi dei differenti metodi di raffreddamento delle batterie

Sistema di raffreddamento con aria condizionata

L'aria condizionata viene fatta scorrere attraverso la batteria lambendo le celle e viene poi spesso scaricata, riscaldata dal processo, direttamente all'esterno della vettura.

Questo semplice metodo di raffreddamento necessita di un sistema di filtraggio per evitare eventuali danneggiamenti o perdite di efficienza e ha principalmente i seguenti svantaggi:

- necessità di larghi condotti per portare l'aria alla batteria e per espellerla.
- Il peso del ventilatore
- Rumore del ventilatore
- L'utilizzo dell'aria condizionata del veicolo mette in contatto diretto il volume occupato dalle persone e la batteria ponendo problemi di sicurezza
- Conflitto tra comfort interno vettura e necessità di raffreddamento batteria

Per ovviare a quest'ultimo inconveniente è possibile installare un'unità di condizionamento separata dedicata alla batteria come mostrato in fig 2.6, part. a). Questa soluzione aumenta il peso e le dimensioni del sistema ma offre il vantaggio di poter utilizzare aria ricircolata con la conseguente eliminazione dei filtri.

Il sistema di raffreddamento con aria condizionata viene utilizzato principalmente nei veicoli con sufficiente spazio a disposizione come ad esempio gli sport utility vehicles (SUV).

Sistema di raffreddamento con refrigerante

E' il sistema più compatto per il raffreddamento delle batterie.

Un evaporatore compatto è installato all'interno della batteria ed è in contatto a livello di conduzione termica con le celle di ioni di litio, fig 2.6, part. b).

Sono necessari solo due tubi aggiuntivi per collegare la batteria al circuito refrigerante e l'evaporatore della batteria è posto in parallelo rispetto all'evaporatore principale usato per raffrescare l'interno della vettura.

Per poter gestire separatamente le due esigenze di raffreddamento viene utilizzato un compressore elettrico a velocità variabile che rende molto più agevole il controllo di processo rispetto alla soluzione tradizionale di compressore comandato meccanicamente tramite una cinghia.

La potenza aggiuntiva per far funzionare il circuito di raffreddamento della batteria è molto bassa paragonata alla potenza necessaria per raffrescare l'interno della vettura.

Questa tipologia di raffreddamento è generalmente usata in veicoli che hanno poco spazio a disposizione e dove la potenza aggiuntiva richiesta non limita l'efficienza del veicolo.

Sistema di raffreddamento con circuito dedicato

È il metodo più flessibile e allo stesso tempo, è molto efficiente energeticamente se viene aggiunto uno scambiatore che possa funzionare quando la temperatura dell'aria esterna è sufficientemente bassa,; fig 2.6, part. c).

Le temperature del circuito secondario sono comprese generalmente tra 15°C e 30°C. Rispetto al precedente sistema presenta degli ingombri maggiori dovuti ai componenti aggiuntivi necessari (chiller, pompa, tubi circuito secondario, scambiatore, valvola deviatrice).

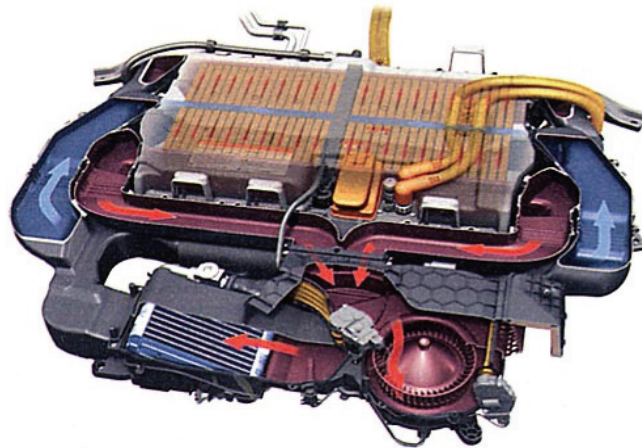


Figura 2.7 pacco batterie dell'Audi Q5 Hybrid, con un circuito di raffreddamento ad aria e uno a liquido [6]

Riscaldamento

Per evitare marcate riduzioni delle prestazioni delle batterie e danneggiamenti durante la ricarica è importante che la temperatura delle celle non scenda al di sotto dei valori previsti.

Anche per i sistemi di riscaldamento non esistono soluzioni standard ma vengono utilizzati diversi metodi a seconda delle specifiche richieste di ciascuna applicazione.

È possibile riscaldare direttamente la batteria attraverso un sistema elettrico o tramite un circuito secondario che può a sua volta sfruttare diverse fonti energetiche come l'elettricità o il combustibile nei veicoli ibridi così come il calore proveniente dal motore termico.

I sistemi con circuito secondario possono presentare lo svantaggio di avere un'inerzia termica e un lungo percorso dalla fonte di riscaldamento alla batteria e occorre comunque prevedere un'adeguato isolamento per ridurre le perdite termiche.

Per analizzare le opzioni finora descritte BEHR ha sviluppato un programma di simulazione numerica che possa aiutare a definire il sistema di regolazione termica delle batterie adatto alle varie situazioni considerando sia le caratteristiche della vettura che le situazioni al contorno così come le condizioni di impiego.

Pericolosità della batteria Li-ion

La chimica delle batterie Li-ion non è sicura come le altre: una batteria di questo tipo può esplodere se surriscaldata o caricata eccessivamente.

Una ricerca svolta da scienziati britannici e pubblicata sulla prestigiosa rivista Nature Materials ha evidenziato nei particolari il meccanismo che porta al surriscaldamento degli accumulatori al litio e che ne determina quindi l'intrinseca pericolosità.

Si tratta della formazione sull'anodo (l'elettrodo negativo) di dendriti di litio, sottili cristalli filamentosi dello stesso elemento, che possono creare ponti conduttivi con la carica positiva e arrivare a costituire veri e propri corti circuiti interni all'accumulatore.

In conseguenza di ciò e delle alte intensità di corrente relativa fornibili dalle batterie al litio, si possono determinare perciò forti surriscaldamenti locali, che a loro volta possono generare l'incendio del contenitore o addirittura la sua esplosione.

Il fenomeno ha rappresentato sinora un significativo limite progettuale alla realizzazione di batterie capaci di erogare all'esterno forti intensità di corrente, particolarmente utili nell'autotrazione. Ora, la sua conoscenza intima permetterà lo sviluppo di tecnologie atte a evitare la formazione dei dendriti e a realizzare quindi batterie a prova d'incendio ottimali per l'uso sulle auto elettriche.

Un accumulatore agli ioni di litio richiede quindi diversi sistemi di sicurezza obbligatori al suo interno, prima che si possa considerare sicuro per l'uso comune. Questi includono un interruttore termico (per prevenire il surriscaldamento in caso di sovraccarico) e una valvola di sicurezza (per controllare la pressione interna). Nonostante queste caratteristiche di sicurezza, le batterie Li-Ion sono, al momento, soggette a frequenti richiami in fabbrica; inoltre, i sistemi di controllo occupano spazio utile all'interno delle pile, oltre ad aggiungere ulteriori possibilità di guasto. Di solito, in caso di problemi a questi sistemi, la pila è resa inutilizzabile permanentemente e irreversibilmente.

Le celle della batteria hanno inoltre dei campi di funzionamento in tensione molto rigidi: il superamento dei limiti di tensione può portare ad un danneggiamento irreversibile delle celle, oltre ad un aumento della temperatura che ne può causare l'incendio e l'esplosione. L'esercizio di tali batterie richiede pertanto un controllo continuo dello stato delle singole celle: nei sistemi batterie, composti usualmente da un elevato numero di celle, tale funzione è assicurata da appositi dispositivi elettronici chiamati BMS (Battery Management System). Nei sistemi batterie il

BMS svolge anche una funzione di ottimizzazione delle prestazioni, come sarà mostrato più avanti.

Per i suddetti motivi, le batterie al litio presentano problematiche di sicurezza anche a livello di trasporto, difatti “le celle e le batterie al litio sono elencate nella lista dei materiali pericolosi in base alle raccomandazioni delle Nazioni Unite sul trasporto delle merci pericolose” [23]

Definizione e funzioni del Battery Management System.

Il BMS (Battery Management System) è un sistema elettronico di monitoraggio e gestione delle batterie: esso mantiene un controllo sui parametri fondamentali di esercizio, come tensioni, correnti e temperature, durante le fasi di carica e scarica. In caso di allarme, quando uno qualsiasi dei parametri raggiunge un valore fuori dai limiti consentiti, il circuito elettronico di controllo fornisce gli input ai dispositivi di protezione per scollegare la batteria dal carico o dal caricabatterie. Il BMS comprende non solo il monitoraggio e la protezione del sistema batterie, ma anche metodi per ottimizzarne le prestazioni e prolungare la vita delle celle.

Le prestazioni di un veicolo ibrido dipendono in maniera sostanziale dallo “stato di salute” in cui si trovano le batterie: se non trattate opportunamente, la loro capacità di accumulare energia e la vita in cicli di carica/scarica si possono ridurre notevolmente richiedendone una prematura sostituzione.

I principali fattori di rischio per le batterie, di qualunque tipo esse siano, sono la sovraccarica o la scarica troppo profonda. Il primo fattore può portare alla distruzione della batteria, mentre il secondo può condurre ad una riduzione permanente della capacità massima immagazzinabile. Il controllo dello stato di carica delle batterie (*SOC, state of charge*) è quindi indispensabile oltre che per la scelta delle politiche di gestione del veicolo, per assicurare un corretto utilizzo degli accumulatori. In un veicolo elettrico o ibrido le batterie sono connesse in serie per poter disporre di una tensione di pacco sufficientemente elevata (fino a qualche centinaio di volt). Il controllo dello stato di carica deve essere effettuato per ogni singola cella del pacco. Infatti, inevitabili lievi differenze nelle prestazioni di ogni elemento potrebbero essere amplificate durante la vita, portare a scompensi notevoli nello stato di carica e condurre al deterioramento complessivo del sistema. La soluzione migliore al problema consiste nel predisporre di un sistema di equalizzazione dello stato di carica degli elementi che compongono il pacco batterie. L'equalizzazione ottima si ottiene controllando singolarmente ogni cella all'interno della stringa. In alcuni casi, specie se il numero di batterie da controllare è elevato, si può ricorrere ad una soluzione di compromesso che consiste nel lavorare su piccoli gruppi di elementi per limitare la complessità del circuito di controllo.

Nel seguito verranno analizzate in dettaglio le funzioni principali del BMS: protezione e bilanciamento.

Funzione di protezione

Effetti della tensione

Il solvente dell'elettrolita delle batterie litio-ioni è infiammabile e soggetto alla decomposizione elettrochimica. Durante la carica, sorgono problemi tra i carbonati organici del solvente ed il catodo: valori della tensione di cella superiori a 4,2V possono provocare la generazione e l'accumulo di CO e CO₂: maggiore è la tensione a cui il solvente è sottoposto, maggiore è l'entità della decomposizione e della formazione di CO e CO₂. In aggiunta alla formazione di gas ad alti potenziali di cella, la decomposizione dell'elettrolita genera sottoprodotti polimerici che si depositano sul materiale attivo del catodo. Questi sottoprodotti inquinano la superficie del catodo ed inibiscono il materiale attivo, riducendo le prestazioni e la vita della cella.

Se le valvole di sicurezza della cella o il foglio di alluminio di rivestimento si aprono a causa dell'eccessiva pressione interna provocata dalla decomposizione dell'elettrolita o dall'alta temperatura, i vapori dell'elettrolita organico riempiono il contenitore della batteria. Questi vapori, nel contenitore, possono rappresentare un pericolo, in dipendenza della temperatura di innesco della miscela vapore-aria.

Tecniche di controllo e gestione devono essere usate per evitare gli alti potenziali. Evitando tensioni troppo elevate, infatti, si elimina o per lo meno si riduce la decomposizione dell'elettrolita. Mantenere le batterie al litio al massimo stato di carica (es. 100% SOC = piena carica) provoca una netta diminuzione della vita utile delle stesse e può provocare l'aumento dei rischi correlati alla sicurezza: caricare una batteria al litio ad una certa percentuale di carica (anche elevata), ma non al massimo della carica, rappresenta un modo per aumentare sia la vita utile che la sicurezza della batteria; allo stesso tempo permette di avere a disposizione gran parte della capacità totale (si può tranquillamente arrivare al 95%).

Tecniche di controllo e gestione devono anche prevenire la scarica delle batterie al litio a tensioni troppo basse (2.5 - 2.7 V a cella). A queste basse tensioni di cella, la corrente del collettore può dissolvere il rame nell'elettrolita: ciò formerà delle placche sulle particelle dell'anodo di grafite, le quali inibiranno l'utilizzazione dei materiali attivi e ridurranno le prestazioni e la vita delle celle. Il riproporsi per più volte di questi bassi valori di tensione, può condurre alla formazione di dendriti di rame e provocare corto circuiti all'interno della cella.

Effetti delle correnti

Nelle batterie al litio, adoperare limiti di corrente eccessivi può provocare il danneggiamento permanente delle stesse. Infatti, sottoposto ad alte correnti di carica, il litio può non diffondersi in modo adatto nelle particelle dell'anodo di grafite ed iniziare a placcare con litio metallico la superficie dell'elettrodo. La placcatura produce dei dendriti, i quali possono forare i separatori e formare dei corto circuiti verso il catodo. Questi corto circuiti inizialmente sono deboli,

causano solamente momentanee scariche della cella, le quali provocano un vistoso abbattimento della tensione o un picco di corrente durante la carica. Con il passare del tempo, il numero di questi deboli corto circuiti aumenta, con il conseguente risultato di rendere impossibile la piena carica della cella. La placcatura del litio metallico è molto reattiva nei confronti dell'elettrolita, si avrà perciò una decomposizione dell'elettrolita vicino all'anodo che porterà all'aumento della resistenza interna e un decremento delle prestazioni della cella.

Effetti della temperatura

Durante il funzionamento in bassa temperatura diminuisce la velocità della reazione chimica. L'effetto di ridurre la temperatura di esercizio è quello di ridurre la velocità di trasformazione delle sostanze chimiche attive nella cella: questo si traduce in una riduzione della capacità di trasporto di corrente della cella, sia in carica che in scarica. In altre parole, la batteria riduce la propria capacità di gestione della potenza.

Inoltre, a bassa temperatura, il tasso ridotto di reazione (e anche la contrazione dei materiali dell'elettrodo) rallenta e rende più difficile l'inserimento degli ioni di litio negli spazi di intercalazione. Come accade con il funzionamento di alte correnti, quando l'elettrodo non può accogliere il flusso di corrente si ha conseguentemente la perdita irreversibile della capacità.

Anche l'alta temperatura può comportare diversi problemi che possono provocare la distruzione della cella. In questo caso, l'aumento di temperatura fa ottenere maggiore potenza dalla cella, aumentando la velocità di reazione, ma correnti più elevate danno luogo ad una maggiore dissipazione del calore (I^2R) e quindi anche a temperature più elevate. Questo può essere l'inizio di un feedback positivo di temperatura e, se non viene rimosso il calore più velocemente di quanto viene generato, il risultato sarà un incremento eccessivo della temperatura stessa.

Diverse fasi si hanno prima che la batteria giunga ad avere una temperatura incontrollata e ogni fase si traduce in un danno progressivamente peggiore per la cella:

- La prima fase è la suddivisione di un sottile strato, denominato SEI (Solid Electrolyte Interface), isolante per gli elettroni ma molto conduttivo per gli ioni litio, che si forma all'interfaccia anodo/elettrolita (questo strato si crea dalla decomposizione dell'elettrolita durante le fasi di formazione dell'accumulatore ed è di particolare importanza per il suo funzionamento, in quanto arresta l'ulteriore decomposizione dell'elettrolita, permettendo agli ioni di intercalare). Lo strato SEI inizia a suddividersi e una volta che viene violato l'elettrolita reagisce con il carbonio all'anodo proprio come aveva fatto durante il processo di formazione ma ad una temperatura elevata ed incontrollata. Questa è una reazione esotermica che porta la temperatura a valori più elevati.

- Come la temperatura aumenta, il calore dalla reazione anodica provoca la ripartizione dei solventi organici utilizzati nell'elettrolita rilasciando gas di idrocarburi infiammabili (etano, metano e altri), ma senza ossigeno. La generazione di gas, a causa della ripartizione dell'elettrolita, provoca l'aumento di pressione all'interno della cella. Anche se la temperatura aumenta di oltre il punto di infiammabilità dei gas rilasciati dall'elettrolita, i gas prodotti non bruciano perché non c'è ossigeno libero nella cella per provocare un incendio. Le celle sono normalmente dotate di un foro di sicurezza che permette il rilascio controllato dei gas in modo da alleviare la pressione interna nella cella ed evitare la possibilità di una rottura incontrollata (esplosione) della stessa. Una volta che i gas caldi vengono rilasciati in atmosfera possono, naturalmente, bruciare in aria.
- Successivamente il separatore di polimero si scioglie, consentendo il corto circuito tra gli elettrodi.
- Alla fine il calore della ripartizione dell'elettrolita causa la suddivisione del materiale del catodo di ossido di metallo liberando ossigeno che consente di bruciare sia l'elettrolita che il gas all'interno della cella.

La ripartizione del catodo è anche fortemente esotermica portando la temperatura e la pressione a valori ancora più elevati.

Il cobalto è stato il primo materiale utilizzato per i catodi di celle al litio secondarie, ma sono stati riscontrati problemi di sicurezza perché l'insorgenza di ripartizione chimica avviene ad una temperatura relativamente bassa ed inoltre, quando il catodo si rompe, viene rilasciata una quantità elevata di energia. Per tale motivo sono stati sviluppati catodi di materiali alternativi e il diagramma seguente ne mostra le caratteristiche di ripartizione.

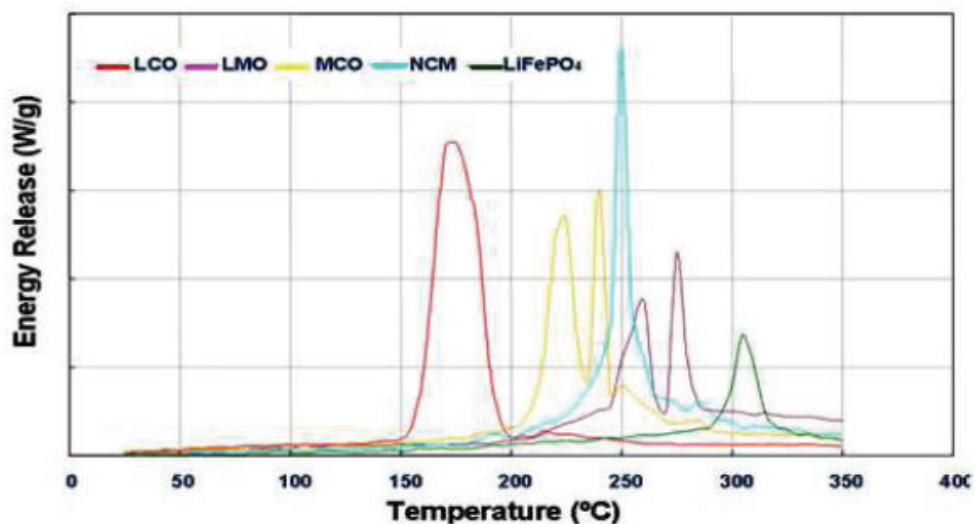


Figura 2.8. Energia liberata a diverse temperature per i differenti materiali catodici

Il catodo al litio ferro fosfato si rompe con il rilascio di ossigeno a temperature molto più alte ed inoltre, quando ciò accade, viene rilasciata molta meno energia. La ragione è che gli atomi di ossigeno nel fosfato hanno un legame molto forte a causa della valenza del fosforo, che è difficile da spezzare. La chimica degli altri catodi è basata su ossidi metallici al litio che hanno legami di valenza molto più deboli e si rompono più facilmente con conseguente liberazione di ossigeno. Gli effetti della tensione e della temperatura sui fallimenti delle celle tendono ad essere immediatamente evidenti, ma il loro effetto sul ciclo di vita è meno visibile. Come detto nei paragrafi precedenti, le escursioni al di fuori del range di uso può causare la perdita irreversibile della capacità delle celle. L'effetto cumulativo di queste digressioni riduce il tempo di vita della cella o, nel peggiore dei casi, è causa di morte improvvisa.

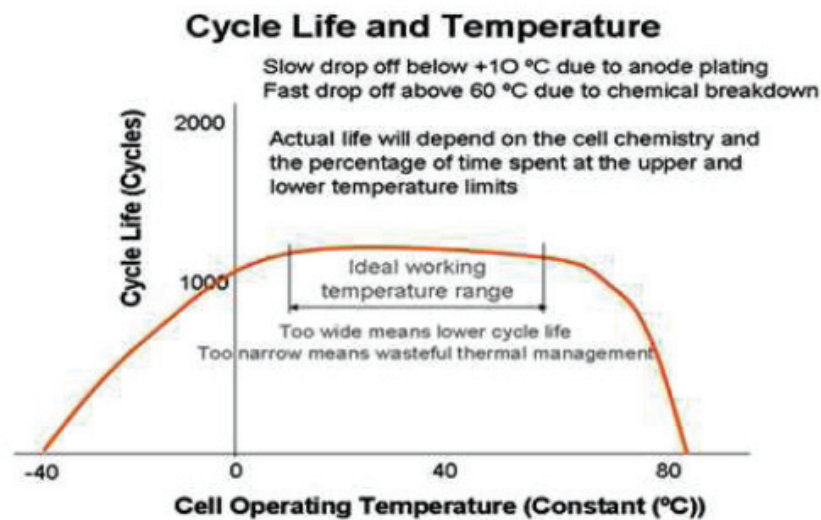


Figura 2.9 Cicli vita di una cella al litio in funzione della temperatura

Il grafico qui sopra mostra che al di sotto di circa 15°C i cicli vita saranno progressivamente ridotti lavorando a temperature più basse. Anche operando a temperature superiori ai 50 ° C si riduce il ciclo di vita, ma dai 70 ° C in su la minaccia è la temperatura incontrollata.

Il sistema di gestione termica della batteria deve essere progettato per mantenere il valore dei parametri di funzionamento delle celle nei rispettivi limiti in qualsiasi momento, per evitarne l'usura prematura: quanto sopra dimostra che la funzione di protezione consiste sostanzialmente nel controllo della tensione e temperatura di ogni cella.

Funzione di bilanciamento.

Ci sono molte cause di disegualizzazione delle celle. Uno dei fattori principali è connesso con il principio generale che non tutte le celle sono create uguali, cioè, sostanzialmente, le celle all'interno di un sistema batterie sono tutte diverse tra loro. Ciò avviene a causa delle inevitabili tolleranze di produzione. Altri fattori sono la distribuzione di temperatura all'interno del pacco ed il diverso invecchiamento delle celle. Il tutto si traduce in variazioni nell'impedenza interna, che è il parametro secondo il quale le celle si comportano durante i processi di carica e scarica.

Durante la fase di carica, se nella serie c'è una cella degradata, ovvero con capacità ridotta, c'è il pericolo che appena raggiunge la carica completa essa sarà soggetta a sovraccarica per tutto il tempo impiegato dalle altre celle a raggiungere anch'esse lo stato di carica completa. Il risultato è un possibile aumento di temperatura e pressione che può danneggiare la cella.

Durante la scarica, la cella più degradata sarà soggetta ad una profondità di scarica maggiore e tenderà a fallire prima delle altre. I problemi causati da queste differenze tra cella e cella aumentano quando le celle sono soggette a rapidi cicli di carica e scarica con elevati gradienti di corrente, come quelli tipici delle applicazioni dei veicoli elettrici ed ibridi.

Un veicolo ibrido ovviamente ricade in questa categoria di applicazioni, in quanto per far fronte ad elevate richieste di coppia assorbe elevatissime correnti, e nel momento di un'intensa frenata (con recupero dell'energia cinetica), immette nelle batterie grandi correnti: soprattutto quest'ultimo caso è problematico per le batterie perché la corrente generata in fase di frenata può causare un rapido aumento di tensione fino a livelli potenzialmente pericolosi per la cella.

Infatti, per ogni tipo di batteria è importante che la carica avvenga a tensione inferiore ad un valore di sicurezza che danneggerebbe irreparabilmente l'accumulatore.

Tenere sotto controllo la tensione complessiva del pacco batteria non è sufficiente, perché a causa della dispersione dei parametri, celle nominalmente uguali possono possedere caratteristiche leggermente diverse.

Ad esempio una cella con una capacità ridotta o una resistenza interna maggiore tende ad avere una variazione di tensione maggiore rispetto alle altre durante i cicli di carica/scarica e quindi è più facilmente soggetta a guasti per sovratensione. Per le motivazioni espresse, durante i cicli di carica alcune celle potrebbero raggiungere prima delle altre la tensione finale di carica.

In questo caso è indispensabile impedire a queste celle di continuare il processo di carica.

Quando una cella è danneggiata, deve essere sostituita l'intera batteria e le conseguenze sono estremamente costose. La sostituzione della singola cella non risolverebbe il problema poiché le caratteristiche di una cella "fresca" sarebbero

abbastanza differenti da quelle delle celle invecchiate e ciò aumenterebbe le possibilità di rottura.

Un primo approccio nel risolvere il problema si può avere in fase di costruzione del pacco, selezionando celle il più possibile simili tra loro e disponendole in modo che la distribuzione di temperatura all'interno del pacco sia la più uniforme possibile.

In un veicolo, la temperatura all'interno del vano motore, nel compartimento passeggeri o nel bagagliaio sono significativamente differenti e distribuire le celle attraverso il veicolo per ripartire il peso può causare condizioni termiche di esercizio non uniformi.

D'altro canto, se le celle sono concentrate in un unico grande pacco, le celle esterne, in contatto con l'ambiente esterno, possono raffreddarsi maggiormente di quelle interne, a meno che non si preveda un sistema di raffreddamento.

Per fornire una soluzione dinamica a questi problemi, il BMS deve incorporare una funzione di bilanciamento: ciò viene ottenuto sostanzialmente mediante il monitoraggio dello stato di carica delle singole celle ed il controllo della carica applicata ad ogni cella nel pacco durante la fase di carica. Una tecnica di equalizzazione efficace deve permettere a tutti gli elementi di raggiungere la tensione di carica finale inibendo la carica alle celle già completamente cariche; solo al raggiungimento della completa carica di tutte le celle di potrà interrompere il processo.[23]

Un episodio esplicativo

L'ente nazionale per la sicurezza stradale statunitense (NHTSA) ha interpellato le case automobilistiche nelle cui gamme sono presenti vetture con batterie agli ioni di litio, chiedendo loro di svolgere ulteriori controlli circa l'affidabilità degli stessi accumulatori. General Motors, Ford, Nissan e nel prossimo futuro Toyota dovranno quindi fornire nuove garanzie e sostenere la validità di una tecnologia che ha rimpiazzato la meno efficace soluzione nichel-metallo.

Tanta premura è causata da un episodio quantomeno sospetto.

Ad inizio giugno 2010 una Chevrolet Volt (vedi cap.4 per caratteristiche vettura) ha preso fuoco spontaneamente, 3 settimane dopo un crash test laterale condotto dai tecnici dell'NHTSA.

Le 8.800 Chevrolet Volt già su strada e le restanti 4.000 in fase di consegna verranno sottoposte ad un intervento per rendere più sicuro ed affidabile il pacco batterie. General Motors precisa tuttavia che non si tratta di un richiamo ma di un'azione volontaria per aumentare la soddisfazione dei clienti. Dietro questa arzigogolata perifrasi si nasconde il tentativo di rendere meno imbarazzante e spiacevole una figuraccia dai contorni inattesi, che renderà obbligatoria una spesa aggiuntiva di 9 milioni di dollari (1.000 dollari a vettura) ed un fermo macchina quantificato in 2-3 ore.

Le Chevrolet Volt già uscite di fabbrica saranno equipaggiate con un sistema di raffreddamento più efficace e verranno rinforzate nella struttura che protegge le batterie, così da rendere più omogenea la distribuzione della forza nel qual caso si verifichi un impatto laterale. Proprio lo scontro laterale creò ben più di un grattacapo all'esemplare sottoposto a crash test, che prese fuoco in maniera spontanea alcune settimane dopo l'impatto ed invitò i tecnici dell'NHTSA a chiedere ulteriori garanzie circa l'effettiva affidabilità degli accumulatori agli ioni di litio, usciti indenni dagli ultimi quattro crash test effettuati dopo l'introduzione delle modifiche. Le quasi 13.000 vetture saranno aggiornate entro il termine di febbraio. Queste modifiche saranno ovviamente destinate anche alla Opel Ampera. [24]

Temperatura e carica di stoccaggio

Il principale svantaggio della batteria al Li-ion è che presenta un degrado progressivo anche se non viene utilizzata (ha una durata di conservazione fissa, in inglese shelf life, a partire dal momento della fabbricazione, indipendentemente dal numero di cicli di carica/scarica)

Questo tipo di degrado peggiora con l'aumento della temperatura di conservazione e dello stato di carica

Immagazzinare una batteria agli ioni di litio alla temperatura e carica corrette fa la differenza per mantenere la sua capacità di carica. La seguente tabella mostra la perdita di carica permanente che c'è con immagazzinaggio ad un livello di carica e una temperatura dati [22].

Perdita Permanente di Capacità contro Condizioni di Immagazzinaggio		
Temperatura di deposito	40% di Carica	100% di Carica
0 °C (32 °F)	2% di perdita dopo 1 anno	6% di perdita dopo 1 anno
25 °C (77 °F)	4% di perdita dopo 1 anno	20% di perdita dopo 1 anno
40 °C (104 °F)	15% di perdita dopo 1 anno	35% di perdita dopo 1 anno
60 °C (140 °F)	25% di perdita dopo 1 anno	40% di perdita dopo 3 mesi

Tabella 2.2 Perdita permanente di capacità in diverse condizioni di stoccaggio

C'è un significativo beneficio nell'evitare di depositare una batteria agli ioni di litio a piena carica. Una batteria Li-Ion depositata al 40% di carica durerà molte più volte di una depositata al 100%, particolarmente alle alte temperature.

Se una batteria agli ioni di litio viene depositata con troppa poca carica, c'è il rischio di permettere alla carica di cadere sotto la soglia di basso-voltaggio,

risultando in una batteria irrecuperabile. Una volta che la carica è scesa sotto tale livello, ricaricarla può essere pericoloso. Un circuito interno di sicurezza si aprirà per impedire la ricarica, e la batteria sarà completamente inutilizzabile per tutti gli scopi pratici.

2.4 Supercondensatori

I supercondensatori rappresentano un sistema alternativo alla batteria per accumulare e rilasciare energia.

Mentre nelle batterie i cicli di carica/scarica avvengono tramite una reazione chimica con progressiva perdita di efficienza e l'energia accumulata viene rilasciata lentamente, nei supercondensatori si hanno processi fisici e cariche/scariche quasi istantanee senza avere deterioramento.

Gli ostacoli ancora da superare per poter utilizzare questa tecnologia nei veicoli ibridi ed elettrici sono rappresentati dalla scarsa densità energetica e dai costi elevati.

I condensatori elettrochimici (supercondensatori) sono dispositivi dotati di capacità specifica dell'ordine dei F/g oppure F/cm³, estremamente alta se confrontata con i più comuni condensatori elettrostatici, la cui capacità è dell'ordine di grandezza dei pico, nano, micro-farad per unità di massa e di volume. Per tale motivo questi sono chiamati "supercapacitori" o "supercap".

Si userà di seguito anche l'acronimo EDLC (electric double layer capacitor) per evidenziare la caratteristica specifica dei supercap, in altre parole la proprietà di creare un doppio strato di separazione di carica all'interno del dielettrico.

Il condensatore elettrochimico, come si osserva dalla Figura 2.10, è caratterizzato da una costruzione molto simile a quella di una batteria; esso ha sostanzialmente due elettrodi, e un separatore permeabile agli ioni, posto tra gli elettrodi, che contiene l'elettrolita.

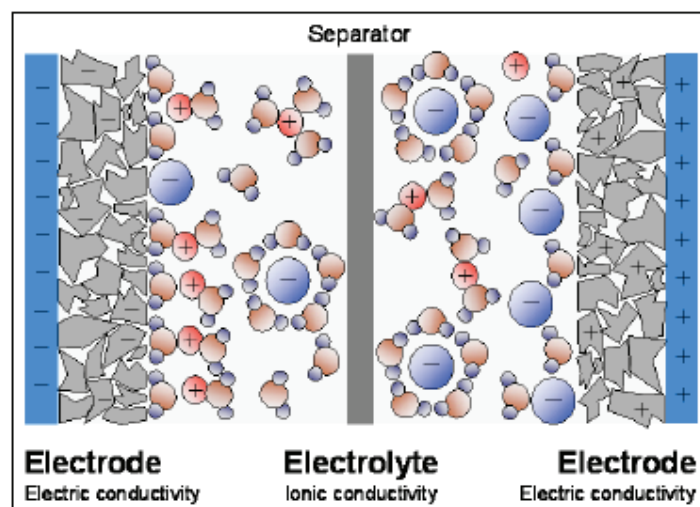


Figura 2.10 Struttura interna del supercondensatore

Gli elettrodi porosi sono immersi in una soluzione elettrolitica.

Applicando una piccola differenza di potenziale ai capi degli elettrodi si innesca un processo di separazione di carica indotto dalla presenza di un campo elettrico. La zona in cui sono concentrate tali cariche è chiamata anche doppio strato, proprio da qui il supercondensatore prende il nome di “double layer”.

I capacitori elettrochimici immagazzinano dunque energia nel doppio strato detto anche strato di Helmholtz che si viene a formare all’interfaccia elettrodo-elettrolita. Qui ioni carichi positivamente o negativamente si accumulano all’interfaccia elettrodo-elettrolita e sono compensati da elettroni che si dispongono sulla superficie dell’elettrodo. Lo spessore di tale strato dipende dalla concentrazione dell’elettrolita e dalla dimensione degli ioni.

Tipicamente, si hanno spessori dell’ordine dei 2-10 Angstrom (Å).

Gli elettrodi sono concepiti in modo da costituire un’elevata superficie e sono realizzati con materiale poroso avente pori del diametro dell’ordine dei nanometri in modo tale da massimizzare la superficie del doppio strato.

I supercondensatori sono dotati di elevata capacità specifica grazie sia alla ridotta distanza intermolecolare tra le cariche elettriche di segno opposto all’interfaccia elettrolita-elettrodo, sia all’alta area superficiale degli elettrodi realizzata attraverso la deposizione di carbone con struttura nanomolecolare; in aggiunta alla capacità derivante dalla separazione di cariche che si ottiene nel doppio strato si ha un contributo anche da reazioni che possono avvenire sulla superficie del carbone. Tali reazioni, di natura elettrochimica, danno origine ad un ulteriore accumulo di energia elettrica.

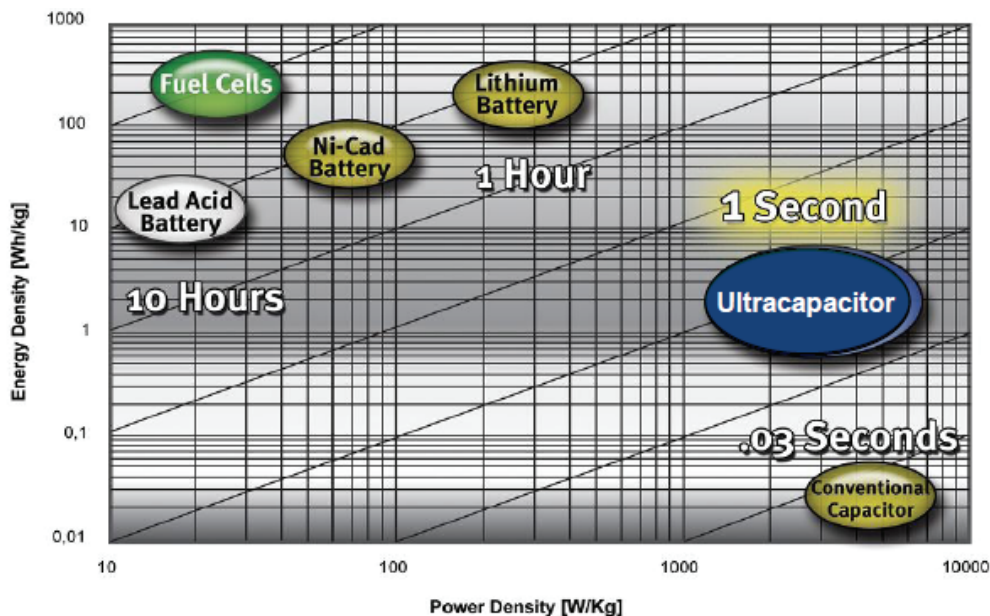


Figura 2.11 Diagramma di Ragone di diverse tecnologie di accumulo per la trazione elettrica.

ridurre i consumi sino al 30% rispetto alla trazione endotermica tradizionale. Particolarmente rilevante è l'esperienza della ISE che a partire dal 2005 produce autobus ibridi diesel-elettrico a supercondensatori e ad oggi conta su di una produzione di 100 veicoli all'anno di tali sistemi e più di 30.000 celle di supercondensatori impiegate e attualmente in servizio.

Nel campo automotive, probabilmente, la principale limitazione alla realizzazione di veicoli ibridi che utilizzano i sistemi di accumulo a supercondensatore deriva dalla tendenza del mercato a realizzare veicoli con una marcata autonomia in puro elettrico e, di conseguenza, l'impiego di batterie elettrochimiche è indispensabile. Molto più promettente, in campo automotive, invece, è il mercato dei sistemi start&stop, per i quali la tecnologia a supercondensatori risulta essere notevolmente vincente rispetto le batterie elettrochimiche al fine di realizzare sistemi di accumulo capaci di erogare continui picchi di potenza al fine di garantire l'avviamento dei motori endotermici, senza una perdita di performance dell'accumulo stesso. In tal senso l'azienda Continental AG dal 2010 fornisce ai costruttori automotive del gruppo PSA Peugeot e Citroen sistemi booster basati sulla tecnologia a supercondensatore Maxwell Technologies per la loro seconda generazione di veicoli start&stop, Figura 2.13 [30].



Figura 2.13 Active Boost prodotto da Continental AG per la seconda generazione di veicoli start&stop del gruppo PSA Peugeot e Citroen.

La FastCap System, fondata dall'ing. Signorelli, sta sviluppando un supercondensatore con una struttura di nanotubi di carbonio di soli 12 atomi di spessore che garantiscono maggiori densità di potenza ed energia immagazzinabile ed erogabile unite ad una notevole robustezza anche in condizioni proibitive e a costi molto bassi.

L'azienda ha ottenuto nel 2010 dall'ARPA-E (Advanced Research Projects Agency-Energy) appartenente al DOE (Department of Energy), USA, un finanziamento di 5.35 milioni di dollari per lo sviluppo e commercializzazione di supercondensatori a nano tubi di carbonio.

Le prime applicazioni nel settore automotive si prevedono tra 5 anni per veicoli mild e micro hybrid in funzione power assist, ovvero per tenere in funzione i sistemi di bordo durante la fase start&stop e fornire un aiuto al motore termico nelle accelerazioni.

Su questo tipo di veicoli si prevede l'utilizzo del FastCap senza l'ausilio di batterie mentre sui veicoli elettrici, quando si passerà ad utilizzare le formidabili batterie di prossima generazione (per esempio litio-aria e zinco-aria) a elevata densità di energia, la combinazione con il supercondensatore potrà essere vincente. Il supercondensatore, infatti, sottrae all'accumulatore tutti i lavori stressanti, cioè l'erogazione dei picchi di energia, allungandone la vita [5].

Evoluzione tecnologica: attuali linee di ricerca e sviluppo.

L'evoluzione industriale e tecnologica dei supercondensatori sino ad oggi è stata prevalentemente orientata ai seguenti aspetti:

- riduzione dei costi del processo produttivo del nastro costituente gli elettrodi;
- miglioramento delle performance dinamiche;
- incremento della densità di energia.

Per quanto concerne il primo punto lo sviluppo è intrinsecamente di ricerca industriale di prodotto. In tal senso la ricerca e i conseguenti brevetti dei diversi produttori hanno mirato alla messa a punto di tecniche di deposito del carbonio sulla superficie degli elettrodi senza l'impiego di solventi e riducendo in modo significativo il numero di passaggi atti alla realizzazione del prodotto finito.

Rilevante è inoltre il miglioramento delle performance di tali dispositivi in termini di caratteristiche dinamiche. Attraverso una serie di prove sperimentali condotte presso il Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano, si è evidenziato come la tendenza dei costruttori di supercondensatori è quella di migliorare le performance dinamiche.

L'incremento della densità di energia, infine, sembra la linea di ricerca più promettente al fine di estendere ulteriormente l'impiego dei supercondensatori nelle diverse applicazioni sin qui descritte.

Considerando la struttura di tali dispositivi esistono diversi approcci al fine di realizzare un aumento della densità specifica di energia, in particolare:

- aumentare la densità superficiale specifica degli elettrodi;
- innalzare la tensione di lavoro della singola cella;
- sfruttare un accumulo di energia combinato: sia elettrostatico che elettrochimico.

Tra i diversi metodi, la prima linea di ricerca è quella maggiormente esplorata [30].

Capitolo 3

Motori elettrici

Di seguito si riportano gli azionamenti elettrici che possono essere utilizzati nella trazione ibrida. La scelta dell'azionamento elettrico è strettamente legata al tipo di architettura del veicolo ibrido: cambiando la disposizione del motore all'interno del *drivetrain* mutano le condizioni operative, e questo influenza inevitabilmente la scelta del tipo di motore. Da un punto di vista qualitativo, il profilo ideale coppia-velocità, per un'applicazione di trazione, è quello a potenza costante sull'intero campo di operatività. Questo andamento consente infatti di avere la massima accelerazione possibile, a potenza massima dell'azionamento fissata, oppure permette di minimizzare la potenza necessaria ad accelerazione imposta. Nei motori endotermici si modula la propulsione attraverso l'uso del cambio, in modo tale da avere un profilo effettivo di coppia-velocità il più possibile corrispondente a quello a potenza costante. Nei motori elettrici il cambio non è necessario, in quanto il controllo del motore stesso modula la caratteristica di trazione secondo il tratto a potenza costante.

I primi motori elettrici utilizzati per la trazione, soprattutto per piccoli veicoli, sono stati quelli a corrente continua a magneti permanenti o ad eccitazione separata. Essi hanno però problemi di manutenzione (a causa della presenza di spazzole e collettori), di basso rendimento e di complessità di costruzione. Per questo, quando l'evoluzione tecnologica ha portato allo sviluppo dell'elettronica di potenza e di tecniche di controllo più moderne (tecniche *firmware*, controllo vettoriale o diretto in coppia), sono stati sviluppati ed utilizzati per la trazione altri tipi di motori, tra i quali l'asincrono, il brushless ed il motore a riluttanza variabile. [7]

3.1 Motori ad induzione

Nel motore ad induzione (asincrono) lo statore è alimentato da una tensione alternata trifase, mentre il campo magnetico di rotore viene creato per induzione, eliminando quindi la presenza di contatti striscianti e dei magneti. Le principali caratteristiche di questo motore sono:

- ridotti costi di produzione;
- necessità di manutenzione praticamente nulla ed elevata robustezza;
- con opportune tecniche si può disaccoppiare il controllo della coppia da quello della generazione del campo magnetico di rotore;

- rapporto di elasticità molto elevato, con una velocità massima circa doppia di quella base (con una progettazione specifica questo fattore aumenta fino a 3-5 volte la velocità base);
- bassa densità di coppia per massa, che comporta un'elevata massa del motore per avere una coppia fissata;
- bassa densità di coppia per volume, che porta ad avere elevati ingombri;
- rendimento inferiore rispetto ad altri azionamenti;
- elevato momento d'inerzia del rotore che ha al suo interno avvolgimenti di rame.

3.2 Motori Brushless

Nel motore brushless (sincrono a magneti permanenti), rispetto all'asincrono, il campo magnetico rotorico è generato da magneti permanenti e le bobine di statore sono alimentate da un generatore equilibrato di corrente trifase. Le principali caratteristiche sono:

- alto rendimento (maggiore rispetto al motore ad induzione);
- alta densità di coppia per massa che consente di avere un peso minore a parità di coppia da fornire;
- alta densità di coppia per volume che consente di avere ingombri ridotti;
- momento rotorico d'inerzia particolarmente ridotto;
- costo elevato;
- necessità di mantenere il sincronismo: è necessario quindi avere un sensore per la misura della posizione del motore;
- elasticità molto limitata, il campo generato dai magneti può essere indebolito solo entro certi limiti, per non smagnetizzare il materiale, e questo porta ad avere un limitato campo di velocità nel tratto a potenza costante. Ciò può limitarne l'uso in certe applicazioni di trazione.

3.3 Motori a riluttanza variabile

Il motore a riluttanza variabile consiste in uno statore con avvolgimenti di eccitazione e in un rotore di materiale ferromagnetico a poli salienti. Gli avvolgimenti di rotore non sono necessari perché la coppia è prodotta dalla tendenza del rotore ad allinearsi con lo statore, che produce il flusso. Questo è un

grosso vantaggio perché dà luogo ad una riduzione delle perdite per indebolimento di campo. Le caratteristiche di questo motore sono:

- semplicità costruttiva;
- facilità nell'esecuzione e nello sviluppo del controllo;
- si possono raggiungere velocità molto elevate;
- la curva caratteristica coppia-velocità ha il tratto a potenza costante che si estende per un range di velocità molto ampio (i rapporti di elasticità possono arrivare ai valori 6-8); per questo motivo i motori a riluttanza variabile sono molto adatti per applicazioni di trazione;
- densità di coppia prossima a quella dei motori brushless;
- alto ripple di coppia;
- si riscontra la presenza di rumori acustici e dissipazioni dovuti alla ventilazione del rotore che non è cilindrico ma presenta una dentatura sulla superficie esterna;
- rendimento complessivo paragonabile a quello del motore asincrono.

Capitolo 4

Tipologie veicoli ibridi

4.1 Micro Ibrido

Le cosiddette micro-ibride sono auto dotate del solo motore tradizionale a combustione interna (a benzina, a gasolio, a gas, bioetanolo, etc.), ma che possiedono in aggiunta un dispositivo detto "stop & start", il quale spegne il motore durante le brevi fermate del veicolo dovute al traffico (ad es. durante le soste ai semafori). Il motore viene immediatamente riavviato attraverso la semplice pressione sul pedale dell'acceleratore o su quello della frizione. Si tratta, quindi, di auto che, pur non possedendo un motore elettrico, attraverso la suddetta tecnologia dello "stop & start" - la più semplice tecnologia ibrida oggi disponibile sul mercato - raggiungono l'obiettivo di consumare meno carburante (con un risparmio di almeno il 5% sui percorsi misti, maggiore su quelli urbani) e di inquinare di meno. Rappresentano senza dubbio il futuro immediato delle automobili con motore termico tradizionale e, verosimilmente, già entro il 2012 il sistema "start & stop" sarà adottato su almeno metà delle nuove auto.

4.1.1 Sistema Stop&Start

Se fino a poco tempo fa la priorità era la pulizia dello scarico dalle emissioni velenose, anche a costo di sacrificare un po' i consumi, il principale obiettivo che si prefiggono oggi i costruttori di auto è quello di ridurre le emissioni di CO₂ e, quindi, il consumo di combustibile.[8]

Ecco quindi che oltre agli interventi su aerodinamica, cambio e pneumatici diventa rilevante utilizzare un sistema Stop&Start per contribuire alla riduzione dei consumi.

L'idea non è nuova dato che nei primi anni 80 si erano visti i primi modelli eco con sistemi automatici per spegnere il motore nelle soste e riavviarlo quando si riparte.

In Italia tale dispositivo venne battezzato Citymatic e fu montato sulla Fiat Regata ES. L'affidabilità però non era soddisfacente e il sistema fu presto dimenticato.

Ribattezzato Stop&Start, è ritornato in auge da poco e si sta rapidamente diffondendo, grazie alla concreta riduzione delle emissioni di CO₂ (attorno al 10% in città).

Il dispositivo comprende (vedi fig.4.1):

- un motorino d'avviamento rinforzato (1)
- una centralina di controllo per gestire il sistema (2)
- un sensore dello stato della batteria (3)
- un accumulatore più resistente ai cicli di carica e scarica (4) (vedi par. 2.1)
- i sensori di posizione dei pedali freno e frizione (5)
- un generatore più potente (6)

Oltre a questi componenti vanno riprogettati i cuscinetti dell'albero motore e delle bielle, più sollecitati dall'elevato numero di avviamenti.

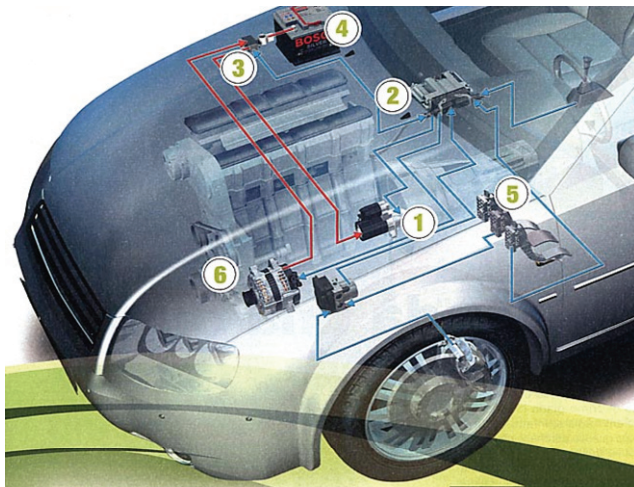


Figura 4.1 Componenti del sistema Start&Stop

Il sistema è automatico: quando ci si ferma, col cambio in folle, il motore si spegne e si riavvia non appena si preme la frizione per ripartire.

Quando il propulsore è fermo, tutti gli apparecchi elettrici continuano a funzionare e il congegno si disattiva automaticamente se la tensione della batteria è bassa, se il motore è freddo o si richiede la massima potenza al climatizzatore.

PSA e-HDI micro-hybrid system

Il Gruppo PSA Peugeot Citroën è stato precursore del microibrido Stop&Start con alternatore reversibile sulla versione benzina di Citroën C3 nel 2004, e successivamente sulla C2.

Ha ulteriormente sviluppato il concetto di partenza, depositando più di 30 brevetti per il nuovo sistema e-HDi e investendo 300 milioni di euro. 500 ingegneri e tecnici sono stati impiegati nel progetto durato 36 mesi.

L'architettura del sistema è composta da: motori Euro 5 (1.6 HDi 92cv e 112cv e 1.4 HDi 70cv), alternatore reversibile Valeo di seconda generazione da 2,2kW.

Tra le caratteristiche di questo alternatore reversibile vi è il fatto che in modalità di riaccensione riesce ad erogare una coppia motrice di oltre 50 Nm all'albero motore, di gran lunga superiore a quella erogata da un normale motorino di avviamento.

Sistema di pilotaggio dell'alternatore (Volt Control) per recuperare energia in decelerazione

In pratica, quando si rallenta, il motore sincrono utilizzato funge da alternatore, erogando fino a 2.5 kW di potenza elettrica e fungendo anche da freno-motore. Al

momento di ripartire, l'alternatore inverte la sua modalità di funzionamento, trasformandosi in motore sincrono e convertendo l'energia elettrica che riceve in ingresso in energia meccanica che consente la rotazione dell'albero a gomiti e quindi la riaccensione del motore a gasolio

Il riavviamento è rapido (400 millisecondi), 2 volte più veloce di un riavviamento manuale con chiave, 40% più veloce rispetto a un motorino d'avviamento potenziato (i classici sistemi Stop&Start).

Con questo sistema Stop&Start, le funzioni di assistenza e comfort (radio, clima, Esp, servosterzo, ecc.) sono sempre presenti anche con il motore in stand-by.

Le batterie impiegate nei veicoli e-HDi sono al gel per garantire migliori prestazioni e resistenza, e presentano piastre più sottili per aumentarne il numero a parità di dimensione. Inoltre, per la prima volta su un veicolo, è presente un'ultracapacità (denominata anche e-booster), ovvero un insieme di condensatori che durante la fase di avviamento forniscono una sovrapotenza per garantire all'alternatore la coppia necessaria all'avviamento del motore.

In fase di avviamento un'elettronica di controllo denominata DMT permette la scarica dell'ultracapacità che, collegata in serie alla batteria fornisce una corrente di 600 Ampere a 5 V.

L'elettronica integrata all'alternatore trasforma la corrente in arrivo dalla batteria e dall'ultra capacità, in corrente alternata trifase per l'alimentazione delle bobine dello statore dell'alternatore.

Il funzionamento di un motore e-HDi è simile a quello di un qualsiasi altro motore che monta un dispositivo Start&Stop, con la differenza che in questo caso il motore non si spegne a veicolo fermo, ma già una volta scesi sotto i 20 km/h, per riavviarsi poi appena si è in procinto di partire. Ciò si rivela utile quando si è in coda in città, per esempio nei tragitti casa-lavoro.

I vantaggi di un motore e-HDi rispetto ad un motore con sistema Start& Stop convenzionale stanno nel netto taglio dei consumi, specialmente nel ciclo urbano: mentre il fabbisogno di gasolio è stimato in circa il 15% effettivo in meno, le emissioni diminuiscono invece di solo il 5%, un risultato comunque incoraggiante[9].

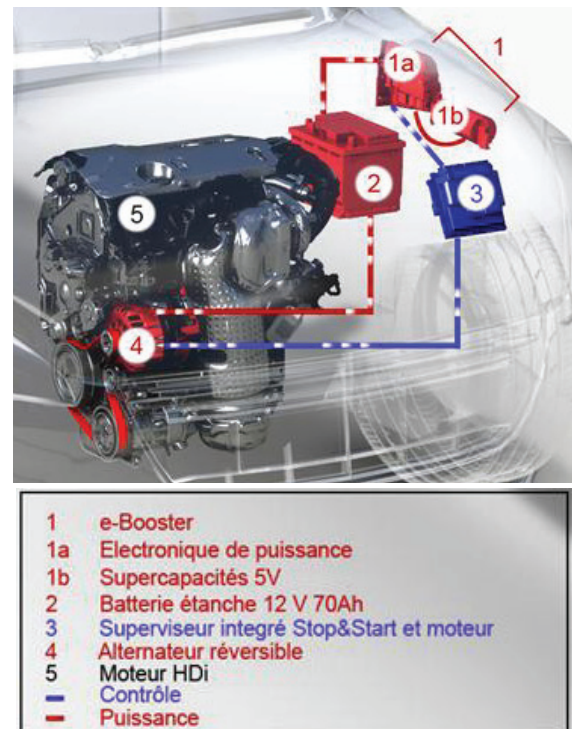


Figura 4.2 PSA e-HDi micro-hybrid system

4.1.2 Frenata rigenerativa

Generalità

Gli obiettivi della frenata rigenerativa sono la riduzione delle emissioni di CO₂ e l'incremento dell'efficienza energetica.

Per i veicoli ibridi, ad eccezione dei veicoli plug-in, l'energia recuperata durante la fase di decelerazione rappresenta il maggior contributo agli obiettivi sopracitati. [10]

Durante la frenata il motore elettrico è usato come generatore e l'energia recuperata dipende dalle caratteristiche della macchina elettrica, in particolare è limitata la massima coppia frenante.

Inoltre questa limitazione dipende dalla velocità di rotazione che è a sua volta proporzionale alla velocità del veicolo.

Nella Fig. 4.2 sono visibili le limitazioni del generatore che dipendono da:

- 1 Potenza del generatore
- 2 Corrente del generatore
- 3 Efficienza del generatore

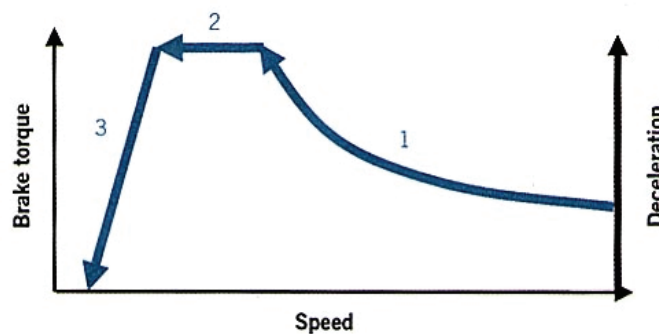


Figura 4.3 Caratteristica del generatore

Altre limitazioni alla possibile energia recuperata sono imputabili alle condizioni di carica della batteria e alle restrizioni sulla stabilità del veicolo in condizioni critiche di guida.

Tipologie e limitazioni

La prima modalità di frenata rigenerativa consiste semplicemente nel sovrapporre la decelerazione dovuta alla macchina elettrica a quella convenzionale del sistema frenante.

Questa soluzione viene definita *superimposed regenerative braking system (SRBS)* e rappresenta la soluzione più semplice ed economica perché evita l'unione dei due sistemi frenanti.

Il maggior svantaggio di questa scelta è che la coppia frenante del sistema

rigenerativo dipende dalla velocità del veicolo e deve essere limitata ad un livello accettabile per il guidatore specialmente alle basse velocità dove la coppia frenante tende ad annullarsi.

Questo limite è nell'intorno del valore di 1 m/s^2 per cui il sistema SRBS si presta bene per veicoli equipaggiati con macchine elettriche di potenza inferiore a 20 kW (mild hybrids).

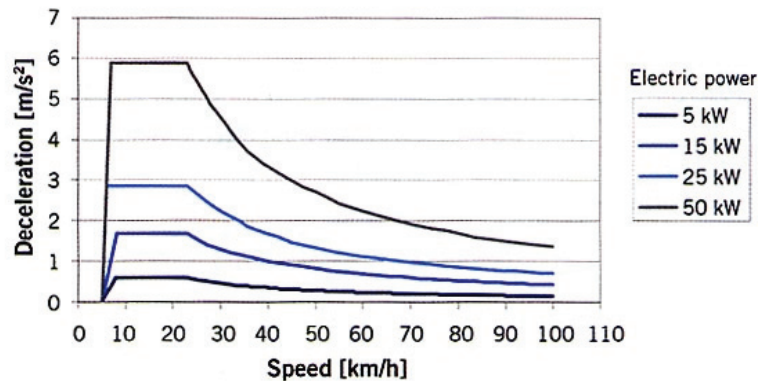


Figura 4.4 Caratteristiche di decelerazione dei generatori di diversa potenza

Per i veicoli con motori elettrici di potenza superiore (full hybrids, EV) può essere generata una coppia frenante del sistema rigenerativo di oltre 5 m/s^2 per cui occorre passare ad un sistema integrato denominato cooperative regenerative braking system (CRBS) che permette un alto livello di recupero energetico mantenendo un valore di decelerazione costante dall'inizio della frenata fino all'arresto del veicolo.

Questo risultato è reso possibile dall'interazione tra frenata rigenerativa e frenata tradizionale per attrito in modo da ottenere un valore costante di decelerazione in base alla posizione del pedale del freno.

Il sistema CRBS implica costi maggiori a causa dei collegamenti idraulici e del disaccoppiamento parziale o totale del pedale del freno dal circuito frenante.

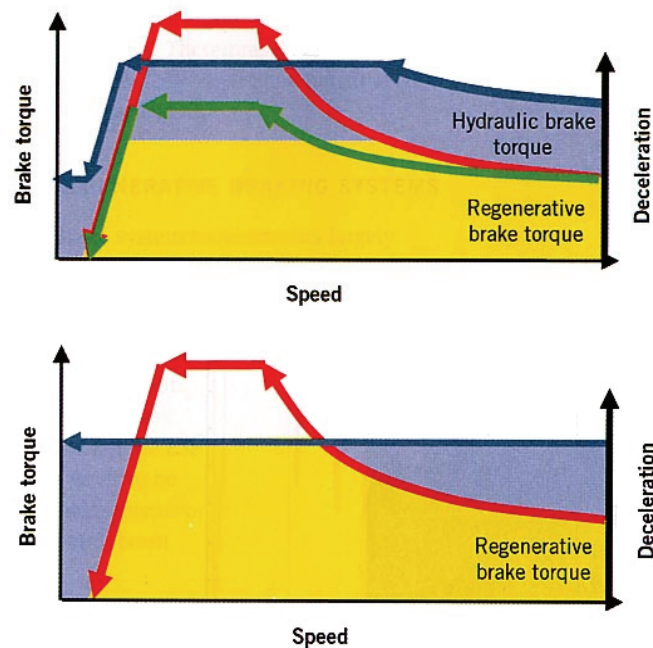


Figura 4.5 Confronto tra SRBS (in alto) e CRBS (in basso)

4.2 Mild Hybrid

Le auto mild-hybrid sono dei veicoli con motore a combustione interna (a benzina, a gasolio, a gas, bioetanolo, etc.) affiancato da un motore/generatore elettrico che non è in grado di permettere la sola propulsione elettrica del mezzo, ma svolge due differenti funzioni: (1) la batteria viene parzialmente ricaricata, quando il motore funge da generatore come la dinamo di una bicicletta, dall'energia dispersa in fase di frenata; (2) lo stesso motore elettrico può fornire un certo grado di supporto al motore tradizionale nella fase di ripartenza del veicolo. A causa della piccola potenza del motore/generatore elettrico (20 kW o meno) i veicoli mild-hybrid permettono un certo risparmio di carburante (dell'ordine del 10%), ma certamente inferiore a quello dei veicoli ibridi-elettrici tradizionali, noti anche come full-hybrid. Di conseguenza, necessitano anche di batterie meno potenti rispetto a questi ultimi. Il vantaggio è rappresentato dal minor costo di questa tecnologia e dal minor peso fisico aggiuntivo.

4.2.1 Honda Insight e Honda Jazz Hybrid

Con la Insight, la Honda ha cercato di commercializzare un veicolo ibrido con prezzi accessibili ad una clientela più vasta rispetto agli altri veicoli ibridi in commercio nel settore berlina mentre con la Jazz Hybrid la sfida dell'ibrido continua sul più difficile terreno delle utilitarie, tradizionalmente leggere e parche nei consumi.

Entrambe le vetture sono equipaggiate con il sistema ibrido IMA (Integrated Motor Assist) presentato nel 2003, oggi giunto alla quinta generazione, utilizzato anche su altre vetture del marchio Honda come la Civic Hybrid e la CVT.

Il propulsore è un 4 cilindri di 1300 cm³ a benzina che sviluppa una potenza di 88 CV (66 kW) e una coppia di 119 Nm.

Durante la fase di decelerazione del veicolo viene fermata la combustione e le valvole chiudono ogni camera ermeticamente.

In pratica ciò elimina le perdite di pompaggio, diminuendo le resistenze e consentendo al motore-generatore di essere più efficiente e di aumentare il recupero energetico per ricaricare la batteria.

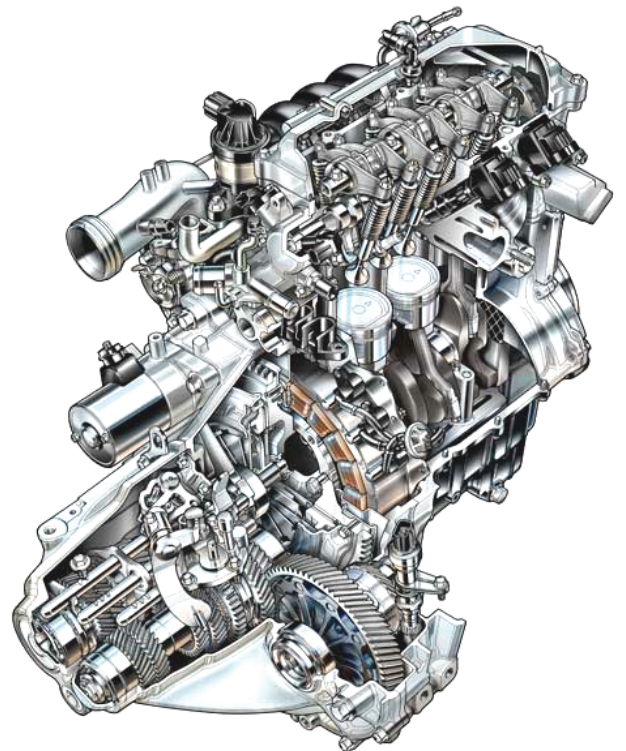
La chiusura delle valvole fa sì che l'aria rimasta all'interno dei cilindri possa essere utilizzata come una molla, aumentando l'efficienza, senza dover disaccoppiare il motore termico. [17]

Il motore elettrico brushless è posizionato tra il motore termico e il cambio, ha uno spessore di soli 35,7 mm e una potenza di 10,4 kW.

L'accumulo dell'energia elettrica è garantito da 7 batterie NiMH composte da 84 celle da 1,2 V.

I separatori tra le celle sono più sottili che in passato e l'area della piastra elettrodo è stata aumentata in modo da ottenere batterie più compatte ed efficienti. Inoltre l'adozione di un catodo più resistente alla corrosione contribuisce ad incrementare di 30% la vita utile delle batterie.

Il pacco batterie è progettato per durare l'intera vita dell'auto e coperto da una garanzia di cinque anni, che include il sistema IMA.



Questo tipo di batterie sono peraltro utilizzate da Honda già da diverso tempo su altri modelli, dove hanno sempre dato buona prova di affidabilità [17].

Per ridurre i costi è stato razionalizzato l'utilizzo di alcuni componenti del sistema, unificando le unità di controllo elettroniche del motore elettrico e delle batterie, accorpendo i cavi 12V e ad alto voltaggio in un unico cablaggio sotto alla pavimentazione dell'auto.

Sono inoltre state semplificate le operazioni di produzione ed assemblaggio dei componenti.

La trasmissione è la CVT (Continuously Variable Transmission) già utilizzata sulla Honda Civic.

Con questo progetto la Honda si propone di sensibilizzare il guidatore del veicolo sull'importanza dello stile di guida nelle riduzioni dei consumi.

Per questo è presente un sistema di informazione che comunica all'utilizzatore del veicolo se sta adottando un comportamento efficiente in termini di consumo/emissioni attraverso uno sfondo del tachimetro che cambia di colore.



Verde è la condizione ottimale, azzurro media e blu è al di sotto della media.

Il display fornisce ulteriori indicazioni circa l'efficienza dello stile di guida.

Premendo il bottone ECON posizionato a sinistra del volante, il guidatore può scegliere di adottare soluzioni che riducono il consumo di combustibile come spegnere il motore col sistema Start & Stop poco prima dell'effettivo arresto del veicolo, utilizzare il condizionatore in modalità ricircolo e ridurre di un 4% la potenza e la coppia fornite dal propulsore.

Secondo Bonawitz (vice presidente Corporate Planning and Logistics di Honda America) questo è un aspetto molto importante : “Sappiamo che esistono diverse abitudini di guida. Noi vogliamo educare le persone a compiere accelerazioni e decelerazioni migliori, come un altro modo di migliorare le emissioni di CO2 e di ridurre l'uso dell'energia”. [16]

I consumi rilevati sulla Jazz Hybrid sono di 16 km/l in città e 19,5 km/l su percorso extraurbano. Risultati di rilievo che confermano la validità dell'ibrido.

In autostrada, invece, dove contano aerodinamica e peso della vettura, viene rilevato un consumo di 12 km/l.

Per fare un confronto, la Jazz 1.4 99CV con motore tradizionale a benzina e cambio manuale presenta consumi di 11,2 km/l in città, 15,4 km/l su percorso extraurbano e sempre 12 km/l in autostrada [17].



Figura 4.6 Funzionamento del sistema IMA della Honda

4.3 Full Hybrid

Le cosiddette full-hybrid sono le auto ibrido-elettriche di tipo tradizionale, cioè che utilizzano due diversi tipi di motori per muovere un veicolo: un motore a combustione interna (a benzina, a gasolio, a gas, bioetanolo, etc.) e un motore elettrico. Quando l'auto viaggia a basse velocità (ad es. fino a 40-60 km/h, come succede in città) oppure è ferma a un semaforo, usa il motore elettrico, mentre quando occorre una potenza maggiore oppure finisce l'autonomia dell'accumulatore, viaggia con il motore normale. Come nelle auto mild-hybrid, anche in queste full-hybrid la carica elettrica delle batterie avviene trasformando in elettricità l'energia cinetica del veicolo durante la sua fase di frenata, energia che altrimenti andrebbe sprecata. Pertanto, questi veicoli hanno un'autonomia ben superiore rispetto sia ai veicoli tradizionali con motore a combustione interna sia a quelli elettrici, in quanto riescono a utilizzare il carburante in maniera più efficiente (con un risparmio sullo stesso che può arrivare fino al 30%).

4.3.1 Toyota Prius

La Prius è una automobile costruita dall'azienda giapponese Toyota ed è la più venduta tra le vetture ibride al mondo.

Il lancio del primo modello di Prius avvenne in Giappone nel 1997, e nel mercato mondiale nel 2000. Alla fine del 2003, ne erano state vendute 160.000 in Giappone, in Europa e in Nordamerica. Secondo il California Air Resources Board (il collegio californiano che studia le emissioni dei gas dei veicoli) la Prius (in tutti i modelli venduti dal 2000 al 2003) è una "SULEV" (Super Ultra Low Emission Vehicle, Veicolo a emissioni ultrabasse).



Toyota Prius 1ªserie



Toyota Prius modello 2004

Nel 2004 il modello è giunto alla seconda generazione, diventando una solida berlina due volumi, ed è scesa ulteriormente di categoria, diventando una "AT-PZEV" (Advanced Technology Partial Zero Emission Vehicle, Veicolo di tecnologia avanzata con quasi zero emissioni), nonostante l'aumento nelle dimensioni.

In Europa, la Prius è stata giudicata auto dell'anno 2005.

Dall'estate 2009 è disponibile la terza generazione della prius e le novità più rilevanti si hanno nella motorizzazione: la cilindrata è passata da 1,5 litri a 1,8 litri con motore a ciclo Atkinson, mentre la parte elettrica e la gestione del sistema ibrido HSD ha consentito di aumentare ragguardevolmente l'efficienza e quindi l'economia di carburante. Il motore è un 1.8 da 98 CV (134 CV in combinazione con il motore elettrico) con appena 89 grammi di CO₂ al Km e un consumo di 4,0 l/100km in ciclo urbano, 3,8 l/100km in ciclo extraurbano e 3,9 l/100km in ciclo combinato. Come accessorio è disponibile anche un pannello solare fotovoltaico installato nel tetto che consente di avviare la ventilazione dell'abitacolo a veicolo fermo e l'accensione del climatizzatore, grazie ad un tasto nel telecomando, durante la stagione estiva poco prima del riutilizzo della vettura dopo una lunga sosta al sole, in modo da migliorare il comfort dei passeggeri nel momento della partenza.



Toyota Prius 3a generazione, 2009

Il sistema di integrazione del motore termico, con quello elettrico di tipo sincrono trifase a magneti permanenti, è uno dei più complessi ed efficaci. I flussi di coppia

vengono gestiti elettronicamente da un ripartitore secondo le esigenze di guida, nell'ottica di ottimizzare consumi e prestazioni.

Il conducente può controllare istantaneamente l'andamento dei flussi di coppia e di energia attraverso l'efficace display allocato nella consolle centrale, che

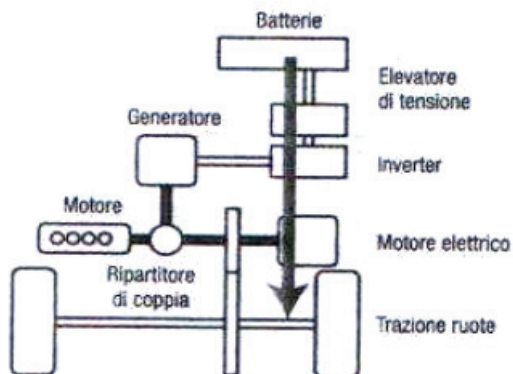
visualizza anche con effetti speciali la gestione del clima e la mappa del navigatore satellitare. Il display multifunzione 7" touch-screen, interfacciabile con il sistema di navigazione su DVD e con il dispositivo di connessione Bluetooth, aggiorna continuamente il conducente con informazioni dettagliate sulle condizioni dei due motori e sul livello dei consumi.

Per lo spunto iniziale contribuisce solo il motore elettrico, il motore a benzina inizia a funzionare solo una volta vinta l'inerzia iniziale. Nella successiva accelerazione i due motori collaborano, con un cospicuo apporto di energia elettrica nel caso di immediata richiesta di coppia, ad esempio per un sorpasso. In frenata e decelerazione viene recuperata l'energia che andrebbe altrimenti dissipata: il motore elettrico inverte il funzionamento e diviene generatore di corrente per la ricarica delle batterie.

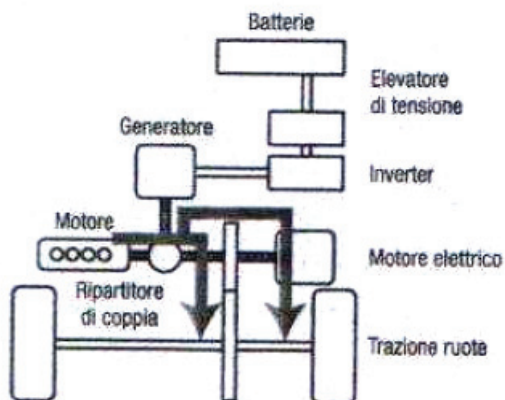
Stupisce per la silenziosità e l'assenza di vibrazioni anche in fase di avviamento. Le prestazioni sono confrontabili con quelle di una comune media cilindrata a benzina: 180 km/h di velocità e accelerazioni da zero a 100 in meno di 11 secondi, con il vantaggio di consumare come una diesel: 18 km/l in città. Il punto di forza è infatti offrire alte prestazioni e piacevolezza di guida garantendo basse emissioni inquinanti.

L'efficienza delle prestazioni e l'affidabilità sono la norma: un motore a benzina in grado di sviluppare una potenza di 73 kW (98 CV) a 5200 giri/minuto e di garantire al contempo massima efficienza. A questo propulsore gli ingegneri Toyota hanno affiancato un motore elettrico di straordinaria potenza, collegato alla batteria mediante un convertitore, che ne ottimizza la tensione d'esercizio, assicurando un'erogazione di potenza pari a 60 kW (82 CV).

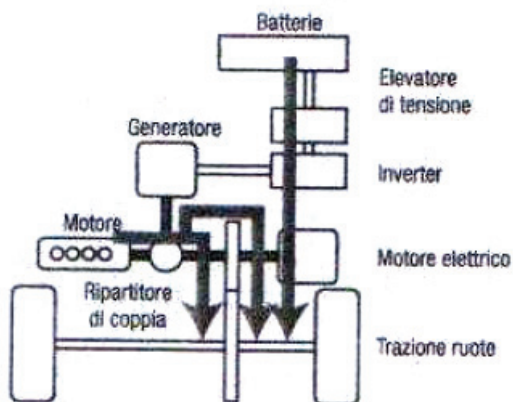
1 In partenza lavora soltanto il motore elettrico



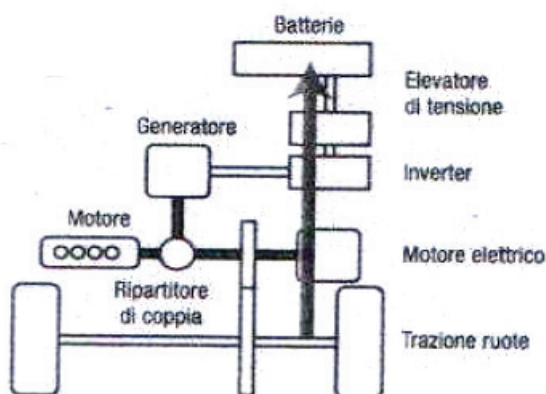
2 In normali condizioni di guida i motori collaborano



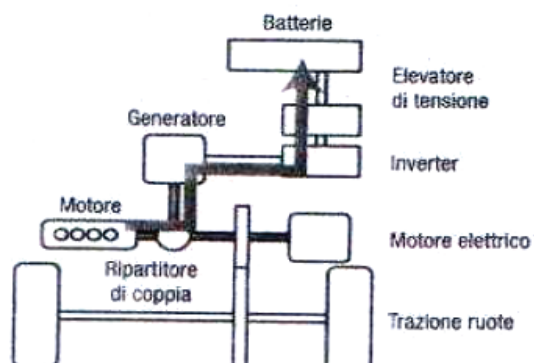
3 Sorpasso: cospicuo apporto di energia anche dalle batterie



4 In frenata il motore elettrico ricarica le batterie



5 Se troppo scariche, le batterie si ricaricano in automatico



Solo negli USA, a partire dal lancio commerciale della seconda generazione nel 2004, le vendite sono più che raddoppiate nell'arco di un anno con più di 48000 unità vendute. Lo slogan sintesi della filosofia Toyota è "Today for Tomorrow" che ne sottolinea la lungimiranza: il significato chiave è "Proactivity" che, come chiarisce Akihiko Saito (Executive Vice President Research & Development, Toyota Motor Corporation), indica l'approccio Toyota, circa gli obiettivi a lungo termine in vista di una mobilità sostenibile, di previsione dei problemi per anticipare lo studio e l'implementazione delle misure correttive.

In effetti il marchio Toyota è pioniere e leader per la tecnologia ibrida. Il sistema originale THS Toyota Hybrid System è stato modificato nel 2004 (Second-Generation Prius) con il THSII che ha mostrato efficienza e performance migliorate entrambe del 30%.

Tale sistema è basato sul concetto rivoluzionario Toyota Hybrid Synergy Drive THSD, principio basato su un'omogenea sinergia tra performance e coscienza ambientale.

I vantaggi del sistema Hybrid Synergy drive nella Prius sono:

- *prestazioni di guida eccellenti:* accelerazione simile a quella di un motore diesel del segmento D¹.
- *consumo di carburante ridotto:* 3,9 litri/100 km, equivalente a un'automobile diesel del segmento B¹.
- *emissioni ridotte:* emissioni di CO₂ pari a 10 g/km nel ciclo combinato ²,

rispetto ai 120 g/km della generazione precedente.

- *guida silenziosa*: il sistema HSD può prevedere la sola trazione elettrica, offrendo un'esperienza di guida nel più completo silenzio.

Per le emissioni rientra nella categoria EURO V. Quando l'utente seleziona "EV driving mode" la propulsione è a carico esclusivamente del motore elettrico, pertanto le emissioni sono nulle, anche quelle di tipo acustico; tale modalità può essere utilizzata per circa 2 km a seconda dello stato di carica della batteria (la ricarica avviene durante la guida), e fino ad una velocità di 50 km/h.

Un altro importante aspetto è quello delle performance nell'ambito del Life Cycle Assessment LCA (secondo lo standard ISO 14040), ovvero delle emissioni riferite all'intero ciclo di vita dell'auto: 43% in meno di emissioni di CO₂ a parità di chilometri percorsi rispetto ad un veicolo a benzina delle stesse dimensioni.

Considerando l'intero ciclo di vita di un'automobile, è possibile misurarne accuratamente l'impatto complessivo in termini di materiali, produzione, emissioni e fine del ciclo di vita. La valutazione del ciclo di vita facilita la produzione di automobili più sostenibili dal punto di vista ambientale, poiché stabilisce obiettivi chiari.

Toyota ha sviluppato un sistema di valutazione ecologica dei veicoli, detto Eco-VAS (Ecological Vehicle Assessment System). Si tratta di un approccio completo per valutare l'intero ciclo di vita di un veicolo – dalla produzione all'utilizzo, fino allo smaltimento – in termini di impatto ambientale, partendo dalle fasi iniziali dello sviluppo, prima cioè che il veicolo sia effettivamente costruito.

Toyota ha iniziato a utilizzare il sistema Eco-VAS nel 2004 e ne ha intensificato l'implementazione nel 2005.

Per la pianificazione di una nuova automobile Toyota, l'ingegnere capo stabilisce obiettivi quantitativi per ridurre l'impatto ambientale. La valutazione viene effettuata su numerosi elementi.

Inizia dai materiali – compresa l'eliminazione di metalli pesanti come il piombo ed il cromo – dai componenti e dai metodi di produzione. Essa prosegue con l'analisi dell'efficienza dei consumi ed il livello delle emissioni durante l'utilizzo del veicolo e tiene conto della quantità di materiali che possono essere recuperati allo smaltimento, così come la riduzione complessiva delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita del veicolo.

¹ Le automobili del segmento B sono auto compatte come la Toyota Yaris. Le automobili del segmento D sono auto più grosse e potenti, come la Toyota Avensis.

² Percorso urbano ed extraurbano

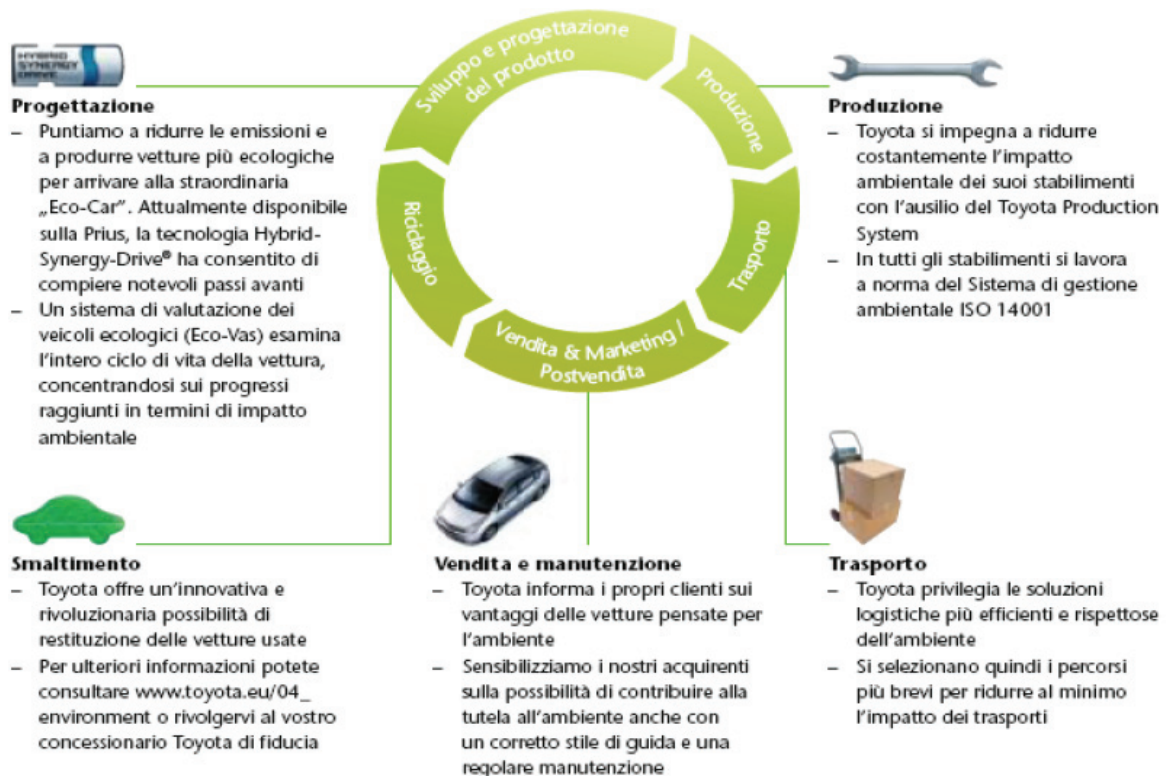


Figura 4.7 Valutazione dell'ecocompatibilità nell'intero ciclo di vita

I risultati di queste valutazioni sono archiviati in un database elettronico, utilizzato per confrontare i progressi compiuti verso gli obiettivi Eco-VAS e confermare la compatibilità ambientale di un nuovo veicolo in base al concetto della valutazione del ciclo di vita totale (LCA, Life Cycle Assessment). Se si consente ai team di sviluppo di valutare l'impatto ambientale di un nuovo veicolo prima della sua effettiva produzione, per Toyota sarà più facile garantire miglioramenti costanti passo dopo passo, verso la realizzazione dell'auto ecologica del futuro.

Per ottimizzare le risorse nella produzione delle automobili, Toyota ha sviluppato il sistema TPS (Toyota Production System).

Nel corso degli anni, il sistema TPS si è evoluto per raggiungere nuovi obiettivi ambientali. Oggi il sistema viene applicato in tutti gli impianti produttivi europei di Toyota. L'impegno costante a migliorare gli standard in ogni fase della produzione ha consentito di ridurre drasticamente l'impatto ambientale negli stabilimenti produttivi. Ne è conseguita una riduzione dei rifiuti destinati alle discariche pari al 73% dal 2001.

Il processo di produzione del nuovo modello Prius è stato organizzato per ridurre la quantità di energia necessaria alla costruzione del veicolo e diminuire le emissioni di CO₂ del 31% durante la produzione, rispetto al precedente impianto produttivo Prius.

L'attenzione posta in termini di materiali utilizzati privilegia quelli ad alto tasso di riciclabilità fino a rendere la Prius circa al 90% riciclabile. Diverse innovazioni contribuiscono a rendere la produzione ecologicamente più attenta:

ad esempio, laddove è possibile, si evita l'aggiunta di piombo, e quando è necessario incorporare materie plastiche, invece del PVC si utilizza il poliuretano riciclabile.

I tappetini sono prodotti in una plastica ecologica speciale di origine vegetale, che riduce ulteriormente le emissioni di CO₂ durante la produzione. Batterie più piccole ed efficienti, che generano il 33% di emissioni di CO₂ in meno durante la produzione rispetto alle generazioni Prius precedenti.

Si prevede che nel 2020 nel mondo circoleranno circa 1,2 miliardi di automobili, quasi il doppio delle automobili presenti oggi. Fin da subito, pertanto, le case automobilistiche devono prendere le giuste decisioni per fare in modo che tale crescita non causi un drastico aumento delle emissioni di gas di scarico e di gas serra come l'anidride carbonica.

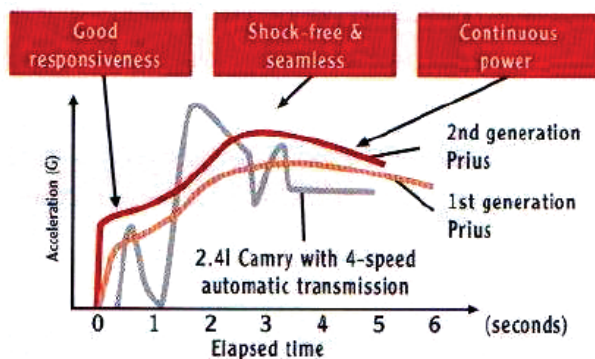
Per affrontare il problema delle emissioni dei gas di scarico, Toyota ha deciso di esplorare contemporaneamente un'ampia varietà di soluzioni per produrre veicoli più puliti ed eco-compatibili. Il motivo di questo approccio eterogeneo risiede nel fatto che in Paesi e comunità diverse esistono condizioni di guida, combustibili, infrastrutture automobilistiche e leggi diverse.



Una delle tecnologie più promettenti per la riduzione delle emissioni nelle automobili convenzionali è proprio la tecnologia ibrida, che unisce i vantaggi di due tipi di fonti energetiche, anziché fare affidamento su un'unica fonte. A seconda dell'utilizzo del veicolo, altri tipi di tecnologie a bassa emissione si sono rivelati altrettanto efficaci, benché non si possano ancora considerare maturi o versatili come i motori a benzina e diesel. Tali tecnologie comprendono le celle a combustibile (in cui l'idrogeno è utilizzato per generare elettricità) e i motori a metano.

Per quanto riguarda invece i miglioramenti nell'ambito delle performance, rispetto alla First-Gen, si può evidenziare quanto segue:

L'accelerazione è pari a 7,4 secondi da 0 a 80 km/h, 7,2 secondi da 60 a 100 km/h, 8,4 secondi da 80 a 120 km/h.



Il grafico a lato mostra come per l'accelerazione, importante nella pratica per i sorpassi, la potenza convertita elettricamente e l'output elevato del motore elettrico assicurino un'accelerazione continua senza salti di velocità o reazioni ritardate raggiungibile solo con un sistema ibrido.

Con la terza generazione del veicolo si è ottenuta un'ulteriore riduzione della resistenza aerodinamica (drag coefficient 0,25), un aumento dell'efficienza, adozione di componenti più leggeri. Si tratta di un coefficiente aerodinamico particolarmente basso per un'auto di serie: il ruolo dell'aerodinamica è basilare per la riduzione dei consumi e il miglioramento delle prestazioni.

Toyota Hybrid System THS

Il sistema della Prius è una combinazione serie/parallelo che massimizza i vantaggi di entrambi.

Dunque raggiunge il massimo livello di efficienza utilizzando entrambi i motori per la propulsione, ma può far funzionare anche solo il motore elettrico.

Inoltre, ove necessario, simultaneamente alla propulsione in modalità elettrica il motore può funzionare da generatore per produrre energia elettrica aggiuntiva.

La full hybridisation consente miglioramenti dell'efficienza per quattro motivi principali. Il primo è la possibilità di arresto del motore termico quando cala in termini di rendimento, ovvero a bassi regimi (anche in caso di idling), un secondo aspetto riguarda il sistema di trasmissione CVT Continuously Variable Transmission che si approfondirà in seguito, un terzo motivo è rappresentato dalle

caratteristiche del motore termico ad altaefficienza (Atkinson cycle- high expansion ratio cycle) e infine la rigenerazione energetica durante la decelerazione.

Ovviamente occorre considerare che a tal fine ogni componente deve essere studiato per raggiungere un alto valore di efficienza.

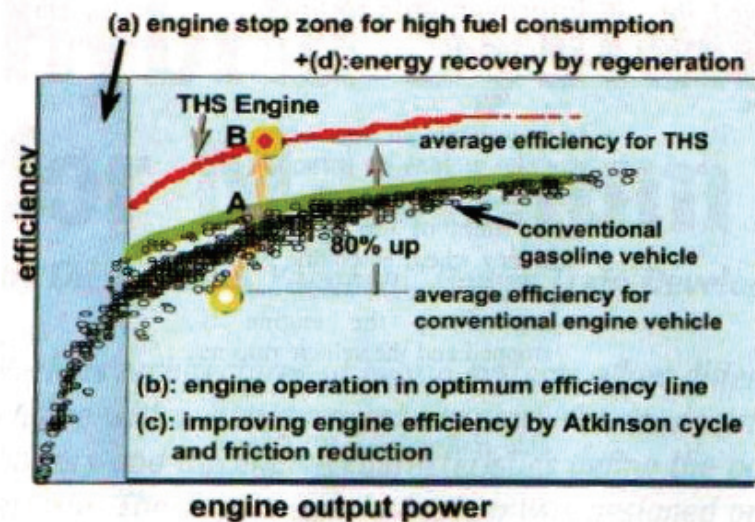
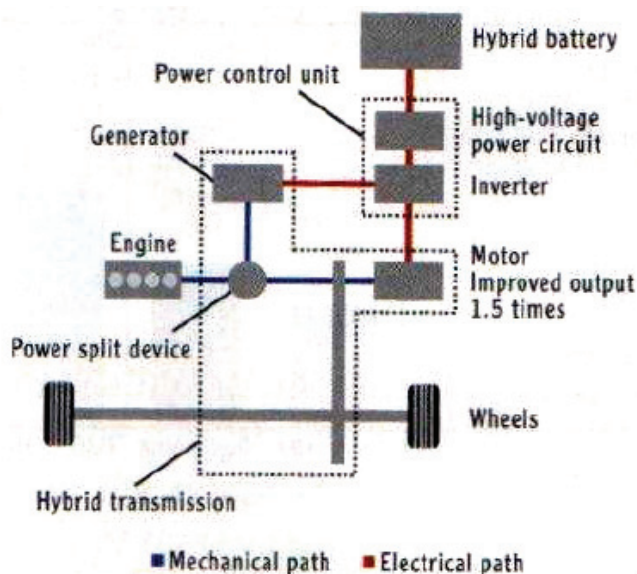


Figura 4.8 Incremento di efficienza del sistema THS paragonato ad un motore CI convenzionale

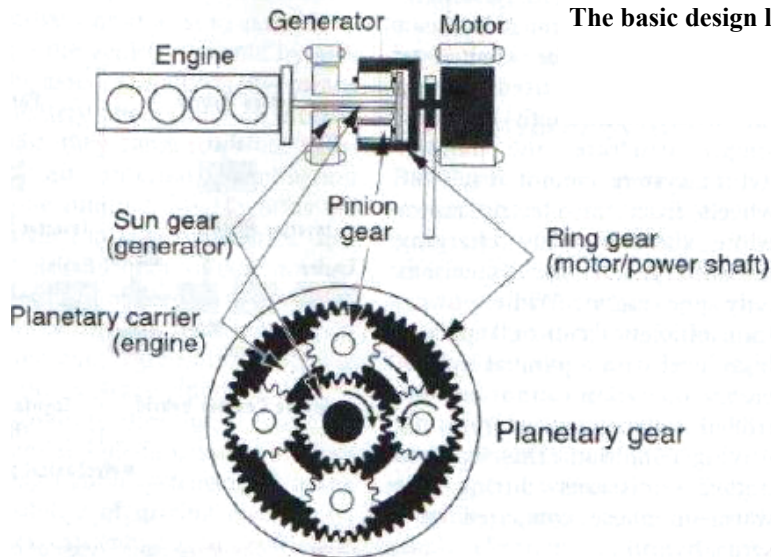
Come già scritto, il primo veicolo equipaggiato con il sistema THS, nuova tipologia detta series/parallel hybrid, venne presentato sul mercato nel dicembre 1997, mentre nel settembre 2003 iniziò la vendita del THSII, “the second-gen” ovvero il primo passo verso l’innovativo concetto Hybrid Synergy Drive.

Toyota Hybrid System II system configuration



Si nota la medesima configurazione del modello precedente per quanto concerne la trasmissione: una combinazione serie/parallelo con un ripartitore di tipo epicicloidale.

Anche i due motori sono della stessa tipologia; la differenza sta nella presenza del converter ad alta tensione posto tra la batteria e il motore elettrico mentre nel THS la tensione della batteria trascinava direttamente il motore/generatore. La tensione di quest’ultimo nel THSII è variabile con un massimo di 500 V (650 V nella terza generazione), invece la tensione della



The basic design layout for THS e THSII

batteria è di circa 200 V. Questo concetto passa sotto il nome di Variable-Voltage System e consente, mediante la Power Control Unit, di integrare un DC/DC converter e un A/C inverter per alimentare elettricamente il sistema di climatizzazione e componenti legati alla sicurezza come il circuit break sensor, in modo che la potenza elettrica venga fornita al motore con basse

intensità di corrente incrementando l'efficienza.

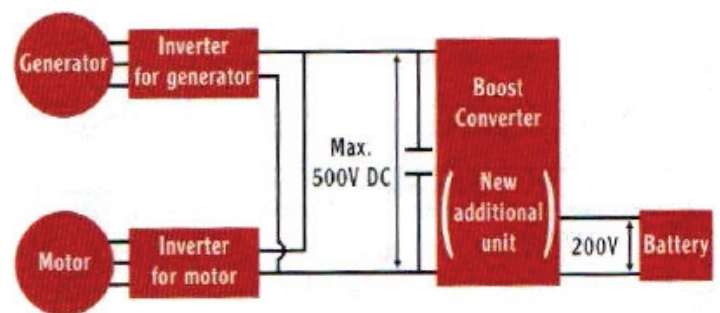
L'innovativo boost converter circuit integrato nella power control unit aumenta la tensione del motore/generatore dai 274 V DC della first-gen fino a 650 V DC e, minimizzando le dimensioni dei componenti, funziona allo stesso livello di potenza della batteria.

La relazione $P=VI$ mostra che raddoppiando la tensione, la corrente è dimezzata e si ha che $P = I^2R$, ovvero se la resistenza è costante le perdite di potenza per effetto Joule sono ridotte ad un quarto, a dimostrazione del fatto che aumentare la tensione a pari potenza significa aumentare l'efficienza.

Si può notare anche che a pari corrente la potenza aumenta proporzionalmente con la tensione: a 500 V DC la potenza erogata dal motore aumenta circa 2.5 volte rispetto al caso 200 V DC. A pari corrente significa mantenere le stesse dimensioni del motore/generatore del THS, nonostante un considerevole incremento di potenza erogata dal motore elettrico da 33 KW a 60 KW. Un sistema di ottimizzazione regola l'output di tensione a seconda degli stati del motore/generatore, di modo da minimizzare le perdite nell'inverter (switching losses), nell'inductor e nel converter (copper losses).

Il boost converter consiste in un paio di IGBT Insulated Gate Bipolar Transistors, un induttore, un condensatore principale e un filtro.

Questo sistema, Variable-Voltage System, è caricato e scaricato continuamente senza modificare il percorso elettrico. Lo switch degli IGBT è regolato tramite software secondo duty cycles, essi incrementano la tensione della batteria e controllano la tensione del condensatore principale. Ciò genera una corrente:

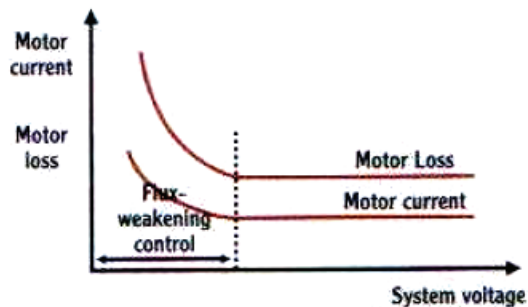


induttore e filtro sono preposti alla sua riduzione per aumentare l'efficienza. La tensione del capacitore principale è detta di sistema: system voltage.

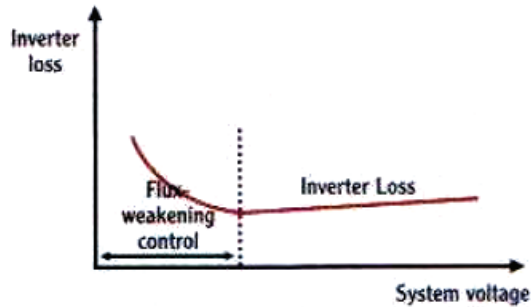
Le alte performance del THSII sono dovute al fatto che il motore/generatore continua ad erogare alti livelli potenza indipendentemente dal livello di tensione della batteria.

Ai fini dell'efficienza occorre considerare le perdite di ogni componente del sistema:

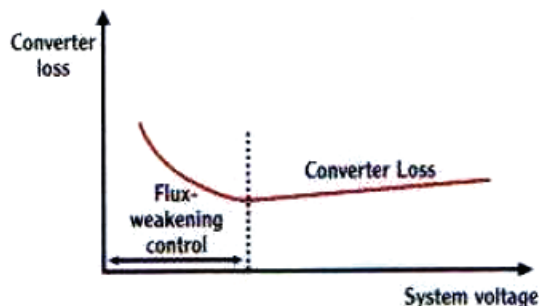
Il motore sincrono AC a magneti permanenti non è adatto al funzionamento ad alta velocità: diventa incontrollabile quando la tensione nel motore supera quella nella batteria perchè aumenta la forza elettromotrice indotta dal rotore. Accade che aumentando la fase rispetto all'angolo di coppia massima, viene generato un flusso che sopprime quello magnetico, di conseguenza la tensione nel motore è ridotta ed è compromesso il funzionamento a regimi elevati. Per questa motivazione, in condizioni di alta velocità, la tensione nel motore è regolata da un organo detto flux-weakening control in modo che non superi quella nella batteria. Nel funzionamento nel range descritto al motore deve fluire più corrente per ottenere lo stesso livello di potenza, con conseguente diminuzione dell'efficienza. Perciò al fine di ottenere un'efficienza più elevata possibile, la tensione del sistema coincide con la minima tensione che non richiede la funzione flux-weakening control.



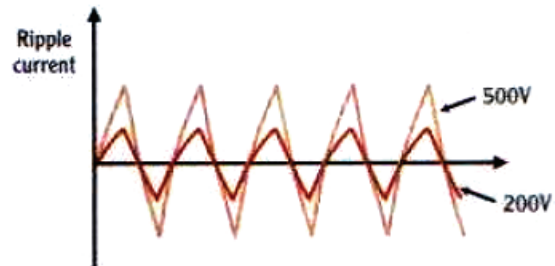
Relation between system voltage and motor loss



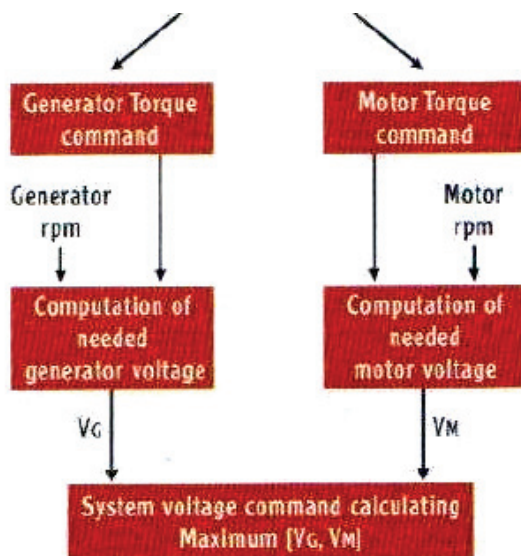
Relation between system voltage and inverter loss



Relation between system voltage and converter loss

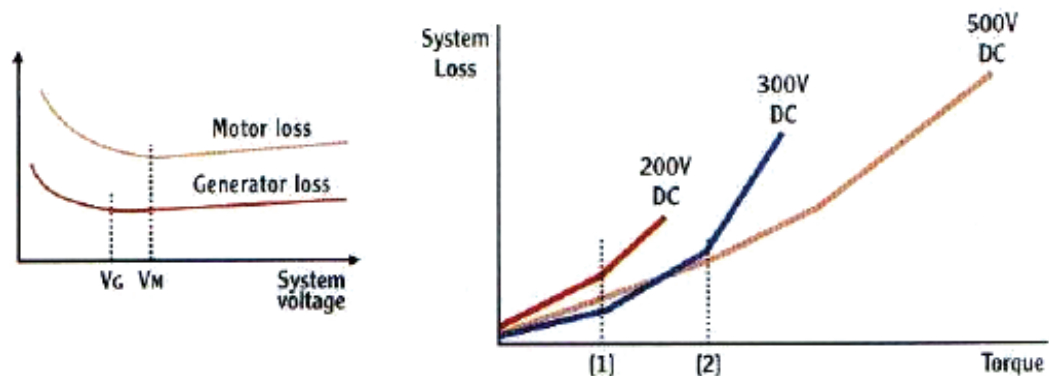


Relation between system voltage and ripple current



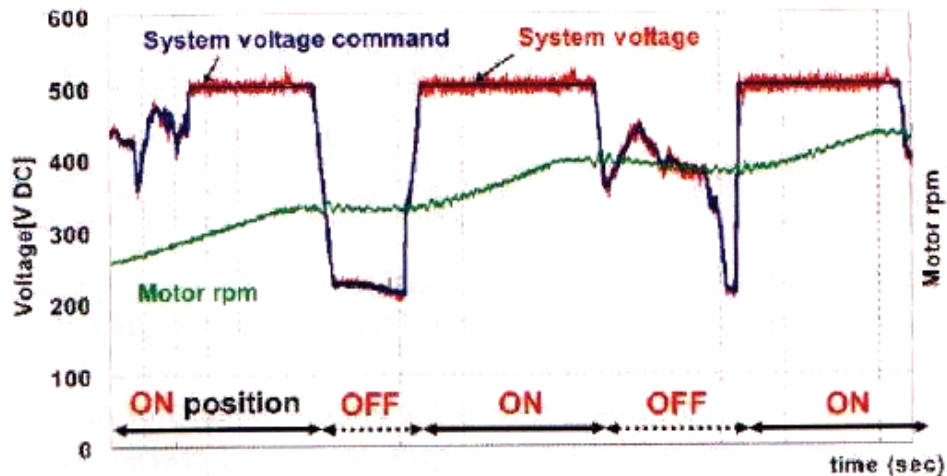
La figura a lato riporta uno schema di calcolo per la tensione del sistema. Innanzitutto le rispettive tensioni del motore e del generatore sono calcolate dai valori di coppia e di velocità. Viene selezionato il livello maggiore di tensione tale da implementare il variable-voltage system, ossia il corretto valore di tensione sia per il motore che per il generatore che consente di minimizzare le perdite, massimizzare l'efficienza del sistema e assicurare per entrambi condizioni di funzionamento e controllo precise.

La figura seguente evidenzia i criteri di scelta della tensione del sistema presentando per tre livelli di tensione le relative perdite del sistema.

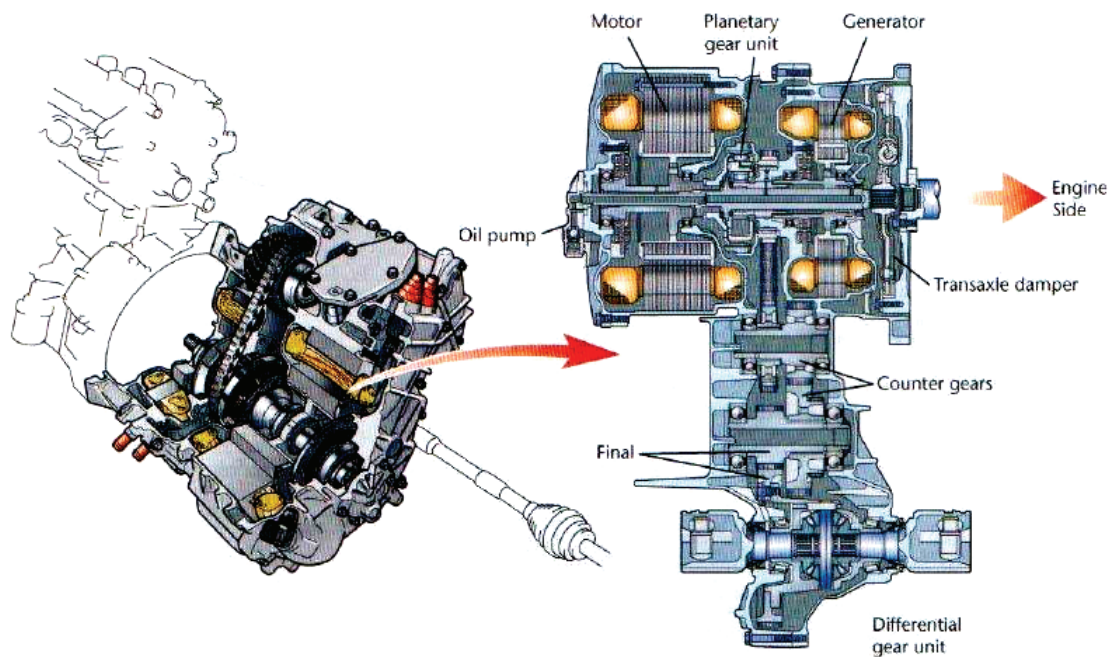


In particolare nel punto [1] le perdite relative al caso 200 V DC sono dovute principalmente alla funzione di flux-weakening control. La soluzione preferibile nella condizione di funzionamento schematizzata dal punto [1] è 300 V DC. Però si nota che all'aumentare della coppia la soluzione 300 V DC necessita anch'essa della funzione di flux-weakening control, pertanto quella ottimale diventa 500 V DC.

La figura seguente rileva la tensione del sistema alternando accelerazione (ON) e decelerazione (OFF). Si evince come la tensione aumenti in fase di accelerazione e diminuisca bruscamente in fase di decelerazione, malgrado ciò la tensione del sistema è controllata in modo stabile e la curva in verde mostra il risultato di tale ottimizzazione. È possibile notare dal grafico che appena il veicolo è accelerato da fermo la tensione del sistema è inizialmente la stessa della batteria, poi aumenta durante l'avviamento fino a stabilizzarsi al valore di 500 V DC.

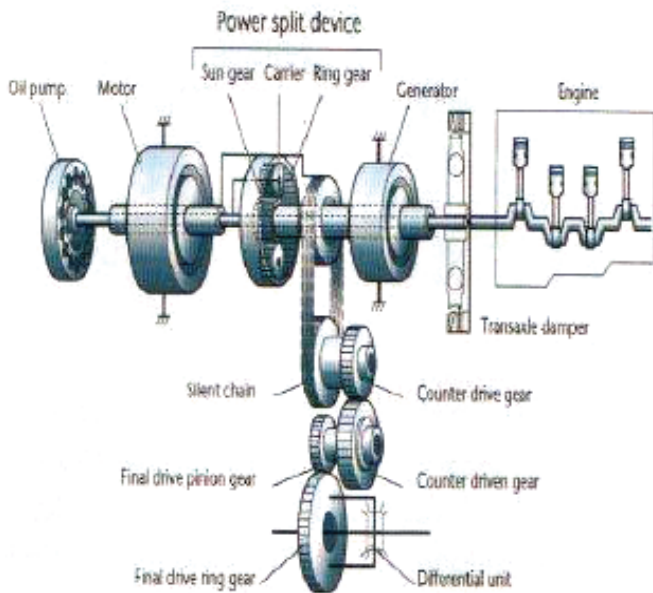


Continuously Variable Transmission (CVT)



L'integrazione tra motore, generatore e motore elettrico nella trasmissione ibrida è assicurata dal ripartitore (power-split device) e da precise funzioni di controllo elettronico. Mentre il motore termico e le due macchine elettriche (motore e generatore) hanno una connessione meccanica permanente con le ruote senza frizione o un convertitore di coppia, la trasmissione ibrida fornisce un'infinita variazione di rapporti di trasmissione che consente di avviare o fermare il motore sia quando il veicolo è fermo che durante la guida.

Il power split device divide tra le due macchine elettriche la potenza proveniente dal motore termico. Dunque una parte perviene al motore elettrico a scopo



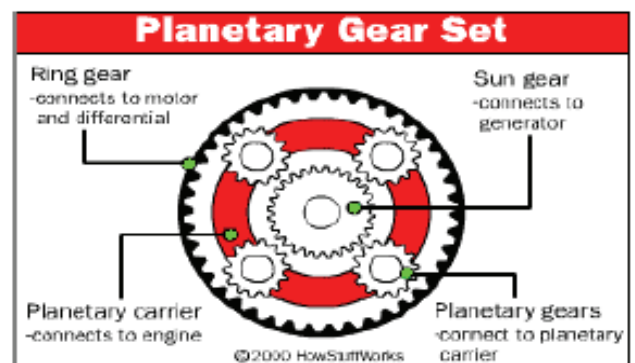
propulsivo, l'altra al generatore. La potenza motrice del motore termico è scissa nella trasmissione in via meccanica e in via elettrica. Tale dispositivo è il centro nella progettazione della trasmissione della Prius la quale si pone nel panorama ibrido come sistema innovativo rispetto al tradizionale utilizzato tal quale in altri veicoli ibridi. È una scatola del cambio che collega il motore termico e le due macchine elettriche consentendo al veicolo di funzionare come un ibrido in parallelo

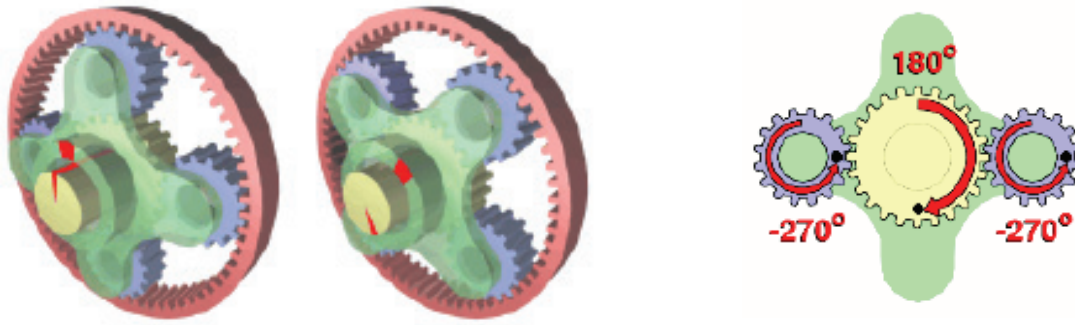
(la propulsione può essere a carico esclusivamente del motore termico o del motore elettrico o di entrambi) e come un ibrido in serie (il motore termico può, indipendentemente dalla velocità del veicolo, fornire potenza alle ruote o ricaricare la batteria). Inoltre attua la cosiddetta continuously variable transmission (CVT) eliminando il bisogno di una trasmissione manuale o automatica e consente al generatore di avviare il motore termico. Si prevedono più rapporti di trasmissione per utilizzo efficace della coppia al variare delle condizioni di guida e le marce possono essere innestate in modo manuale o automatico. A differenza della trasmissione tradizionale, la CVT non prevede un cambio con un determinato numero di rapporti ma consente una variabilità infinita tra il più basso e il più alto numero di rapporti, in modo continuo anziché discreto. Si tratta di una trasmissione a variazione continua a gestione elettronica che si sincronizza automaticamente alla velocità del veicolo e alle sollecitazioni del motore.

La figura a lato mostra in dettaglio il power split device. La configurazione di tale dispositivo è nota nella letteratura tecnica come "epicyclic gearing" oppure "planetary gearing".

Il sistema si compone di più ingranaggi periferici delle stesse dimensioni detti "planet gears" rotanti attorno e connessi a un ingranaggio centrale detto "sun gear". Tipicamente i planet gears sono allocati su un braccio mobile detto carrier che può ruotare solidalmente con il sun gear. È presente un anello esterno detto ring gear o annulus, con i denti rivolti verso l'interno, che connette i planet gears.

Il meccanismo consente di aumentare la velocità in output. Il planet gear carrier (in verde nella figura seguente) è trascinato dalla coppia in input. Il sun gear (in





giallo) fornisce la coppia di output, mentre il ring gear (in rosa) è fisso. In blu si hanno i planet gears.

Le tacche in rosso indicano una rotazione di 45° in senso orario tra prima e dopo che è fornita la coppia di input. I planet gears ruotano secondo rapporti determinati dal numero dei denti di ogni ingranaggio.

Ad esempio nella figura si osserva che il rapporto è $-24/16$ (24 sono i denti del sun gear e 16 quelli di ogni planet gear), cioè $-3/2$ dove il segno meno sta ad indicare che i planet gears ruotano in senso opposto rispetto al sun gear.

Il dispositivo in analisi è connesso al differenziale, ovvero l'ultimo elemento prima delle ruote.

Le funzioni del differenziale sono: condurre la potenza erogata dal motore alle ruote, ridurre la velocità di rotazione della trasmissione prima che investa le ruote (essendo l'ultimo ingranaggio nella trasmissione del veicolo), e infine, ciò da cui ne deriva il nome differenziale, consentire diverse velocità di rotazione alle ruote.

Il generatore è connesso al sun gear e il motore termico è connesso al planet carrier. Dalle correlazioni presentate si evince che il controllo sulla velocità di output coinvolge l'intero meccanismo power-split.

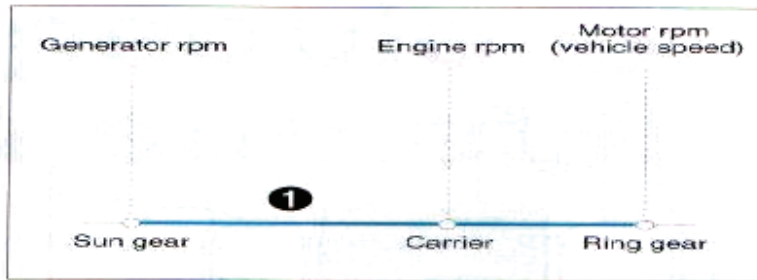
In fase di accelerazione il motore elettrico e le batterie forniscono inizialmente l'intera potenza necessaria.

Il ring gear, essendo connesso al motore elettrico, è messo in rotazione da quest'ultimo. Il planet carrier che è collegato con il motore termico è fermo perché questo non sta funzionando. Il ring gear causa la rotazione dei planet gear e di conseguenza del sun gear e del generatore ad esso connesso.

Raggiunta una velocità di circa 40 miglia orarie (64,37 km/h) interviene il motore a benzina. Il generatore cambia improvvisamente velocità e inizia la rotazione del planet carrier che avvia il motore termico. La velocità di rotazione di quest'ultimo è costante, invece quella del generatore varia per regolare quella del motore elettrico in base alla velocità di output richiesta:

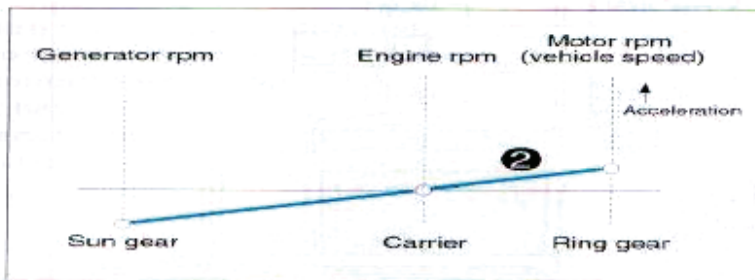
per raggiungere valori di picco di accelerazione il motore elettrico attinge potenza dalle batterie, altrimenti a velocità elevate la propulsione del veicolo è ottenuta dalla combinazione benzina/elettrico con l'intera potenza elettrica proveniente dal generatore.

Altre note circa lo schema della trasmissione ibrida sono a proposito della lubrificazione del meccanismo (oil pump). Tale pompa attinge potenza dal motore termico e provvede al rilascio del lubrificante solo quando funziona il motore termico di modo da ridurre le relative perdite.



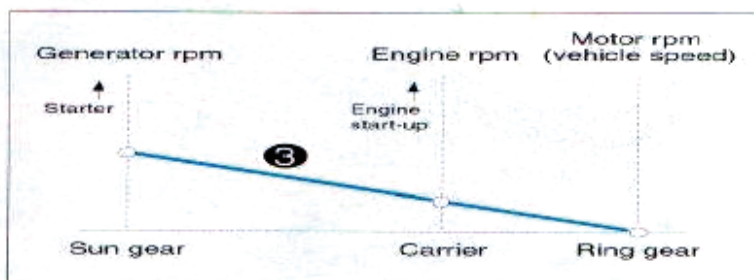
L'efficienza della trasmissione è migliorata dal sistema di trasmissione fluida a bassa viscosità "Toyota Auto Fluid WS".

1) veicolo fermo: motore termico, motore elettrico, generatore fermi

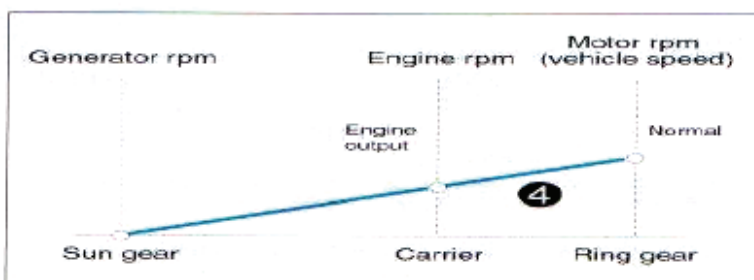


2) avviamento: funziona solo il motore elettrico

3) accelerazione: il generatore mette in rotazione il sun gear, avvia il motore termico e continua a produrre potenza elettrica di supporto al motore termico o per ricaricare la batteria



4) normali condizioni di guida: normalmente l'energia elettrica non è necessaria a contribuire alla propulsione, che quindi è solo a carico del motore termico, ma interviene in caso sia richiesta un'ulteriore accelerazione.



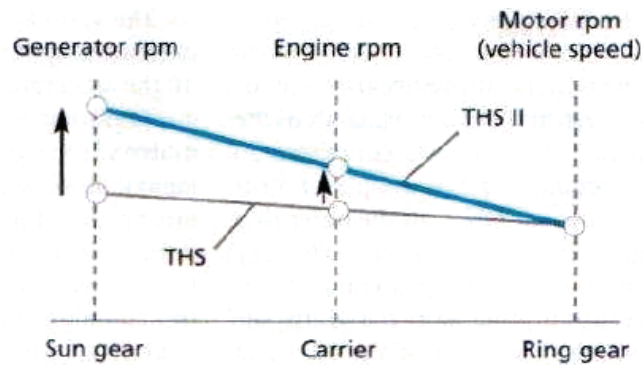
La funzione di supporto del motore elettrico, che fornisce la potenza aggiuntiva a complemento di quella del motore a benzina, si adatta ad ogni valore di potenza richiesto: tale controllo intelligente del motore termico, motore elettrico e generatore si traduce nella CVT Continuously Variable Transmission. Il motore elettrico è una macchina sincrona AC ad alta

efficienza composta di magneti permanenti di neodimio e da un rotore a formare una pila di piatti elettromagnetici in acciaio.

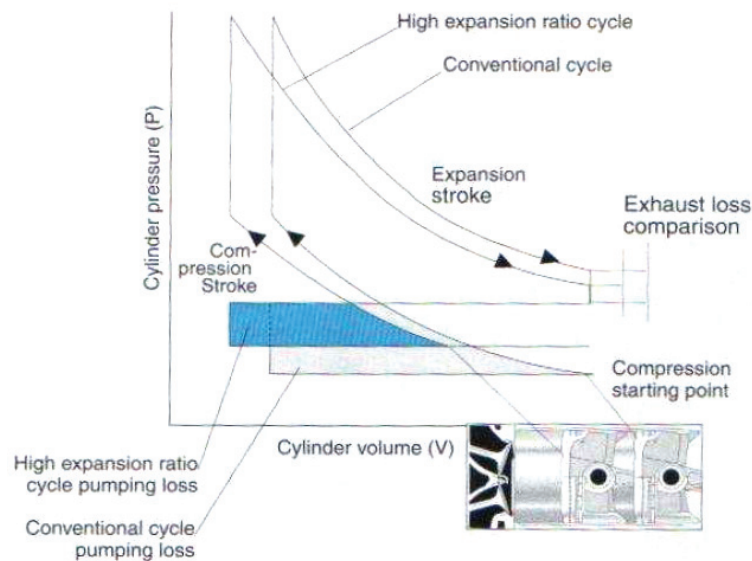
Nel THSII, di cui sono già stati accennati i miglioramenti in termini di coppia e di potenza, i magneti permanenti sono disposti secondo una forma a V che ne ottimizza il funzionamento.



Anche il generatore è una macchina elettrica di tipo sincrono AC, la figura mostra come nel THSII è stato possibile aumentare l'output: ruotando la curva ad alte velocità di rotazione ottenendo, dai 6500 RPM massimi del THS, 10000 RPM in modo che il generatore possa produrre maggiore elettricità raggiungendo l'ottima combinazione tra motore elettrico e motore termico.



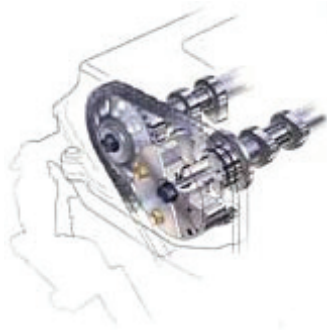
Per quanto concerne il motore termico, rispetto al THS, è stato aumentato il rapporto di espansione riducendo il volume della camera di combustione, raggiunge un'elevata efficienza utilizzando il ciclo Atkinson, uno dei cicli più efficienti dal punto di vista termodinamico e ad alti rapporti di espansione.



Si tratta di un ciclo Otto, ma con un manovellismo dell'albero motore modificato in modo da bilanciare una diminuzione di potenza con un'efficienza maggiore. Si pensi ad un motore a quattro tempi, nel quale la valvola di aspirazione viene lasciata aperta più a lungo del normale, onde permettere un reflusso dei gas

attraverso il condotto d'aspirazione. Questo riduce il rapporto di compressione efficace e, in combinazione con una fase più lunga e/o un inferiore volume della camera di combustione, permette al rapporto di espansione di superare quello di compressione.

Ciò avviene a pressione costante. Questo sistema è adatto per motori a basso consumo, in quanto il rapporto di compressione è limitato dal numero di ottano³ del carburante, mentre un alto rapporto di espansione sviluppa una fase attiva più lunga e riduce il calore disperso allo scarico. Ciò ne fa un motore più efficiente. Motori a quattro tempi di questo tipo con alimentazione forzata (supercharging) sono altrimenti noti come motori a Ciclo Miller.



Inoltre è stato introdotto un sistema di distribuzione a variazione continua delle valvole di aspirazione (VVT-i): il variatore di fase VVT-i (variable valve timing intelligent) controlla la fasatura a variazione continua adeguandola costantemente in funzione delle condizioni di funzionamento e quindi delle esigenze del motore. Le continue modifiche dell'angolo di incrocio delle valvole indotte dal variatore di fase garantiscono una combustione sempre ottimale, assicurando così un aumento della coppia nonché eccellenti valori di consumo e di emissione.

Toyota ha riesaminato la struttura del motore a combustione interna per capire in che modo sia possibile migliorare il rendimento dei motori a benzina e diesel riducendo il consumo di carburante ed emettendo quindi meno CO₂ e altri gas indesiderati. Tale ricerca ha portato allo sviluppo di tecnologie intelligenti integrate che sfruttano soluzioni avanzate all'interno dei motori per ottimizzare il consumo di carburante e la guida. Una di queste è la tecnologia VVT-i con fasatura variabile delle valvole a controllo elettronico, che consente di consumare meno carburante rispetto ad analoghi motori a benzina e di emettere meno anidride carbonica, ossidi di azoto ed idrocarburi incombusti.

Il grande vantaggio di questo sistema è dato dal fatto che la fasatura può essere variata in continuo adeguandosi quindi in modo ottimale a qualsiasi esigenza di funzionamento del motore. Il momento d'apertura della valvola d'aspirazione è determinante per un buon riempimento del cilindro. Il VVT-i lo adegua alle corrispondenti condizioni di funzionamento: tramite una valvola elettromagnetica il computer di controllo del motore regola la pressione idraulica all'interno dell'anticipo automatico che regola la posizione dell'albero a camme d'aspirazione: potenza migliorata, coppia più dinamica, valori di consumo e di emissione più bassi. La combustione ottimale a temperature elevate riduce la quantità di ossidi di azoto nei gas di scarico. Gli angoli di incrocio relativamente ampi a bassi regimi limitano invece la quantità di carburante incombusto contribuendo così alla diminuzione sia delle emissioni di idrocarburi nocivi sia dei consumi. Il variatore VVT-i agisce idraulicamente sull'albero a camme che

³ **Numero di Ottano:** indica il potere antidetonante di un carburante per motori a ciclo Otto. Più' alto e' il numero di ottano, maggiore e' il potere antidetonante (e quindi piu' elevato il rapporto di compressione che si puo' adottare senza che insorga la detonazione).

comanda le valvole di aspirazione, modificandone l'inclinazione (fino a un massimo di 60°) rispetto all'albero motore. Tenendo conto del carico e delle condizioni di funzionamento, la centralina ECU (Engine Control Unit) varia la pressione dell'olio nell'unità di comando VVT-i, posta all'estremo dell'albero a camme. Tale pressione agisce su un'elica che modifica l'inclinazione dell'albero rispetto alla catena della distribuzione. A motore spento, un perno a comando idraulico mantiene l'albero a camme nella posizione "anticipo" al fine di facilitare un nuovo avviamento.

Hybrid Battery

L'efficienza e le performance di un sistema di propulsione ibrido dipende dalla capacità della batteria di immagazzinare e rilasciare energia. Le nuove batterie Ni-MH sviluppate per la seconda generazione offrono minor impatto sull'ingombro, sul peso e sul prezzo.

Il nuovo sistema consente di avere maggiore densità energetica rilasciata dalla batteria rispetto al modello precedente, seppur a parità di vita utile.

I miglioramenti sono stati testati oltre che in azienda, nelle reali condizioni di funzionamento, ad esempio in Svezia in 300000 km di servizio taxi.

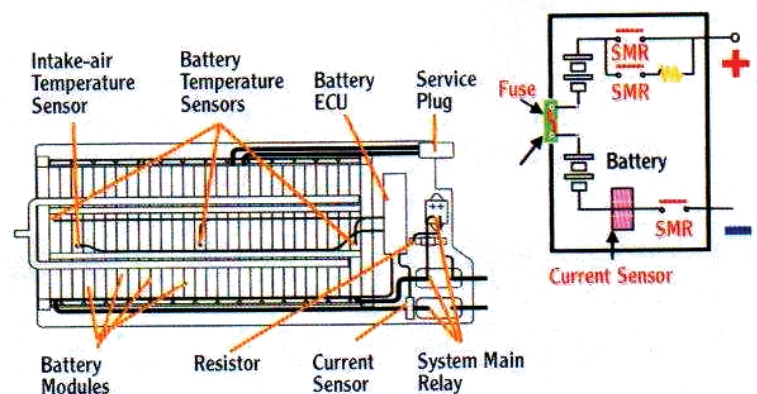
La batteria in questione si presenta come una struttura modulare compatta, ha migliori performance nel rilascio di calore e maggiore facilità di installazione rispetto a quella utilizzata nella first-gen. La batteria in idruro di metallo si carica esclusivamente dal generatore o dal sistema frenante rigenerativo.

Per questo motivo non necessita mai di essere ricaricata dalla rete.

In particolare, la resistenza interna è stata ridotta del 30%; ciò è stato possibile agendo sul materiale degli elettrodi: sono stati compiuti miglioramenti strutturali nelle connessioni tra una cella e l'altra di modo da ridurre la resistenza tra le parti. Si è ottenuto un incremento della potenza specifica del 35%.

Nel modello del 1997 la struttura modulare si componeva di sei celle cilindriche già di tipo Ni-MH connesse in serie. Per il modello del 2001 vengono invece utilizzate celle rettangolari, sei delle quali connesse in serie e integrate a costituire un modulo prismatico. Le migliorie apportate consentono di raggiungere lo stesso livello di output con un minor numero di unità modulari; ciò rende minore la tensione di alimentazione quindi riduce l'efficienza delle macchine elettriche. Per evitare questo fenomeno la second-gen si avvale del variable-voltage system. Il nuovo battery pack ha 28 moduli disposti in una singola riga (dai 38 del modello antecedente) con una riduzione del volume del 15% e della massa del 25%.

La figura mostra le componenti della batteria di nuova concezione. Il "battery ECU" è un dispositivo che ne calcola lo stato di carica (state of charge SOC) sulla base di



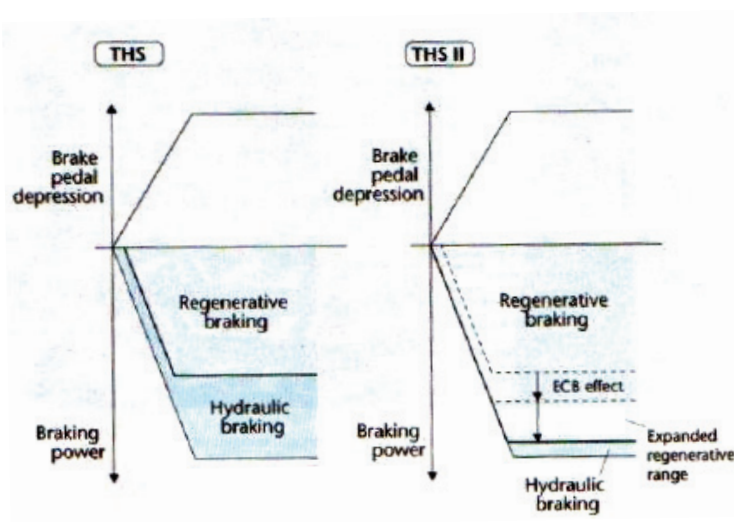
corrente, tensione e temperatura, e segnala ogni eventuale anomalia del sistema batteria. Riducendo il numero dei moduli e dunque della tensione, si ha maggiore corrente a parità di potenza e di conseguenza aumenta il range di fluttuazione dello stato di carica.

Il contenuto energetico della batteria è stato ridotto da 1.8 KWh a 1.3 KWh mantenendo lo stesso livello di capacità di 6.5 Ah.

Regenerative Braking System

È un sistema particolarmente efficace nel recupero di energia in condizioni di guida urbana in cui comunemente si rileva una maggiore alternanza di accelerazioni e decelerazioni.

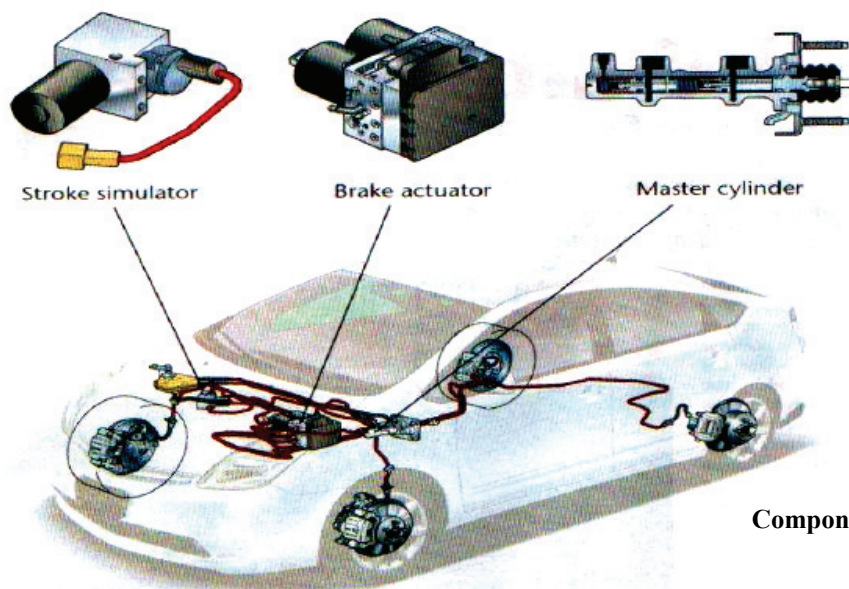
Durante la frenata l'energia cinetica del veicolo viene convertita in energia elettrica che va a ricaricare la batteria.



Nel THSII il nuovo sistema ECB Electronically Controlled Braking System controlla la coordinazione tra il proprio freno idraulico e il freno rigenerativo, preferendo l'utilizzo di quest'ultimo per recuperare energia anche a basse velocità. In figura si mostra come tale sistema nel THSII abbia migliorato l'efficienza e di conseguenza ridotto il consumo. Il sistema ECB ha consentito una riduzione di peso del 22% rispetto ad un sistema di frenata

convenzionale di un veicolo di categoria simile.

E la frenata rigenerativa aumenta la vita utile delle pastiglie dei freni, dei freni a disco e del sistema idraulico.



Componenti del sistema ECB

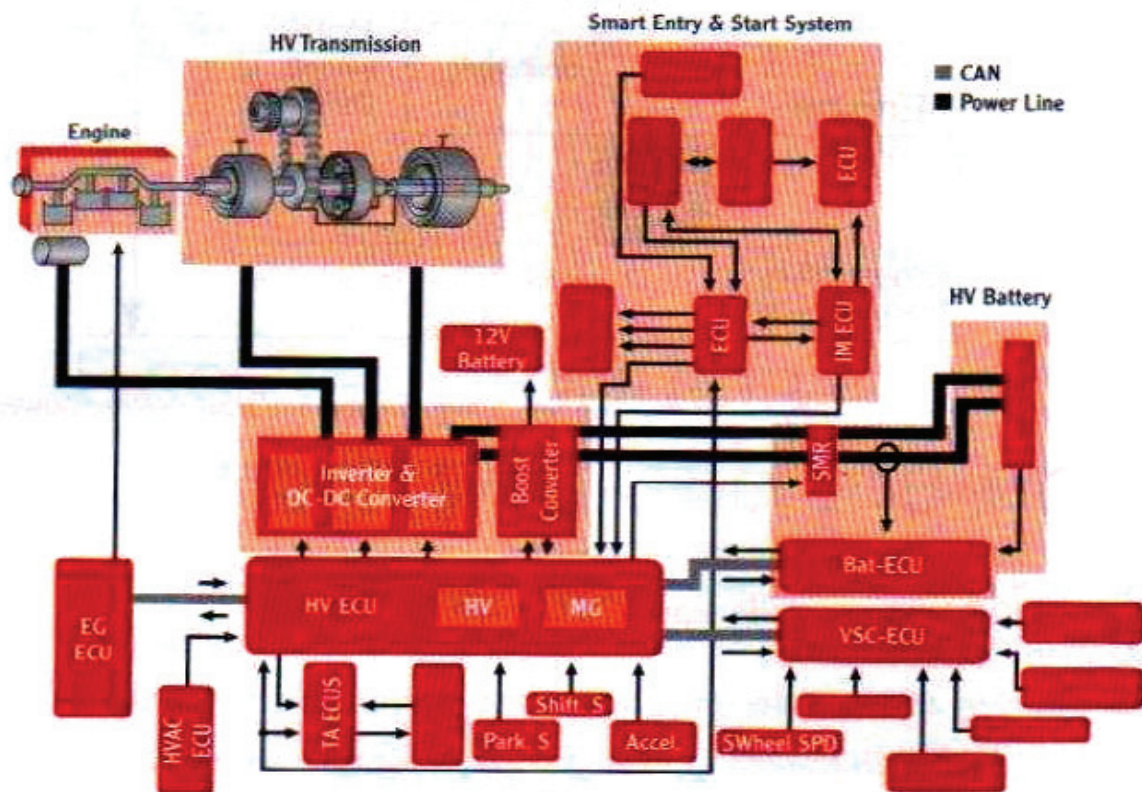
Control System

La gestione dei bilanci energetici nel veicolo include l'apporto di energia destinato ai dispositivi ausiliari come il sistema di climatizzazione (il climatizzatore funziona anche quando il motore a benzina è spento) o il navigatore.

Occorre tener conto istante per istante delle condizioni di guida valutando sempre lo stato di carica della batteria. Il sistema di controllo monitora in tempo reale gli stati di funzionamento dei vari componenti del sistema ibrido: il motore termico, il generatore che funge da starter per quest'ultimo e ne converte l'energia erogata in elettricità, il motore elettrico che si avvale dell'energia elettrica immagazzinata nella batteria, la batteria che accumula sotto forma di energia elettrica l'energia cinetica che sarebbe altrimenti dissipata durante la frenata. Il sistema in base alle informazioni rilevate in modo continuo, fornisce rapidamente risposte per assicurare che il veicolo funzioni sempre in condizioni di maggior sicurezza, comfort ed efficienza possibile.

L'inverter trasforma la corrente alternata prodotta dal motore elettrico (che agisce come generatore) in corrente continua per la batteria e viceversa, controllando parallelamente il flusso di energia per consentire il funzionamento del climatizzatore elettrico anche quando il motore a benzina è spento.

L'immagine proposta mostra la configurazione della rete per il sistema di controllo.



La nuova Prius non utilizza più la chiave di accensione convenzionale, bensì un interruttore che avvia l'intero sistema: smart start.

Un piccolo joystick sostituisce la classica leva del cambio: la leva elettronica del cambio (E-shift) per il controllo della trasmissione a variazione continua, è comodamente posizionata sul cruscotto vicino al volante.

Il sistema di controllo elettronico dei comandi (shift by wire system) insieme all'ECB caratterizzano un sistema completamente drive-by-wire per la generazione di potenza. Con la sola leva del Tempomat, sulla destra del piantone dello sterzo, è possibile regolare la velocità e comandare l'acceleratore a mano per l'esatta impostazione del regime di lavoro: una volta stabilita una certa velocità si attiva un controllo elettronico della velocità sul motore.



Inoltre è la prima auto al mondo dotata di serie del sistema intelligente di assistenza al parcheggio IPA (Intelligent Park Assist): Il sistema parcheggia automaticamente la vettura nel posto scelto.

Una videocamera sul retro dell'auto calcolerà i movimenti del volante necessari per entrare nel parcheggio. Il guidatore deve solo regolare la velocità della retromarcia.

I sistemi elettrici reagiscono con maggiore rapidità rispetto ai sistemi idraulici e per questo motivo vengono applicati laddove i tempi di risposta e la sicurezza costituiscono degli elementi-chiave, come per esempio nell'industria aeronautica. I cosiddetti sistemi "drive-by-wire", che funzionano esclusivamente sulla base di impulsi elettrici, nella Toyota Prius vengono impiegati laddove sono necessari tempi di risposta rapidissimi e un perfetto controllo.

I dispositivi di controllo sono sincronizzati e le istruzioni del conducente vengono convertite in segnali elettrici: l'affidabilità è l'aspetto prioritario.

Il sistema verifica se il computer ibrido stesso funziona correttamente e attua un controllo specifico prima che sia premuto il pulsante di avvio, all'atto dell'avvio controlla che siano operativi i sensori, il motore, le macchine elettriche, la batteria e dunque procede a dare il via alla propulsione. La sequenza descritta è nota come "startup control".

Quando si preme nuovamente il pulsante per spegnere il veicolo, il computer disconnette gli elementi ad alta tensione.

Il “drive power control” è invece il meccanismo di controllo base per minimizzare il consumo di energia.

Quando dalla fase dell’avvio, a carico esclusivo del motore elettrico, si passa all’utilizzo del motore a benzina il computer ibrido invia al computer MG (motor/generator) l’istruzione di avviare il motore termico.

Nello stesso tempo il computer ibrido calcola l’energia richiesta dall’intero veicolo, determina la modalità più efficiente per produrla e invia tali informazioni al computer MG. Il generatore monitora il regime di rotazione del motore e la potenza erogata.

In condizioni di flusso energetico normale, il ripartitore scinde l’output del motore termico in una quota diretta all’asse per la coppia di trasmissione e in una al generatore per produrre potenza elettrica per la coppia del motore elettrico. Tuttavia in determinati casi, la coppia del motore termico deve essere ridotta dal generatore: il processo che ha luogo è detto “energy re-circulation” e diminuisce l’efficienza della trasmissione. D’altro canto, se il motore termico è impostato ad alti regimi a basso carico e mantiene un output costante il processo può essere evitato, ma l’efficienza diminuisce comunque: il sistema di controllo intelligente stabilisce la soluzione che prevede l’efficienza ottimale.

Quando l’energia elettrica richiesta dagli ausiliari è relativamente bassa il computer ibrido segnala al converter di funzionare ad un minore livello di tensione, per evitare che venga fornito un eccessivo quantitativo di energia.

La sicurezza

Nel sistema di sicurezza attivo della Prius, vengono impiegati esclusivamente componenti elettrici ed elettronici. Il sistema controlla non solo l’antibloccaggio delle ruote (ABS), la ripartizione elettronica della forza frenante (EBD) e l’assistenza alla frenata (BA), ma anche il controllo dinamico della stabilità (VSC+), il controllo elettrico della trazione (TRC) e il servosterzo elettrico. La perfetta sinergia tra questi dispositivi è garantita da un circuito elettronico centrale che tiene sotto controllo tutti gli impulsi e assicura la perfetta sincronizzazione di tutte le unità.

In situazioni di emergenza, il circuito controlla con assoluta rapidità l’interazione fra i singoli sistemi, ottimizzandone l’efficienza. La perfetta interazione tra ABS, EBD e VSC+ contribuisce in modo essenziale a diminuire la probabilità di incidenti.

Inoltre, su Toyota Prius sono montate le luci di stop a LED, che presentano il doppio vantaggio di assicurare un risparmio sui consumi energetici rispetto alle normali lampadine incandescenti e di avere una rapidità di reazione maggiore, un ulteriore elemento di sicurezza.

Oltre agli strumenti messi in gioco per la sicurezza attiva è previsto un equipaggiamento di sicurezza passiva: zone di assorbimento, la struttura dell'abitacolo rinforzata, otto airbag.

Il blocco della batteria è completamente sigillato ed equipaggiato con speciali protezioni; il suo alloggiamento è stato particolarmente rinforzato per impedire che la batteria si danneggi o esca dalla sede in caso di incidente.

La Toyota Prius ha superato egregiamente i test di sicurezza dell'Euro NCAP, prima della sua categoria con 34 punti e con la valutazione migliore in assoluto (5 stelle). L'Euro NCAP è un centro che esegue test di sicurezza in totale autonomia e viene sostenuto da cinque governi europei, dalla Commissione Europea e da varie associazioni automobilistiche e di consumatori di tutti i Paesi europei.[25]

4.4 Extended-Range Hybrid

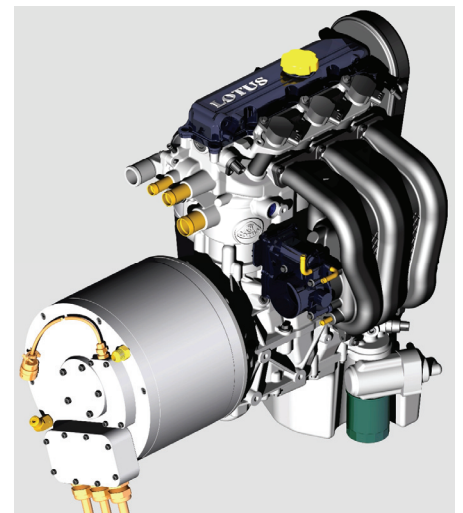
Le auto ibride range extender (*EREV, Extended Range Electric Vehicles*) sono veicoli che, a differenza delle altre auto ibride-elettriche, normalmente viaggiano con il motore elettrico e utilizzano il tradizionale motore a combustione interna (ad es. a benzina o a gasolio) solo nel caso in cui la batteria (in genere a ioni di litio) di cui sono dotate necessitasse di una ricarica e non fosse possibile farla altrimenti. Si tratta quindi, sostanzialmente, di auto elettriche, ed il motore termico ha la sola funzione di estendere l'autonomia da qualche decina di chilometri della ricarica tradizionale a qualche centinaio di chilometri. Questa opportunità di ricarica on-board delle batterie permette di usare un'auto elettrica anche per lunghe tratte autostradali o per veri e propri viaggi, cosa oggi non possibile con un veicolo elettrico puro, anche per l'assenza lungo le strade di una rete per la ricarica delle batterie in situazioni di "emergenza", cioè di carica in esaurimento.

4.4.1 Possibili range extender

Motore a combustione interna tradizionale

La scelta più immediata come "range-extender" è il tradizionale motore a combustione interna che, grazie al continuo sviluppo tecnologico, ha raggiunto ottime prestazioni per quanto riguarda costi e consumi.

L'utilizzo per l'alimentazione del motore elettrico o per la ricarica delle batterie permette di progettare propulsori di piccole dimensioni e con alte efficienze grazie alla possibilità di poter decidere un determinato campo di



utilizzo.

Lotus Engineering ha sviluppato un piccolo motore per applicazioni range-extender su veicoli ibridi serie.

Il tre cilindri 1200 cc di cilindrata produce 35 kW (47CV) a 3500 giri/min attraverso un generatore elettrico integrato e il peso è inferiore a 56 kg grazie all'utilizzo di un'architettura monoblocco in alluminio. [11]

Il motore è stato studiato esclusivamente per l'applicazione come range-extender ed è stato quindi possibile ottimizzare l'efficienza, il consumo di combustibile, la possibilità di utilizzare diversi combustibili (vedi tabella 4.1) e ridurre il costo dei componenti.

Questo moto-generatore è ottimizzato in un range compreso tra due punti, che forniscono rispettivamente 15 kW di potenza elettrica a 1500 rpm e 35 kW a 3500 rpm.

<i>CARATTERISTICHE</i>	<i>DATI</i>
Generale	1200 cc 3 cilindri, 2 valvole per cilindro Trasmissione a cinghia
Costruttiva	Monoblocco con collettore di scarico integrato Generatore direttamente accoppiato
Materiale	Alluminio
Alesaggio e corsa	75.0 mm x 90.0 mm
Rapporto di compressione	10:1
Potenza massima in uscita dal generatore	35 kW a 3500 rpm
Coppia di picco	107 Nm a 2500 rpm
Massima pressione (BMEP)	11.2 bar
Massima velocità del motore	3500 rpm
Combustibile	Etanolo/metanolo/benzina
Massa a secco	56 kg

Tabella 4.1. Dati tecnici del moto-generatore Lotus [12]

Motore rotativo Wankel

Il motore rotativo non è mai riuscito a trovare un'efficace applicazione nel settore automotive e Mazda, la casa costruttrice che più ha puntato su questa tecnologia, si trova in difficoltà anche a causa delle restrizioni in termini di emissioni di CO₂. Considerando un suo eventuale utilizzo come range extender per l'auto ibrida il discorso potrebbe cambiare.

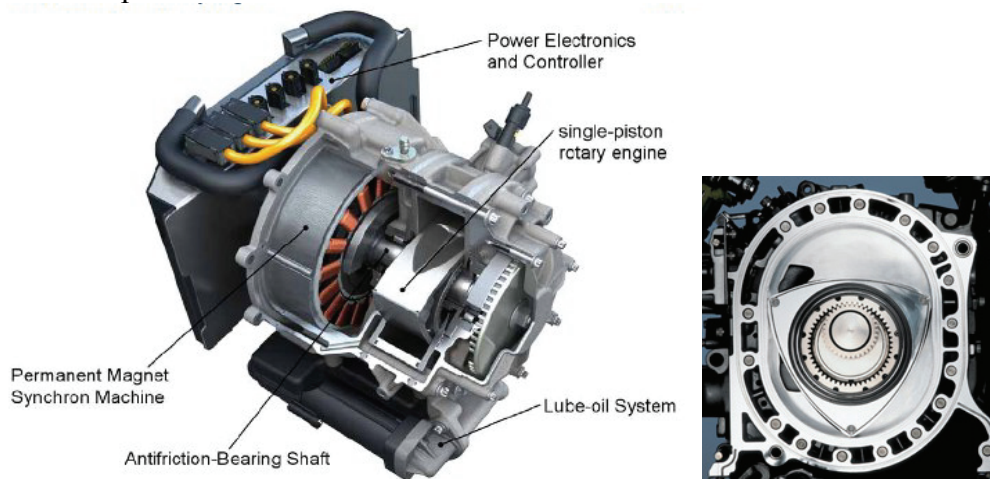


Figura 4.9 Range-extender, motore rotativo wankel della AVL

Mentre il motore termico a pistoni garantisce buone prestazioni a diverse velocità di funzionamento, quello rotativo offre buone prestazioni solo in uno stretto range di velocità specifiche, ma è anche molto compatto e genera poche vibrazioni. Inoltre è leggero e può essere installato più basso in auto, per abbassare il centro di gravità. Queste qualità sono molto significative su una vettura ibrida che ha già pesanti batterie e mettono in evidenza la possibilità di utilizzare un motore Wankel.

Queste peculiarità non stanno sfuggendo alle aziende tedesche del settore automotive tanto che Audi si prepara a lanciare la sua *A1 e-tron* (terza versione del 2010), il concept elettrico basato sulla nuova Audi A1.

La casa di Ingolstadt dichiara un'autonomia con il motore elettrico di 50 km ed è possibile aumentare tale autonomia grazie ad un piccolo motore Wankel di 254 cm³, che eroga 20 CV a 5.000 giri/min fissi. La potenza del motore elettrico, sincro a magneti permanenti, è invece di 61 CV con coppia di 150 Nm. In alcuni istanti può anche arrivare a 102 CV e 240 Nm di coppia. Il motore Wankel è stato posizionato sotto il piano di carico, al posteriore, e serve solo a dare energia all'elettrico.

Le batterie sono agli ioni di litio, e possono essere ricaricate anche dalla normale presa di corrente: la ricarica avviene in 3 ore, addirittura in solo un'ora se si utilizza una tensione di 380 V.

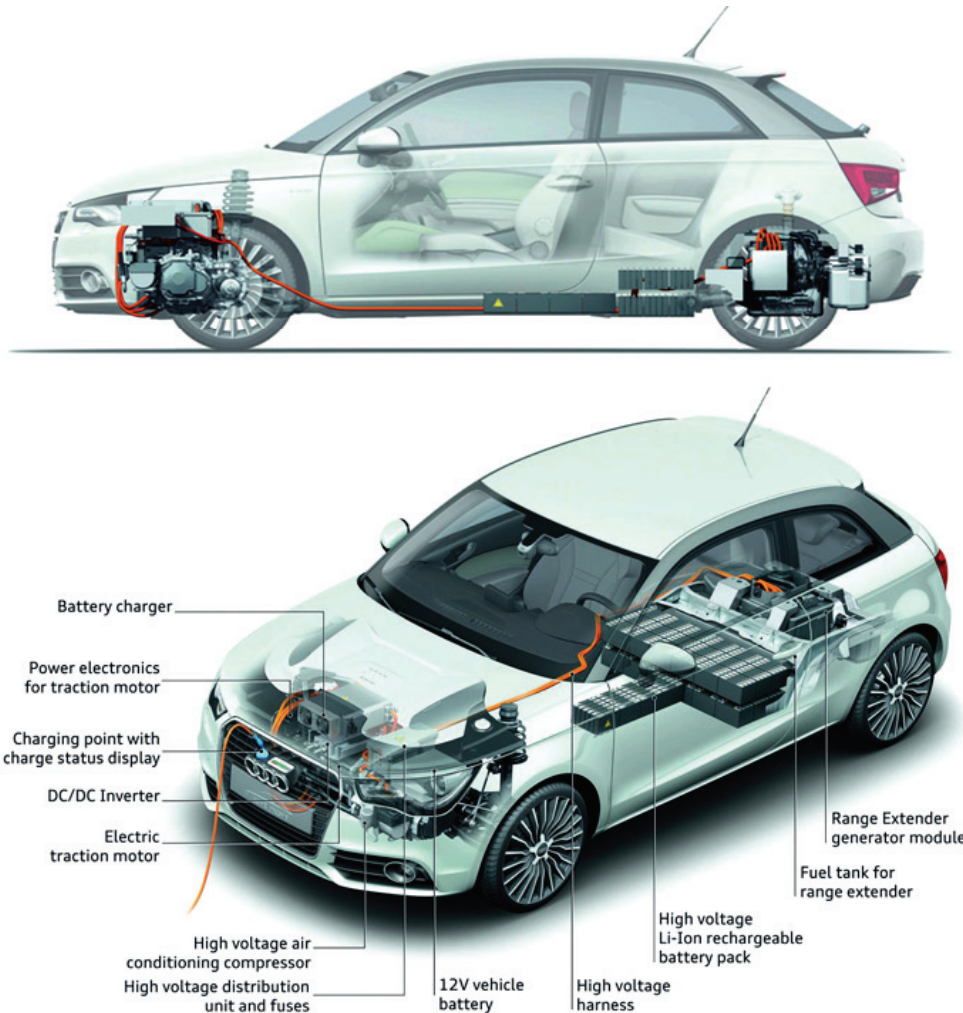


Figura 4.10 Audi A1 e-tron

L'immagine sopra mostra i componenti della propulsione elettrica.

Nella parte frontale della vettura si trova il motore elettrico che fornisce potenza alle ruote anteriori, all'elettronica all'unità di caricamento e anche ai componenti ausiliari dell'auto (condizionatore, pompe dei freni, etc..).

Le batterie sono sotto ai sedili posteriori e nella parte posteriore della vettura c'è il piccolo motore rotativo a combustione interna.

Dall'immagine riportata in alto è inoltre possibile notare come questo particolare powertrain permetta un'ottima distribuzione dei pesi.

Audi ha optato per una trasmissione con una sola marcia, con quattro posizioni diverse: D, R ed N, più “Range“, per usare il motore elettrico alimentato da quello termico.

Secondo quanto calcolato da Audi, i consumi dell’auto sarebbero di 1,9 litri ogni 100 km, con emissioni di 45 g/km di CO₂. La velocità massima è di 130 km/h, per passare da 0 a 100 km/h ci vogliono 10,2 secondi. Il serbatoio ha capienza di 12 litri.

FEV Motorentechnik GmbH ha presentato la *Liion*, un prototipo derivato dalla *Fiat 500* con motore elettrico e sistema EREV, che sfrutta un propulsore rotativo Wankel come Range Extender FEV (per questa particolare tecnologia è stato depositato un brevetto). Lo schema, simile a quello presentato per la Audi *A1 E-tron*, è stato presentato



dalla tedesca FEV all’ International Vienna Motor Symposium su una *Fiat 500* modificata e prevede un motore elettrico da 82 Cv con batterie al litio da 12 kWh, che garantiscono una autonomia di 80 km.

Il propulsore wankel, da 295 centimetri cubi, eroga invece 27 Cv e consente di portare l’autonomia totale a 300 km, con emissioni pari a 50 g/km di CO₂. Fornito dalla tedesca Aixro, è stato posizionato sotto ai sedili posteriori e modificato per funzionare come Range Extender per la ricarica dell’energia con nuovi iniettori, catalizzatori e nuova gestione elettronica, inoltre è stato incapsulato per ridurre la rumorosità. Il suo serbatoio ha una capacità di 21 litri di benzina. La *Liion Drive* raggiunge i 120 km/h e tocca i 60 km/h da fermo in meno di 6 secondi.

Turbina a gas

Un consorzio di tre imprese, fra cui Jaguar e Land Rover, ha vinto un premio dal governo inglese per lo sviluppo di una turbina a gas da adottare come range-extender delle future auto ibride. Nel consorzio figurano anche il costruttore britannico di motori Bladon Jets che ha inventato il primo motore a flusso assiale a microgetto (una tecnologia che consentirebbe di realizzare piccole ma efficienti turbine a gas) e la società SR Drives di proprietà della Emerson Electric, il più grande produttore al mondo di motori elettrici.

Queste aziende prevedono di investire la somma del premio ricevuto per sviluppare quello che chiamano “Ultra Lightweight Range Extender”, un compatto ed ecologico generatore a turbina a gas per veicoli ibridi. La collaborazione con Jaguar e Land Rover potrebbe così consentire di affinare il progetto in modo che il sistema possa essere messo immediatamente su vetture di produzione in serie. Si amplia quindi il concetto di EREV, con nuove ed interessanti prospettive e tecnologie. [13]

La turbina a gas, accoppiata con un generatore ad alta velocità, non richiede un sistema di raffreddamento a liquido e presenta una riduzione in peso del 15% rispetto ad un motore a pistoni con conseguente riduzione nel consumo di carburante.

Altri vantaggi per l’ambiente derivano dal suo rapido riscaldamento (occorrono pochi secondi) e dalle ridotti emissioni inquinanti dovute ad una combustione “pulita”. [14]



Non è un campo completamente nuovo per il comparto automobilistico inglese; infatti, ben prima dell’arrivo degli indiani di Tata, la Rover dai primi anni ‘40 fino agli anni ‘60 ha lavorato per sviluppare un motore a turbina alimentata a gas. Parallelismi fra questo progetto e l’attuale sono molto pochi, considerato che le turbine moderne differiscono molto rispetto a quelle di qualche decennio fa.

Il prototipo di auto elettrica sportiva Jaguar C-X75, presentato al Paris Motor Show del 2010, utilizza come range-extender una microturbina prodotta dalla Bladon Jets.



Per questa vettura, equipaggiata con 4 motori elettrici (uno per ogni ruota) da 778 CV totali, viene dichiarata una velocità di 330 km/h e un’accelerazione da 0 a 100 km/h in 3.4 secondi.

La microturbina può essere alimentata con diversi combustibili (diesel, biocarburanti, metano, gpl) e permette di generare abbastanza elettricità da estendere l’autonomia dai 110 km con le sole batterie a 900 km [15].

Motore Stirling free-piston

Il motore a ciclo Stirling è adatto per applicazioni stazionarie e non si presta per il settore dell'autotrazione anche a causa della sua scarsa propensione a fornire valori di potenza significativamente variabili nel tempo.

Tuttavia la possibilità di essere alimentato da diversi combustibili e una buona efficienza a velocità costante possono essere interessanti per una sua applicazione come range-extender nei veicoli ibridi.

L'origine dei motori a ciclo Stirling free-piston (free piston Stirling engine) risale ad una brillante idea di W. Beale che nel 1964 intravide la possibilità di far funzionare una macchina di Stirling senza manovellismo affidando alle variazioni di pressione il compito di muovere il pistone ed il displacer.

I principali vantaggi di un motore Stirling free-piston sono l'elevata efficienza, la relativa semplicità costruttiva e di funzionamento, la presenza di poche parti mobili, l'assenza di manovellismi, la possibilità di essere alimentato, come per le altre tipologie di macchine di Stirling, da diversi combustibili ed eventualmente ad energia solare, la possibilità di produrre potenza in un intervallo ampio di temperature delle sorgenti termiche, l'elevata affidabilità, l'assenza di perdite del gas di lavoro, la possibilità di realizzazioni in intervalli di potenza da qualche W alle decine di kW.

La minore usura dei componenti rispetto ad un analogo motore con manovellismo è dovuta all'assenza di forze laterali agenti sul pistone e displacer ad eccezione eventualmente del peso proprio dei componenti nel caso in cui l'asse non sia verticale.

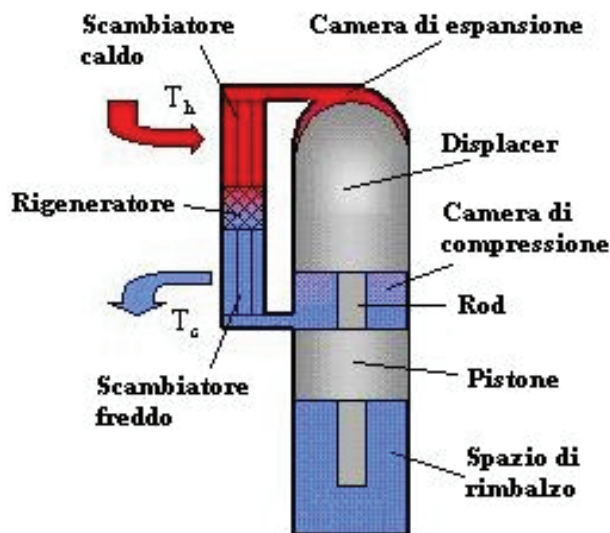
A questi indubbi vantaggi si contrappone la difficoltà progettuale di un motore in cui il moto dei vari componenti non è stabilito a priori da un manovellismo che ne imponga la legge di variazione reciproca e per cui successivamente si possa disegnare la macchina ottimizzandone le prestazioni, come per le configurazioni classiche di macchine di Stirling. Nel caso del free-piston la dinamica delle parti mobili e la termodinamica della macchina sono fortemente correlate e si influenzano a vicenda: l'ottimizzazione delle prestazioni dovrà quindi essere ottenuta combinando questi due effetti.

Pertanto oltre alle difficoltà realizzative e progettuali proprie delle macchine di Stirling, nel caso di macchine free-piston, si aggiunge la difficoltà dovuta all'assenza di un manovellismo che imponga una legge di variazione dei volumi fissa anche in funzione delle variazioni del carico.

Questo fa sì che a seguito di variazioni di carico o di caratteristiche termodinamiche di funzionamento della macchina cambi non solo la frequenza di oscillazione dei pistoni, ma anche le loro corse, il loro sfasamento e la loro distanza reciproca. Spetta ad una corretta ed attenta progettazione far sì che queste variazioni non comportino penalizzazioni delle prestazioni della macchina.

Cenni sul funzionamento di un motore Stirling free piston

Si prenda in considerazione una macchina di Stirling free piston come quella della figura successiva.



Si trascuri per semplicità, e perché comunque poco significativa rispetto alle altre forze in gioco, la forza di gravità agente sul displacer e sul pistone.

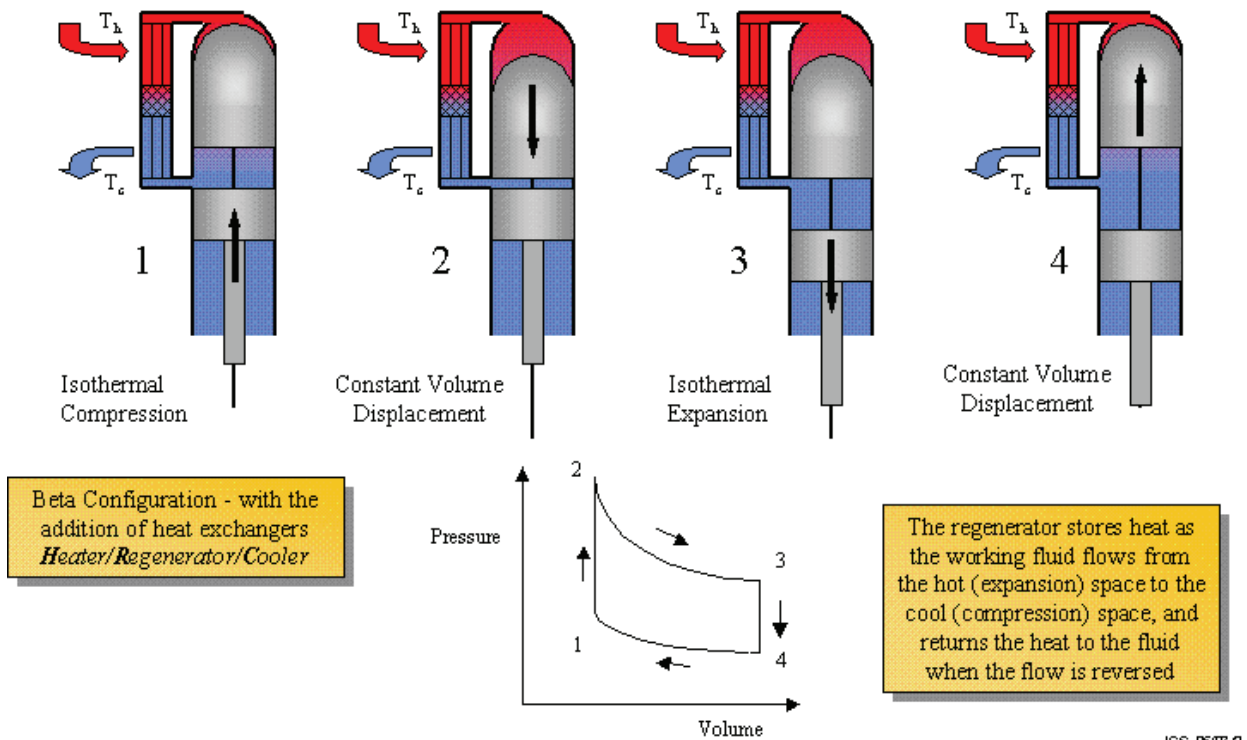
Trascuriamo inoltre per semplicità espositiva la presenza del carico, degli attriti tra le parti in moto ed altre effetti dissipativi. Fornendo calore tramite lo scambiatore caldo al fluido presente in esso e nella zona di espansione la pressione del fluido tende ad aumentare nella camera di espansione e di compressione fino a sorpassare il valore della pressione vigente nella zona di rimbalzo.

Per effetto delle forze di pressione agenti sulle superfici del pistone e del displacer questi tenderanno a scendere. Essendo però il displacer notevolmente più leggero del pistone ed essendo l'area della sezione del cilindro maggiore rispetto a quella del rod l'accelerazione del displacer risulterà superiore rispetto a quella del pistone.

Il fluido quindi passerà attraverso gli scambiatori esterni dalla camera di compressione alla camera di espansione dove si scalderà ulteriormente aumentando ancora la differenza di pressione e quindi le forze agenti sul pistone e sul displacer. Di conseguenza il pistone continuerà il suo moto ed il fluido subirà una espansione. La pressione nello spazio di rimbalzo aumenterà a causa del moto del pistone e del displacer fino a raggiungere e sorpassare la pressione nello spazio di lavoro; le due masse invertiranno allora il loro moto ma anche in questo caso il displacer avrà un'accelerazione maggiore. Il moto combinato del pistone e del displacer causerà il passaggio del fluido dalla camera di espansione alla camera di compressione attraverso gli scambiatori ed il rigeneratore.

Il fluido quindi subirà una diminuzione di temperatura a seguito dell'effetto rigenerativo e del calore ceduto nello scambiatore freddo; come conseguenza la pressione vigente nello spazio di lavoro diminuirà ulteriormente. Quando il displacer avrà raggiunto il suo punto morto superiore la quasi totalità del fluido sarà nella camera di compressione e verrà compresso a seguito del moto del pistone. La pressione nello spazio di lavoro aumenterà mentre diminuirà quella

vigente nello spazio di rimbalzo; ancora una volta le forze agenti sulle masse invertiranno le loro direzioni causando il moto del pistone e del displacer verso il basso ed il ciclo si ripeterà.



Il lavoro netto è raccolto dal pistone tramite ad esempio un generatore elettrico lineare ma non sono rari i casi di applicazione di questo tipo di macchina per azionare una pompa lineare.

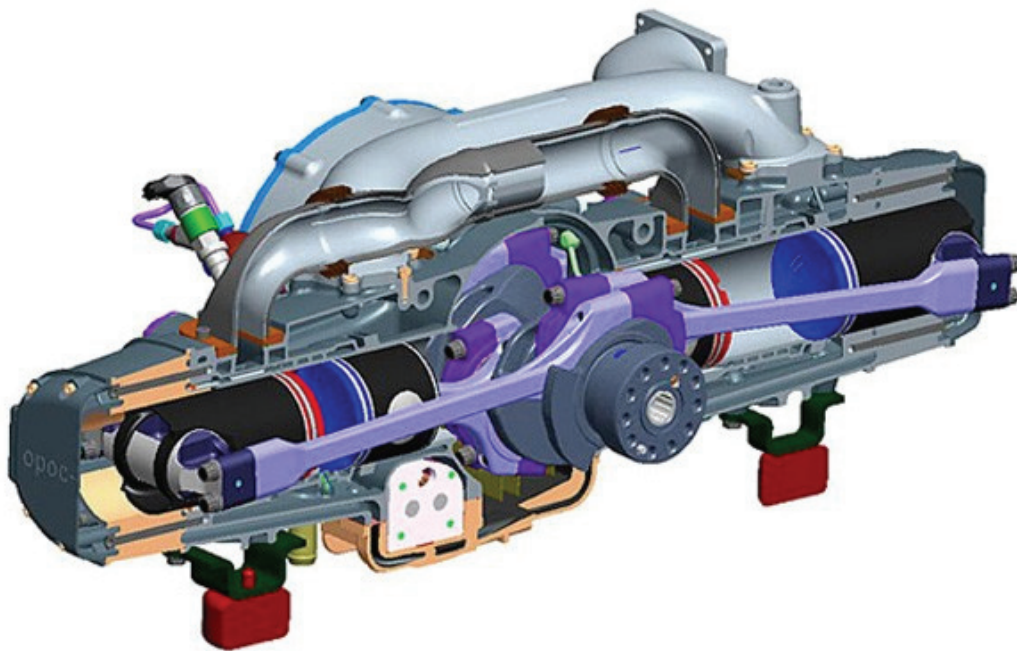
La possibilità di estrarre lavoro dalla macchina è garantita dalla combinazione opportuna delle fluttuazioni di pressione e del movimento del pistone e del displacer.

Il moto del solo displacer permette il passaggio del fluido dalla parte calda a quella fredda e viceversa determinando le variazioni di pressione del fluido; il pistone effettua la compressione e l'espansione del fluido ed in definitiva l'estrazione di lavoro utile [28].

Motore OPOC

La EcoMotors International, azienda nata nel 2007 con lo scopo di migliorare i motori a combustione interna, sta sviluppando un innovativo propulsore denominato O.P.O.C. (opposti pistoni opposti cilindri).

I vantaggi di questo propulsore sono principalmente l'elevata densità di potenza e il risparmio di combustibile.



Si tratta di un motore a combustione interna a 2 tempi ad iniezione diretta sovralimentato composto da due cilindri orizzontali ciascuno dei quali contiene due pistoni opposti collegati ad un unico albero a gomiti.

All'interno di ogni cilindro si trova un'unica camera di combustione situata tra i due pistoni [29].

Rispetto ai motori tradizionali, questa tipologia costruttiva permette al pistone di percorrere metà della corsa a parità di rapporto di compressione potendo ottenere una velocità di rotazione del motore doppia.

E' previsto che il propulsore possa funzionare con diverse tipologie di combustibili tra cui i biocarburanti.

Si ritiene che una piccola vettura equipaggiata con un motore OPOC possa arrivare a percorrere 160 chilometri con meno di 4 litri di carburante (circa 40 km/litro). Nel 2010 Bill Gates e il miliardario Vinod Khosla hanno investito 23 milioni di dollari nella EcoMotors e nel corso del 2011 la compagnia ha firmato importanti contratti con la Navistar, una società cinese costruttrice di auto e

camion. Presto verrà allestita una berlina con motore OPOC da 1.200cc. e 160 cavalli. L'ing. Hofbauer conta di mettere sul mercato la vettura entro 5 anni, prima che lo standard dei motori presenti sul mercato arrivi a 20 km/litro.

4.5 Plug-in Hybrid

Le auto ibride plug-in (*PHEV plug-in hybrid electric vehicle*) sono auto con motore a combustione interna e con motore elettrico che possono essere ricaricate collegandole alla rete elettrica domestica o presso apposite colonnine di ricarica, eventualmente lungo il tragitto da percorrere.

Infatti, i tragitti percorribili dalle auto full-hybrid con la trazione elettrica sono soltanto di pochi chilometri, a causa

della limitata ricarica della batteria fornita dall'effetto frenante, cioè dall'energia che viene recuperata.

Le auto ibride plug-in, che sono spesso dotate di batterie al litio - assai più potenti rispetto a quelle usate sulle auto full-hybrid normali - consentono un risparmio potenzialmente assai elevato, che non si misura in termini di carburante ma direttamente in termini economici, e derivante soprattutto dal fatto che l'energia elettrica ad uso veicolare non è tassata, a differenza dei carburanti. Le auto plug-in rappresentano l'ultima importante novità nel campo delle auto ibride-elettriche.

Le tecnologie range-extender e plug-in possono coesistere sullo stesso veicolo come mostrato in seguito nel caso della Chevrolet Volt/Opel Ampera.

I PHEV avvicinano il concetto di veicolo ibrido e quello di veicolo puramente elettrico (EV) potendo in effetti funzionare quasi esclusivamente in modalità elettrica qualora le percorrenze stradali e le possibilità di ricarica lo permettano.

Rispetto ai veicoli elettrici presentano il grosso vantaggio di non essere limitati dalla necessità di un'eventuale ricarica delle batterie perché a questa esigenza può far fronte il motore a combustione interna se non si volesse (o potesse) ricorrere alla rete elettrica.

Con i veicoli elettrici condividono però il rischio di non contribuire in maniera efficace all'effettiva riduzione delle emissioni di CO₂ globali e all'indipendenza dalle fonti fossili.



In sostanza se l'energia elettrica necessaria per caricare le batterie e per far circolare le auto viene prodotta da combustibili fossili, il problema dell'inquinamento e dell'emissione di gas climalteranti non viene certo risolto, ma semplicemente traslato in altre aree geografiche.

Perciò per far sì che il sistema funzioni nel suo complesso e sia veramente efficace nella riduzione delle emissioni è necessario aumentare il ricorso a fonti di energia rinnovabili nel mix energetico.

Questo concetto, sostenuto anche da associazioni ambientaliste quali Greenpeace e Transport & Environment è stato ribadito in un recente studio condotto dall'istituto tedesco Oeko-Institut e commissionato dal Ministero dell'Ambiente.

L'indagine analizza il mercato delle auto elettriche tedesche ma fornisce indicazioni importanti per tutti. Entro il 2030 ci potrebbero essere oltre 6 milioni di veicoli elettrici circolanti in Germania (circa il 14% del mercato dell'auto), mentre si potrebbe superare il milione già entro il 2022.

In concreto secondo lo studio, con le condizioni attuali del mix energetico sbilanciato sulle fonti fossili, un aumento delle auto elettriche potrebbe portare con sé un aumento più che proporzionale delle emissioni di CO₂ legate ai trasporti.

Anzi, l'ingresso sul mercato di un milione di vetture nel 2022 porterebbe ad un taglio di emissioni di anidride carbonica solo del 6%, mentre se con la diffusione di motori termici più efficienti la riduzione sarebbe pari al 25%. Ciò significa che le auto elettriche sono già un fallimento ancor prima di sbocciare?

Non proprio, la soluzione al problema dell'inquinamento da emissioni non va cercata solo nelle auto elettriche ma nell'intero ciclo di approvvigionamento di energia elettrica.

Ciò significa diminuire la produzione di energia elettrica da fonti fossili e aumentare lo sviluppo delle fonti rinnovabili, sfruttando magari proprio le batterie delle auto elettriche per stoccare il surplus di energia prodotto da impianti rinnovabili in particolari momenti. Anche se la soluzione migliore prevede l'utilizzo di smart grid che possano assorbire i picchi degli impianti rinnovabili e utilizzare le fonti fossili solo quando necessario.

4.5.1 Chevrolet Volt/Opel Ampera

La Chevrolet *Volt* è il primo veicolo EREV Plug-in di serie ed è considerato tra i veicoli più tecnologicamente innovativi degli ultimi 50 anni [18].

La *Ampera* è sostanzialmente la stessa vettura distribuita col marchio Opel.

Il gruppo General Motors (proprietario di Chevrolet e Opel) ha cominciato il suo percorso nell'elettrificazione delle automobili nel 1996 presentando il modello EV1, il primo moderno veicolo elettrico a batterie prodotto.

La seconda generazione dell'EV1 era equipaggiata con batterie Ni-MH la cui densità energetica limitava l'autonomia di esercizio a 100 km nell'uso cittadino.

Questo generava nel guidatore la paura di esaurire la carica durante l'utilizzo del veicolo che rappresenta il principale limite alla diffusione dei veicoli elettrici.

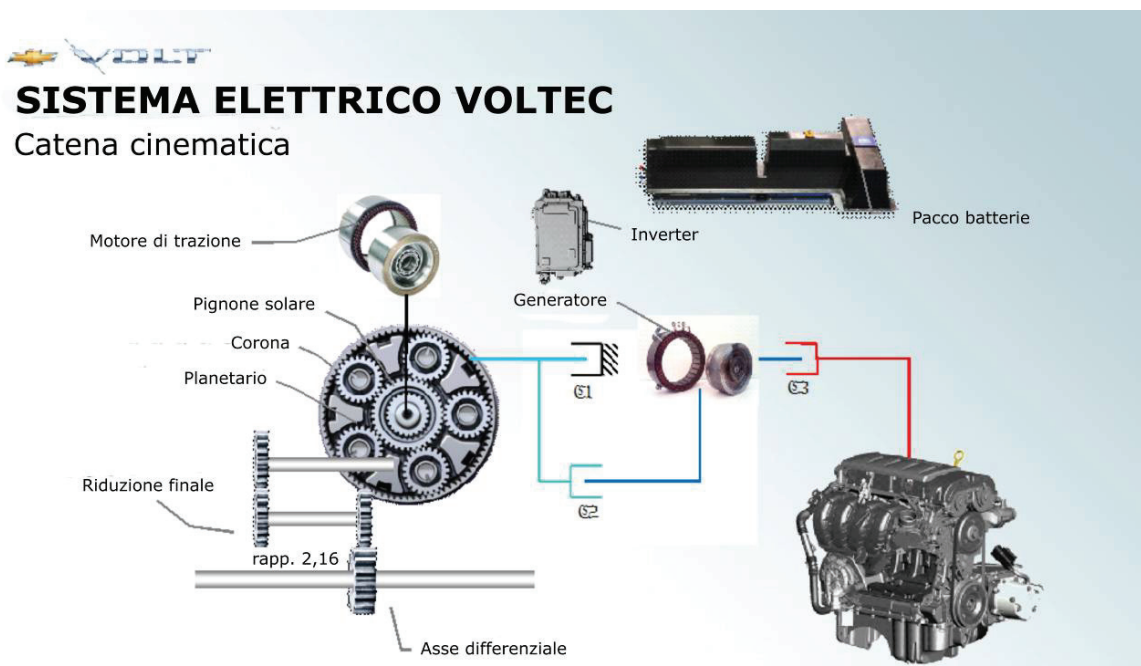
La tecnologia range-extender nasce dal bisogno di eliminare questa "ansia da autonomia" e può essere la chiave del successo della mobilità elettrica.

Il sistema propulsivo della Volt/Ampera, denominato **Voltec**, permette fino a 64 km di autonomia con il solo motore elettrico grazie all'adozione di un pacco batterie agli ioni di litio da 16 kWh.

Quando la carica della batteria scende al di sotto al 30-35%, il generatore elettrico, mosso da un motore a benzina da 1400 cm³ permette di aumentare l'autonomia fino ad un valore di 500 km.

Il ruolo del motore a combustione interna e del generatore è quello di mantenere un valore minimo di carica alle batterie che dovrebbero essere poi caricate in maniera completa attraverso la presa di corrente da 110/120 V o 220/240 V, fonte energetica più economica.

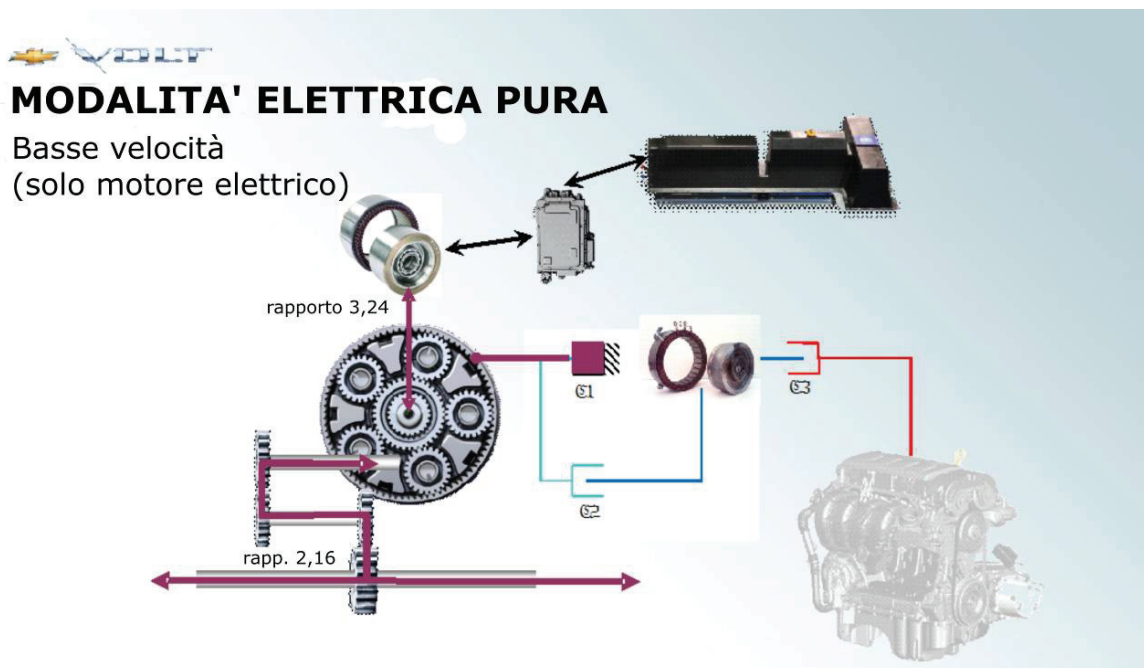
Un modesto apporto energetico è fornito alle batterie dal sistema di frenata rigenerativo.



Diversamente dalla maggior parte dei veicoli elettrici, che utilizzano un motore singolo con una riduzione finale fissa che lega rigidamente la rotazione del motore a quella delle ruote, Chevrolet Volt adotta un esclusivo sistema elettrico per massimizzare l'efficienza. Il rendimento di qualsiasi motore elettrico cala nettamente man mano che si avvicina alla massima velocità di rotazione. Il sistema di Volt, composto da due unità elettriche, tre frizioni e un sistema di ingranaggi epicicloidali (a planetario) è studiato per aumentare l'efficienza complessiva riducendo la velocità di rotazione combinata delle stesse unità elettriche. Questa configurazione riduce l'assorbimento di energia dalla batteria alle velocità più elevate, elevando di oltre 3 km l'autonomia in modalità elettrica pura.

Le unità elettriche di Volt e il sistema di ingranaggi sono montate in linea con il primo motore a combustione interna mai prodotto per estendere l'autonomia di un veicolo di serie. Due delle frizioni sono utilizzate o per bloccare la corona del sistema planetario o per connetterlo al generatore, a seconda della modalità di funzionamento. La terza frizione collega il motore a combustione interna al generatore per assicurare l'estensione dell'autonomia.

Questo sistema di propulsione innovativo ha quattro distinte modalità operative:



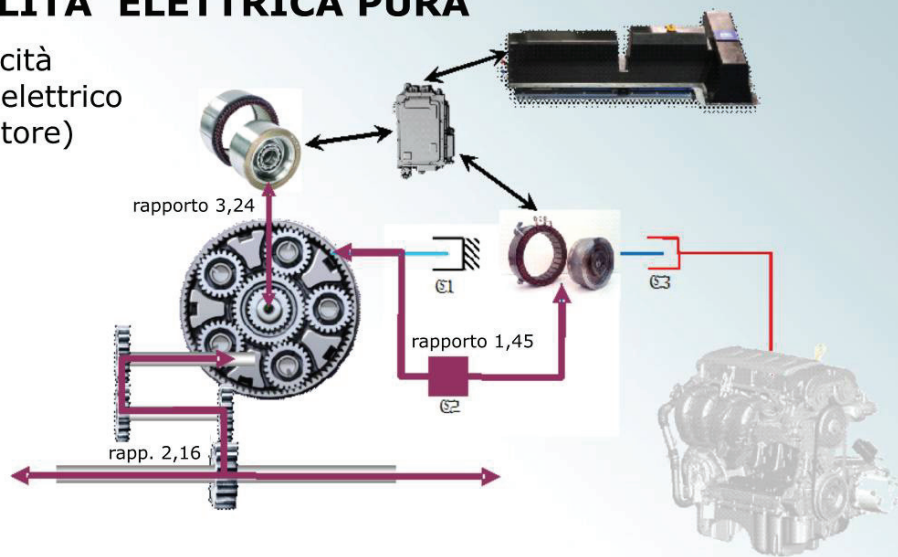
In questa modalità, il motore di trazione primario elettrico assicura la totalità della propulsione alle velocità inferiori e nelle forti accelerazioni, attingendo tutta l'energia necessaria dalla batteria. La corona è bloccata e il generatore è scollegato sia dal motore termico sia dal sistema planetario. Il motore di trazione a magneti

permanenti può erogare fino a 111kW e 368 Nm di coppia, erogata con progressività, per offrire uno spunto da fermo molto brillante.



MODALITA' ELETTRICA PURA

Alte velocità
(motore elettrico
e generatore)

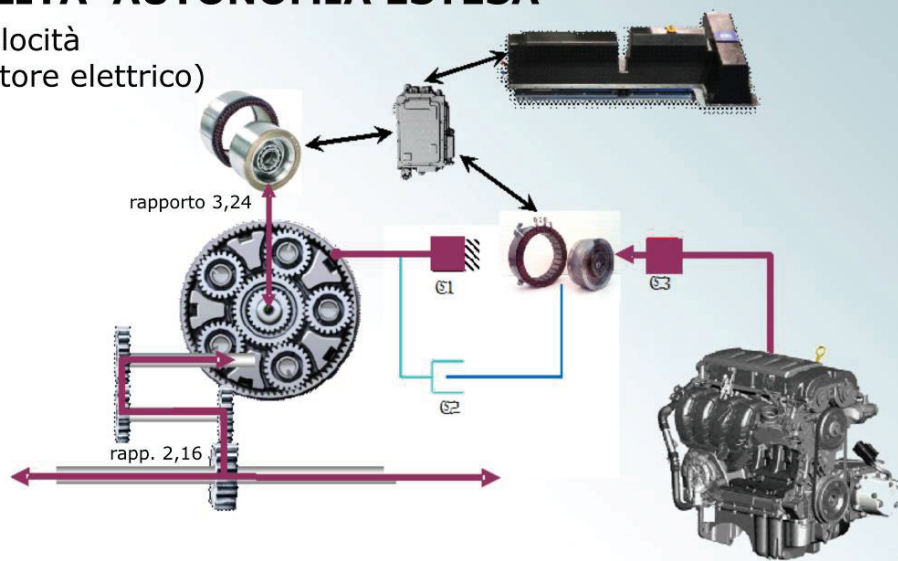


All'aumentare della velocità del veicolo, la corona viene sbloccata e collegata al generatore. Questo permette alle due unità elettriche di lavorare in tandem per assicurare un'erogazione combinata con maggior rendimento elettrico. La potenza combinata delle due unità elettriche che ruotano più lentamente ha permesso al team progettuale di garantire ulteriori 3 km di autonomia in modalità elettrica pura nella marcia extraurbana.



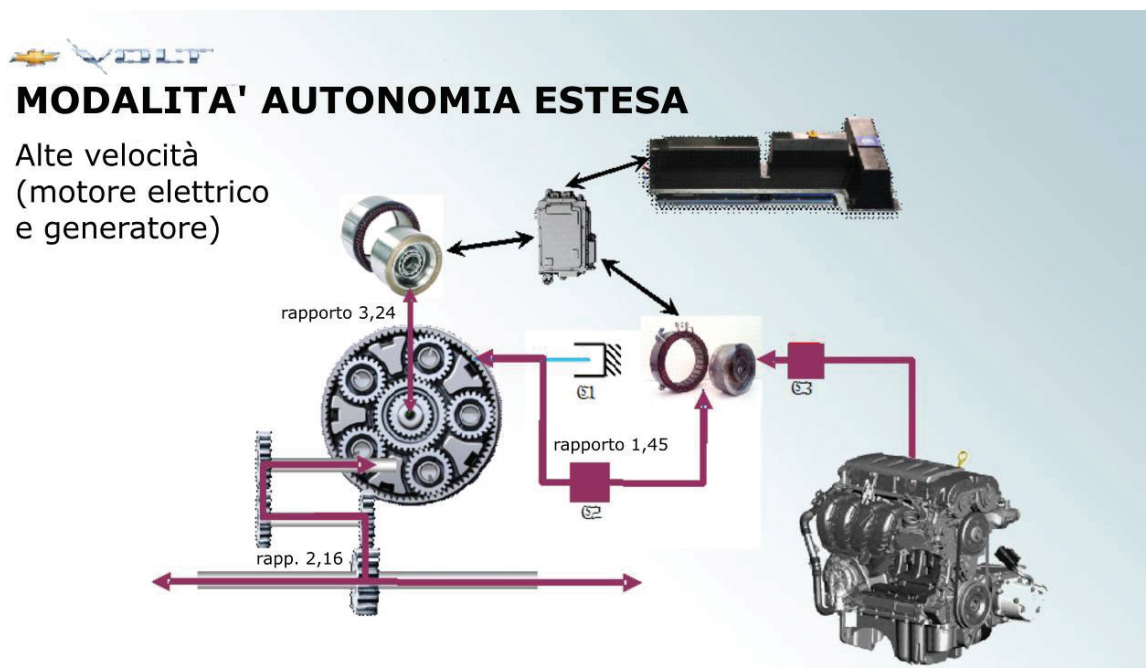
MODALITA' AUTONOMIA ESTESA

Basse velocità
(solo motore elettrico)



Quando la batteria ha raggiunto il suo stato di carica minimo, il motore termico di 1,4 litri viene collegato al generatore (a magneti permanenti da 54 kW) con la terza frizione. Alle velocità inferiori e nelle forti accelerazioni, Volt è spinta dal solo motore elettrico con la corona del sistema planetario bloccata. Il generatore azionato dal motore termico e la batteria forniscono energia al motore elettrico tramite l'inverter. Mediamente, il generatore azionato dal motore termico mantiene la batteria attorno allo stato di carica minimo per la modalità ad autonomia estesa.

Dato che il modo più efficiente di caricare la batteria di Volt è di conmetterla alla rete elettrica, il generatore è utilizzato solo per mantenere la batteria al livello minimo di carica previsto. Se la batteria scende sotto questo livello minimo in fase di accelerazione oppure quando è attivata la modalità „montagna“ e il livello di carica è inferiore al 45%, il generatore carica la batteria fino al livello minimo di carica e lo mantiene successivamente.



La strategia di combinare il motore elettrico e il generatore alle alte velocità nella marcia elettrica pura è stata adattata alla modalità autonomia estesa. Le frizioni che collegano il generatore al motore termico e alla corona del sistema planetario sono innestate, per spingere la Volt utilizzando insieme, grazie agli ingranaggi epicicloidali, il motore termico e le due unità elettriche. L'energia necessaria per la propulsione è raccolta con continuità dal sistema planetario e quindi inviata alla riduzione finale.

Qualunque sia la modalità di funzionamento, Volt è comunque spinta dall'elettricità, tramite il motore di trazione. Il motore termico non può garantire la propulsione senza che sia attivo anche il motore elettrico. Perché gli ingranaggi planetari possano trasmettere coppia motrice, almeno uno dei tre elementi principali – corona, pignone solare o planetario – deve essere bloccato o innestato. Dato che non c'è una frizione per bloccare il pignone solare, il motore elettrico è necessario per assicurare la coppia di reazione necessaria per la propulsione. Questa architettura esclusiva di propulsione permette a Volt di ottenere un rendimento alle alte velocità del 10-15% superiore rispetto a quanto sarebbe stato possibile con l'azione del solo motore elettrico. Allo stesso tempo, Volt garantisce la guida tipica di un veicolo elettrico, anche in modalità ad autonomia estesa, affidandosi alla potente batteria perfino quando si richiede una brusca accelerazione.

Il motore a combustione interna

Il motore termico, in un veicolo EREV, deve garantire il valore medio della potenza necessaria ad alimentare il veicolo quando le batterie hanno raggiunto la soglia minima di carica prevista.

La taglia del motore è determinata dalla velocità massima richiesta al veicolo e dalla pendenza massima superabile.

Durante la fase di progettazione del veicolo sono state prese in considerazione diverse tipologie di propulsore per trovare la soluzione migliore tra le diverse esigenze di leggerezza, volume occupato, efficienza, rumore e vibrazioni.

I motori diesel hanno una buona efficienza ma elevate emissioni di NOx, alti livelli di rumore e vibrazioni e una considerevole massa.

I motori turboalimentati necessitano uno spazio adeguato per l'adozione del sistema di raffreddamento della miscela aria/combustibile (intercooler system).

La scelta è caduta su un motore a benzina aspirato 4 cilindri in linea a iniezione con cilindrata pari a 1400 cm³ della produzione GM di terza generazione.

ENGINE TYPE	In-line four-cylinder gasoline
VALVES / CYLINDER	4
DISPLACEMENT [CM ³]	1398
BORE / STROKE [MM]	73.4 / 82.6
STROKE / BORE RATIO	1.12
BORE DISTANCE [MM]	78
CONNROD LENGTH [MM]	130.3
COMPRESSION RATIO	10.5
POWER [KW @ RPM]	63 / 4800
MAX. TORQUE [NM @ RPM]	130 / 4250
FUEL SYSTEM	MPFI
ENGINE MANAGEMENT SYSTEM	GM

Il limite imposto al numero di giri del motore ha migliorato le caratteristiche di rumorosità e vibrazione ma ha portato ad avere una cilindrata piuttosto elevata.

Viene utilizzato un convertitore catalitico a tre vie e le emissioni a motore freddo sono ottimizzate con l'utilizzo di una procedura di avviamento che minimizza il tempo necessario a rendere operativo il catalizzatore bilanciando emissioni e rendimento del propulsore.

Questo è reso possibile dal fatto che quando il motore termico si attiva, il veicolo sta già procedendo in modalità elettrica.

Sono stati semplificati alcuni componenti accessori. Il motorino di avviamento e l'alternatore sono stati eliminati e la pompa dell'acqua è comandata da una semplice cinghia.

La coppa dell'olio, la sede del filtro e il corpo aspirazione sono stati modificati per rispondere a requisiti di compattezza.

La strategia operativa del motore, mostrata in Fig.4.11, tiene in considerazione l'efficienza dell'unità termica e di quella del generatore elettrico e ha come obiettivo di minimizzare il consumo di combustibile.

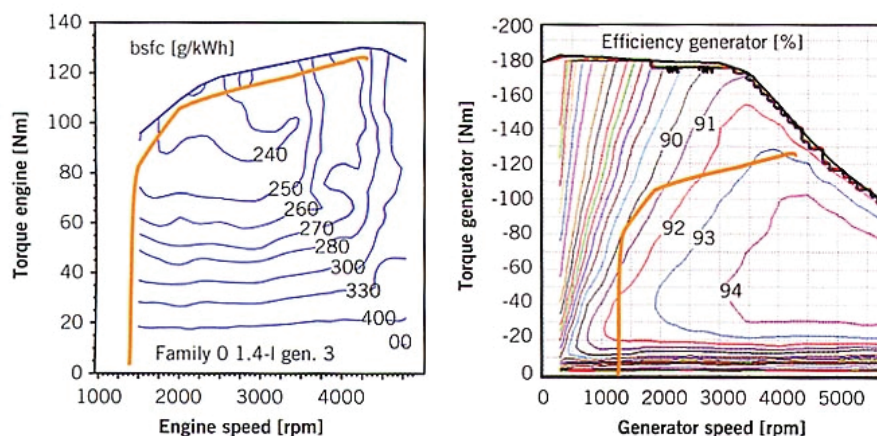


Figura 4.11 Operatività di motore termico e generatore durante il mantenimento della carica

Batterie agli ioni di litio

Le batterie di un veicolo elettrico devono garantire elevata densità di potenza ed energia, sicurezza, prestazioni, durata e regolarità di funzionamento.

L'accumulo energetico nella Chevrolet Volt/Opel Ampera è realizzato con batterie li-ion che contengono 288 celle prodotte dalla LG Chem.

Utilizzano un anodo di grafite e un catodo di manganese divisi da un separatore con rivestimento ceramico rinforzato ai fini della sicurezza.

Le celle sono contenute in un involucro di alluminio rivestito e stoccate verticalmente.

La capacità energetica totale è di 16 kWh, dei quali il 65% è utilizzabile quando la batteria funziona tra il limite inferiore e superiore di carica.

Opera ad una tensione nominale di 360V e utilizza un raffreddamento a liquido per garantire durata e regolarità di funzionamento.

Il liquido di raffreddamento passa attraverso una serie di scambiatori interni al pacco batterie.

Lo stesso circuito provvede al riscaldamento dei componenti qualora fosse questa l'esigenza.

Il pacco completo pesa 180 kg ed ha una forma a "T" per poter essere disposto sotto il tunnel centrale del telaio e i sedili posteriori.

E' lungo 1,7 m ed è utilizzato come elemento semi-strutturale nell'architettura del veicolo incrementando la rigidità della struttura complessiva. [20]

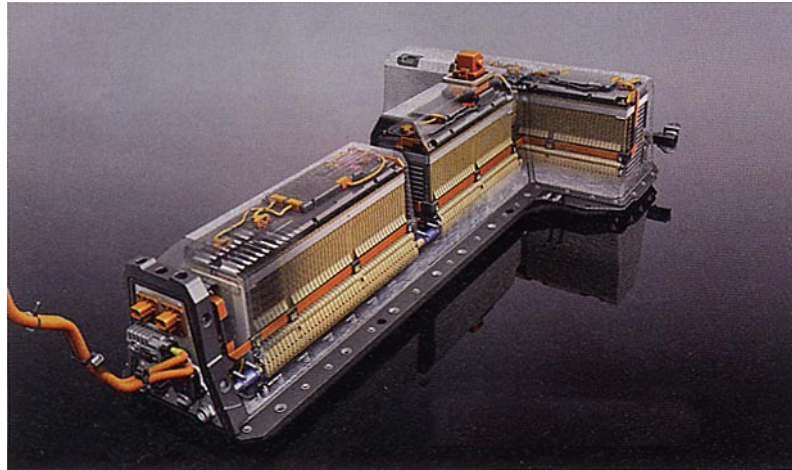
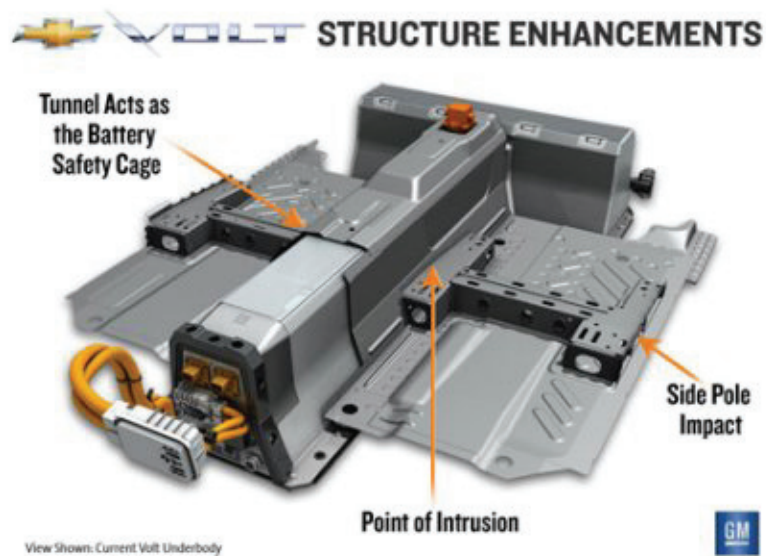
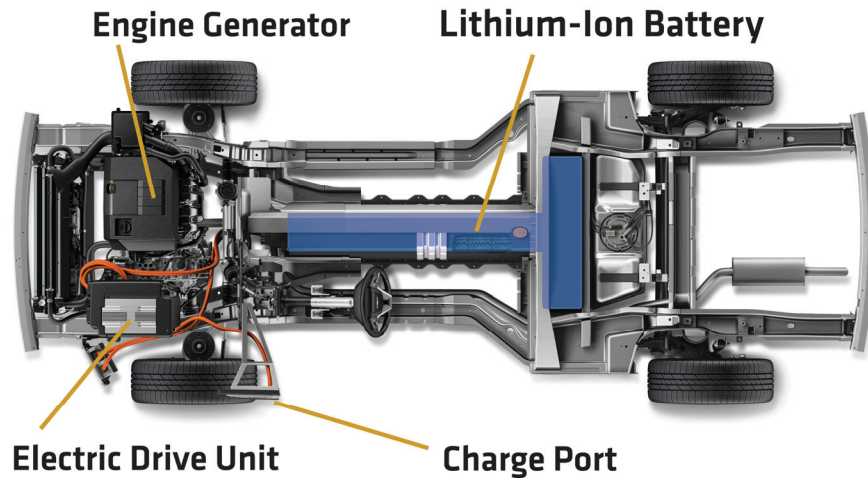


Figura 4.12 Pacco batterie





La seconda generazione dell'Opel Ampera sarà presentata nel corso del 2015 e segnerà un fondamentale passo avanti rispetto all'attuale. In primo luogo il nuovo modello costerà meno dell'attuale. E poi, dal punto di vista della tecnologia adottata, sarà ancora più all'avanguardia.

Ad incidere sul prezzo salato del modello, che in Italia verrà proposto a 42.900 euro, è soprattutto il pacco batterie agli ioni di litio. E proprio da lì, nel giro dei prossimi quattro anni, sarà possibile ottenere i maggiori risparmi: secondo le previsioni, il pacco batterie della futura Ampera costerà circa 4000 euro, contro gli attuali 8000.

Gli altri risparmi saranno frutto delle economie di scala determinate dalla diffusione del modello e dalla delocalizzazione della produzione: la prossima Ampera nascerà in varie fabbriche GM intorno al mondo, tra cui almeno una in Europa. "Dobbiamo aggiornare i dipendenti per farlo, ma ci riusciremo per tempo. Sapremo capitalizzare l'esperienza dell'attuale Ampera per creare un modello meno costoso e caratterizzato da un design più espressivo", ha affermato Nick Reilly, numero uno di Opel.

Secondo gli insider, questo significa che la prossima generazione dell'auto sarà molto diversa dalla gemella americana, la Chevrolet Volt, e più in linea con il design delle altre Opel. Il dirigente ha inoltre rivelato che il powertrain dell'Ampera potrà in futuro equipaggiare altri modelli, lasciando intuire che esiste la possibilità di vedere un'intera famiglia di modelli derivati dalla prima EREV della storia di Opel.

L'Ampera è un modello naturalmente molto particolare: firmata da un marchio tedesco, viene prodotta solo negli Stati Uniti. E soprattutto, non genera profitti. Il suo compito non è quello di garantire margini, secondo Reilly, quanto piuttosto quello di porre le basi per la futura supremazia di Opel nel campo delle EREV.

Intanto le vendite del modello procedono bene: Opel ha raccolto 7000 ordini, a fronte di una produzione prevista per il 2012 di 10.000 esemplari. Il 75% di questi è arrivato dalle flotte. Le consegne delle vetture cominceranno a fine anno. “L’Ampera si sta dimostrando molto popolare presso aziende, enti pubblici e società di noleggio, che apprezzano particolarmente la sua autonomia. La domanda ha già coperto quasi tutta la nostra produzione prevista per l’anno prossimo: per questo proveremo ad aumentare i volumi”, ha concluso Reilly. [21]

Capitolo 5

Biocarburanti

Così come lo sviluppo dei veicoli ibridi, anche i temi della produzione e dell'impiego dei biocarburanti rivestono un ruolo importante nella definizione della nuova politica energetica ed ambientale mondiale.

L'importanza del settore è stata riconosciuta con l'emanazione della Direttiva n° 2003/30/CE dell'8 maggio 2003, che prevede il raggiungimento per ogni Stato membro di obiettivi indicativi di sostituzione dei carburanti derivanti dal petrolio con biocarburanti e/o altri carburanti da fonti rinnovabili per una quota pari al 2% (sulla base del contenuto energetico) nel 2005 fino al 5,75% nel 2010. L'Italia ha recepito questa Direttiva con il decreto legislativo n° 128 del 30 maggio 2005 stabilendo, in un primo momento, obiettivi indicativi nazionali più bassi (pari rispettivamente all'1% entro il 31 dicembre 2005 e al 2,5% entro la fine del 2010) che sono stati successivamente riportati a valori sostanzialmente uguali a quelli della Direttiva Europea con la legge 11 marzo 2006, n. 81 che obbliga i distributori di carburante a immettere sul mercato benzina e gasolio contenenti percentuali crescenti di biocarburanti (fino al 5% nel 2010) a partire dal 1 luglio 2006.

I biocombustibili derivano da sostanze naturali di origine vegetale o da grassi animali, le due tipologie più diffuse sono il bioetanolo e il biodiesel.

Si tratta di combustibili derivanti da materiale biologico di origine recente, in contrapposizione ai combustibili derivanti da materiale biologico di epoche geologiche remote (combustibili fossili). Rappresentano una forma di energia rinnovabile, in quanto sono il risultato di una conversione di energia solare in energia chimica tramite cicli di fotosintesi.

Possono inoltre consentire di ottenere una riduzione delle emissioni di gas serra rispetto ai combustibili tradizionali, grazie all'assorbimento di CO₂ durante il ciclo di fotosintesi.

Tuttavia non possono essere trascurati gli apporti energetici e la produzione di CO₂ associata alla coltivazione, trasporto, trasformazione delle materie prime in etanolo. Particolarmente importante nel bilancio risulta poi anche la possibilità di riutilizzare scarti di lavorazione come mangimi, combustibile etc.

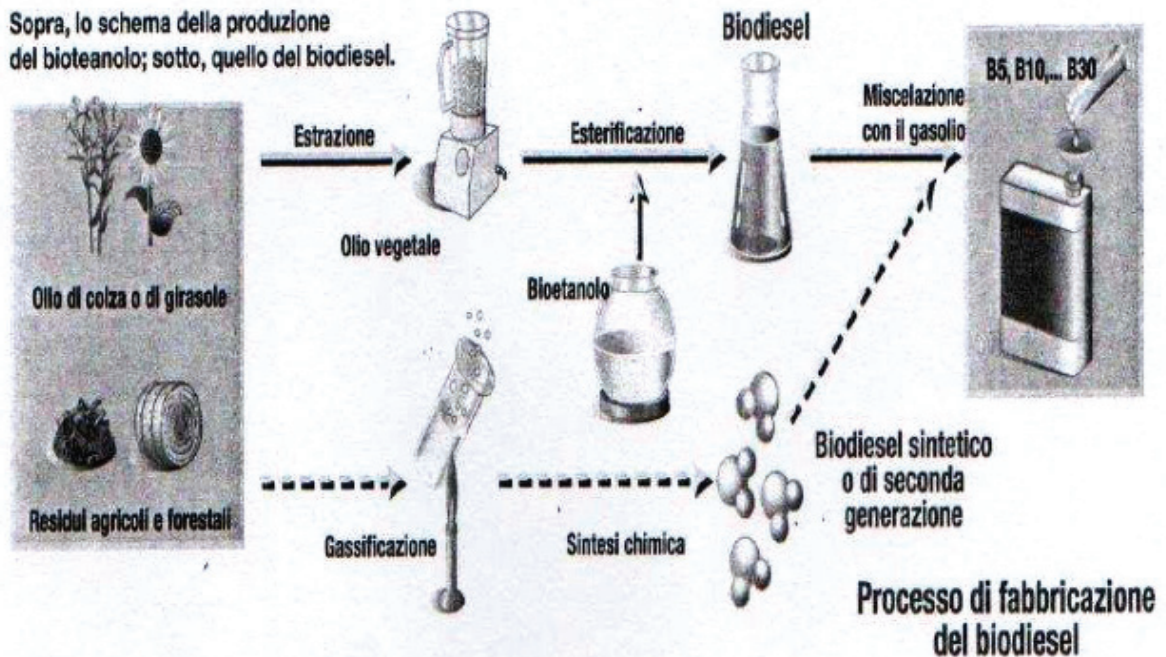
Un'analisi più dettagliata deve valutare la quota parte di energia derivante da fonti non rinnovabili necessaria per la produzione dei biocombustibili, e confrontarla con quella dei combustibili fossili tradizionali (benzina, gasolio).

Nel caso in cui poi l'impiego finale del combustibile sia la trazione, è possibile effettuare una valutazione sia dell'efficienza energetica complessiva (Well To

Wheel, in MJ/km percorso dal veicolo) sia delle fasi intermedie del processo (rispettivamente dette Well To Tank e Tank To Wheel). In modo analogo si può valutare l' impatto in termini di emissioni di gas serra (Green House Gases, GHG). In questo caso per tener conto del diverso potenziale nocivo delle differenti specie gassose si può ricorrere ad un indice relativo al potenziale della CO₂, assunto come riferimento (GWP, Global Warming Potential).



Sopra, lo schema della produzione del biotetanolo; sotto, quello del biodiesel.



5.1 Il bioetanolo come combustibile per l'autotrazione

L'etanolo è un alcol (C_2H_5OH) che può essere utilizzato come carburante.

Nelle auto in circolazione può essere miscelato alla benzina fino ad almeno il 10% negli Stati Uniti i distributori di E10, miscela 10% etanolo e 90% benzina, sono largamente diffusi), in molti sostengono fino al 20%, mentre per poter utilizzare concentrazioni più alte, fino ad arrivare al 100% di alcol, occorre avere motori leggermente modificati, disponibili sul mercato, con una minima differenza di prezzo.

Le auto in commercio che possono essere alimentate sia a benzina che con una miscela contenente fino all'85% di bioetanolo (E85) sono comunemente chiamate flexi-fuel.

Gli autobus a bioetanolo attualmente sul mercato possono essere invece alimentati solo con E95, costituito da 95% etanolo più additivi.

L'etanolo può essere ottenuto attraverso un processo di fermentazione degli zuccheri ricavati da qualunque materia prima vegetale che contenga o possa essere trasformata in zuccheri, come l'amido o la cellulosa. La produzione di etanolo da cellulosa è ancora in fase sperimentale, per gli alti costi e per la necessità di ottimizzare il processo, anche se costituisce un traguardo da raggiungere per le potenzialità in gioco. La Svezia, all'avanguardia in Europa per quanto riguarda l'utilizzo di etanolo come carburante, ha studiato il processo di produzione di etanolo da cellulosa in un impianto pilota ed è pronta a costruire nel 2007 un primo impianto dimostrativo.

Attualmente l'etanolo viene prodotto principalmente a partire da colture zuccherine, quali canna da zucchero, barbabietola da zucchero e sorgo zuccherino, o da cereali, come mais, orzo e grano.

L'etanolo così prodotto viene definito bioetanolo, per sottolineare la sua origine da materie prime agricole.

I vantaggi principali legati all'utilizzo di bioetanolo come carburante sono:

- Il bioetanolo è una fonte di energia rinnovabile, in quanto prodotto da materie prime rinnovabili;
- L'utilizzo di bioetanolo può contribuire significativamente alla riduzione delle emissioni di CO_2 nel settore trasporti e conseguentemente dell'effetto serra. Tale riduzione è stimata del 70% rispetto alla benzina;
- Utilizzando bioetanolo le emissioni di SO_x sono ridotte del 70% e quelle di idrocarburi aromatici complessi, come il benzene, del 50% rispetto alla benzina e anche le emissioni di particolato e NO_x risultano inferiori;
- Il bioetanolo è biodegradabile, meno esplosivo e più facile da estinguere se incendiato rispetto a benzina e gasolio;
- Il bioetanolo può essere prodotto localmente, riducendo la dipendenza energetica dai paesi in cui sono concentrate le riserve di combustibili

fossili, e a partire da diverse materie prime, aumentando la sicurezza dell'approvvigionamento energetico e favorendo l'occupazione agricola.

Il maggiore vantaggio ambientale derivante dall'utilizzo di bioetanolo come carburante è la drastica riduzione delle emissioni di CO₂. Infatti la CO₂ rilasciata durante la combustione è quella sottratta all'atmosfera durante la crescita della materia prima vegetale. In realtà il ciclo non è completamente chiuso perché viene consumata energia, e quindi emessa CO₂, nel processo di trasformazione e nelle fasi di trasporto, ma il bilancio ambientale risulta nettamente positivo.

Il Protocollo di Kyoto, che impone una riduzione dei gas serra, la Direttiva Europea 2003/30/CE, che promuove i biocarburanti fissando degli obiettivi minimi, richiedono un drastico cambiamento nel settore dei trasporti, che rappresenta una delle voci più significative delle emissioni di gas nocivi e gas serra in atmosfera ed è il settore con i tassi di crescita tra i più rapidi a causa delle crescenti esigenze di mobilità di merci e persone.

In questo contesto il bioetanolo risulta essere il carburante con le potenzialità maggiori per almeno i prossimi 15 anni (dato International Energy Agency).

L'utilizzo dell'etanolo come combustibile per motori a combustione interna non è certo un concetto nuovo, se consideriamo che i primi motori termici erano adattati per essere alimentati con alcool puro (metanolo o etanolo).

Il recente interesse per questo combustibile rientra, come già visto, nelle strategie da mettere in atto in modo immediato per ridurre l'impatto dei trasporti sull'emissione dei gas serra nell'atmosfera, oltre che per ridurre la dipendenza dalle fonti energetiche fossili.

Il bioetanolo può essere utilizzato nei motori a combustione interna in differenti modi:

- anidro per essere miscelato con la benzina dal 5% all'85% in volume. Miscele con concentrazione di etanolo fino al 5% in volume possono essere utilizzate senza apportare modifiche al motore (completa intercambiabilità), mentre percentuali maggiori possono richiederne specifici adattamenti
- idrato (95% in volume), utilizzato come sostituto integrale della benzina in autoveicoli con motore opportunamente adattato
- sotto forma di etere (ETBE) da miscelare nella benzina
- in emulsione o in soluzione stabile con gasolio a concentrazioni intorno al 15% in volume.

L'etanolo è un composto organico le cui principali proprietà sono riportate nella tabella 5.1 a confronto con quelle della benzina .

Caratteristica	u.m.	ETANOLO	BENZINA
Formula molecolare		C_2H_6O	-
Massa molecolare	g/mol	46,07	102,5
Densità	kg/m ³	794	735-760
Temperatura di ebollizione / intervallo di distillazione	°C	78,4	30-190
Calore latente di vaporizzazione	kJ/kg	854	289
PCI in massa	kJ/kg	26800	42690
PCI volumetrico	kJ/l	21285	32020
Rapporto stechiometrico	-	8,95	14,7
Numero di ottano Research		120	95
Numero di ottano Motor		99	85

Tabella 5.1 Confronto tra la proprietà del bioetanolo e della benzina

Sebbene l'alcool idrato sia relativamente diffuso in Brasile, risulta poco interessante in Europa per alimentare la flotta di autoveicoli in circolazione sul suo territorio, per la quale si presta meglio, in termini di intercambiabilità con i combustibili convenzionali e di compatibilità, l'alcool anidro in miscela con la benzina o in emulsione col gasolio.

L'etanolo possiede proprietà interessanti per essere usato per alimentare i motori ad accensione comandata come, per esempio, l'elevato potere indetonante, ma anche caratteristiche poco accettabili, come l'elevato calore latente di vaporizzazione.

La concentrazione massima di etanolo consentita attualmente dalla norma EN 228 nella benzina distribuita sul mercato europeo è pari a 5% in volume (E5). A questo livello di concentrazione la miscela è ritenuta intercambiabile integralmente col combustibile convenzionale. A differenza di alcuni paesi europei (Svezia, Germania e Francia), attualmente in Italia non sono ancora prodotte e poste in commercio benzine contenenti etanolo.

La nuova direttiva "Combustibili" 2009/30/CE, recentemente emanata, prevede invece un limite massimo del 10% in volume di etanolo. Per questo motivo la norma di qualità della benzina è attualmente in corso di revisione, anche per tenere conto dell'impatto sulla volatilità della miscela e degli eventuali problemi di compatibilità con i materiali dei motori. La direttiva prescrive inoltre che, almeno fino al 2013, venga commercializzata in Europa anche una benzina con contenuto massimo di etanolo del 5% in volume, per assicurare la protezione degli autoveicoli in circolazione non compatibili.

Diversamente, negli USA viene distribuita già da tempo una miscela E10 (10% in volume etanolo, 90% benzina), mentre in Svezia viene distribuita una miscela costituita da 85% in volume di etanolo in benzina (E85) impiegabile in autoveicoli “autoadattanti” di modello recente (Flexible Fuel Vehicles = FFV), già prodotti da alcuni Costruttori.

Gli effetti determinati dalla miscelazione della benzina col bioetanolo sono stati evidenziati in numerosi lavori sperimentali su motori e autoveicoli di modello recente, convenzionali o adattati per tenere conto delle diverse proprietà del combustibile. Essi sono sintetizzati nella tabella 5.2 [26].

PROPRIETA'	EFFETTI OSSERVATI
Volatilità	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento della volatilità della miscela specialmente se la concentrazione è relativamente bassa (1 - 10 % in volume) • Incremento delle emissioni evaporative
Proprietà indetonanti	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento del numero di ottano (N.O.) sensibile con la concentrazione
Caratteristiche energetiche	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento del consumo di combustibile • L'elevato calore latente di evaporazione dell'etanolo consente un miglioramento dell'efficienza del propulsore per un maggiore riempimento dei cilindri del motore
Caratteristiche igroscopiche	<ul style="list-style-type: none"> • Possibile separazione di fase durante lo stoccaggio e il trasporto della miscela bioetanolo/benzina • Potenziali effetti di corrosione delle parti metalliche a contatto col combustibile
Compatibilità con i materiali	<ul style="list-style-type: none"> • Potenziale deterioramento di elementi del motore costruiti con materiali polimerici per azione solvente e/o ossidante • Problemi di corrosione di elementi metallici a contatto con la miscela

Tabella 5.2 Effetti determinati dall'aggiunta di etanolo nella benzina sulle proprietà della miscela risultante

Le miscele etanolo/benzina a elevata concentrazione di alcool non si prestano per essere impiegate nei modelli anche recenti di autoveicoli con motore convenzionale.

Viceversa gli autoveicoli FFV possono essere alimentati indifferentemente con solo benzina e con qualsiasi miscela di etanolo/benzina fino all'85% in volume senza la perdita di prestazioni del propulsore e senza la manifestazione degli inconvenienti citati. Essi hanno bisogno, quindi, di un unico serbatoio per il combustibile.

Le principali differenze con gli autoveicoli convenzionali consistono nell'uso di materiali metallici e polimerici chimicamente resistenti per costruire le parti meccaniche a contatto col combustibile, quali acciaio inossidabile, bronzo, neoprene, polipropilene, teflon, gomma nitrile e fluoroelastomeri, e nella flessibilità della centralina elettronica di controllo della combustione. Questa è in grado di controllare la dosatura e la fasatura dell'iniezione di combustibile nel motore in funzione della composizione di quello utilizzato al momento, attraverso un altro sensore, quello di "composizione", che ne rileva la sua conducibilità elettrica. Il valore di questo parametro, infatti, è proporzionale alla concentrazione di alcool nella miscela etanolo/benzina. Anche gli iniettori sono speciali, perché in grado di erogare quantità molto variabili di combustibile in funzione non solo dalle prestazioni richieste, ma anche del tipo di combustibile iniettato.

L'aumento del consumo di carburante degli autoveicoli FFV alimentati con E85, valutato mediamente pari a circa il 30% in più rispetto alla benzina, è dovuto al minore contenuto energetico dell'etanolo rispetto al combustibile convenzionale. In compenso l'autoveicolo FFV è caratterizzato da una potenza erogata alle ruote maggiore rispetto all'alimentazione con benzina (circa il 7% in più) e da una maggiore efficienza di combustione. Questi effetti derivano dalle maggiori dimensioni dell'apparato di alimentazione (pompa di iniezione, iniettori) dell'autoveicolo FFV rispetto a quello di un autoveicolo convenzionale.

In Svezia circolano attualmente più di 100.000 autoveicoli FFV. Una lista completa dei modelli FFV disponibili sul mercato si può trovare al seguente indirizzo web: <http://www.e85fuel.com/flexible-fuel-vehicles/>. [26]

5.2 Emissioni

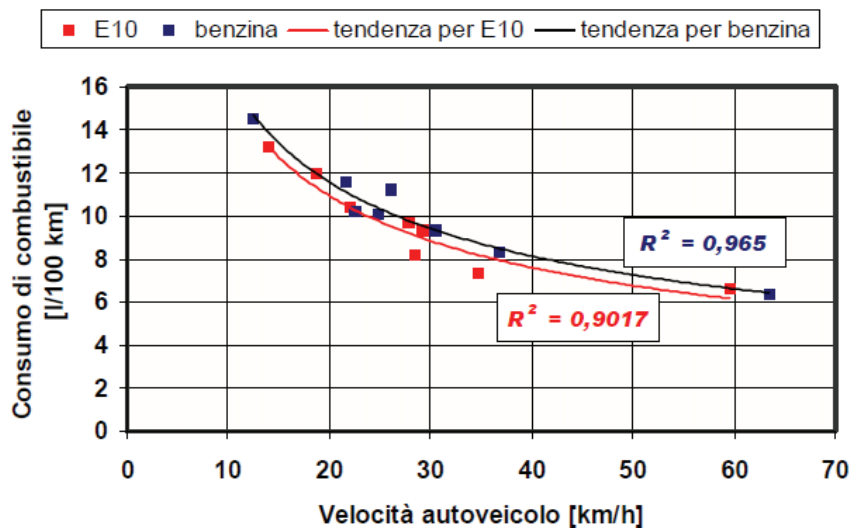
Un'analisi comparata dei risultati delle sperimentazioni svolte in tempi più recenti mostra come, con l'uso di miscele benzina/etanolo in sostituzione della benzina, non esiste una posizione univoca riguardo agli effetti determinati sulle emissioni inquinanti regolamentate (NOx, CO e HC): talvolta i risultati sono positivi talvolta negativi o nulli. In generale, con le miscele a bassa concentrazione di etanolo è stata evidenziata una tendenza verso la diminuzione dell'emissione di ossido di

carbonio, poiché l'etanolo agisce da composto ossigenato, e una tendenza verso l'incremento dell'emissione degli ossidi di azoto.

Per l'emissione degli idrocarburi incombusti i risultati sono contrastanti tra una sperimentazione e l'altra. C'è da osservare però, che le misure possano essere affette da una variabilità elevata, non riportata nelle pubblicazioni, dato il bassissimo livello di emissione delle autovetture provate a confronto con i corrispondenti valori limite di riferimento (classe di omologazione). D'altra parte un esame globale dei dati mette in evidenza che l'emissione di questi due inquinanti sembra più influenzata dal modello di autoveicolo provato, piuttosto che per la presenza di etanolo nella benzina, qualunque sia la concentrazione.

In quasi tutte le sperimentazioni è stato rilevato un incremento più o meno elevato dell'emissione di ossidi di azoto. Soltanto nelle prove svolte con la miscela E85 si è manifestata una diminuzione di questa specie rispetto all'alimentazione con la benzina di riferimento (che peraltro conteneva il 5% di etanolo).

Il consumo di combustibile si è mantenuto mediamente più basso (circa il 3%) a tutte le velocità.



Le prove di laboratorio, eseguite su ciclo di guida NEDC col motore a regime termico hanno in parte confermato i risultati ottenuti nelle prove stradali: riduzione sensibile dell'emissione dell'ossido di carbonio e degli ossidi di azoto.

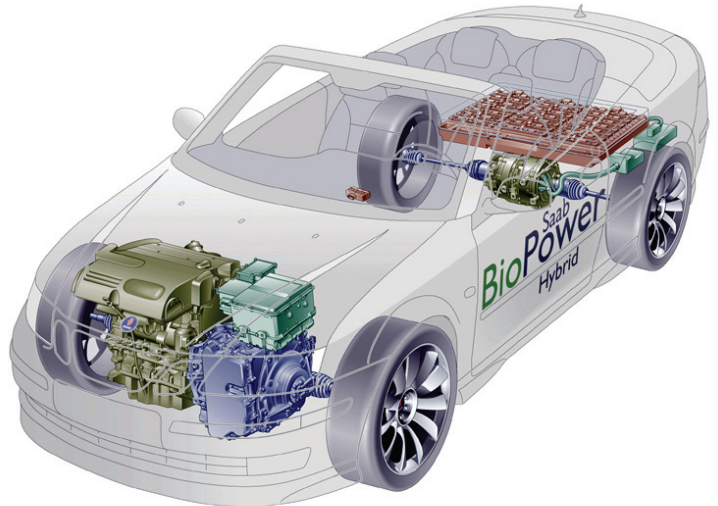
I pochi dati sperimentali disponibili nella letteratura tecnica sono in buon accordo nell'indicare un incremento dell'emissione delle aldeidi con la concentrazione di etanolo nella benzina e, parallelamente, una riduzione dell'emissione di benzene, toluene e 1,3-butadiene [26].

5.3 SAAB Bio-Power Hybrid Concept

Saab BioPower Hybrid Concept, un originale prototipo proposto sotto le vesti di una Saab 9-3 Cabriolet, unisce la capacità di funzionare con un carburante di origine non-fossile come il bioetanolo (E100) alla propulsione elettrica, sfruttando l'avanzato sistema ibrido bimodale che il gruppo General Motors sta sviluppando in collaborazione con DaimlerChrysler e BMW Group. Saab BioPower Hybrid Concept non emette CO₂ di origine fossile, garantendo al tempo stesso alte prestazioni e minor consumi.

Il motore 2.000 turbo BioPower da 260 CV (191 kW) e i tre motori elettrici da 165 kW assicurano a Saab BioPower Hybrid Concept una coppia motrice molto superiore a quella di un equivalente propulsore a benzina.

Pur potendo funzionare a bioetanolo puro (E100), il motore 2.000 BioPower in alluminio resta un propulsore assolutamente "flex-fuel" che può cioè essere alimentato a benzina ed a bioetanolo in qualsiasi combinazione. Il motore BioPower funziona insieme ad un sofisticato sistema di propulsione elettrica incluso nella trasmissione ibrida bimodale, ad un gruppo motrice posteriore, ad una batteria da 300 Volt ed un sofisticato sistema di gestione elettronica. Questo complessivo fornisce, all'occorrenza, la spinta motrice dei motori elettrici, fa risparmiare carburante spegnendo/riaccendendo il motore in modo opportuno, recupera l'energia frenante, cambia marcia senza soluzione di continuità e mette a disposizione anche una modalità di funzionamento elettrico "Zero Mode" per i trasferimenti urbani. Si stima che Saab BioPower Hybrid Concept possa raggiungere i 100 km/h con partenza da fermo in appena 6.8 secondi, cosa che rappresenta un evidente vantaggio rispetto ai 9.5 secondi di un corrispondente motore a benzina da 210 CV e con trasmissione automatica di tipo convenzionale.



«Questo prototipo ci permette di studiare e di valutare il potenziale della tecnologia ibrida abbinata a quella BioPower» ha detto Jan Åke Jonsson, amministratore delegato di Saab Automobile. «In questo contesto, stiamo oggi sviluppando ulteriormente le nostre conoscenze utilizzando la tecnologia ibrida bimodale. BioPower Hybrid Concept mostra come possiamo continuare ad

esprimere quel comportamento sportivo che è solitamente associato al marchio Saab utilizzando fonti energetiche rinnovabili e risparmiando energia».

Tecnologia ibrida bimodale

Saab BioPower Hybrid Concept si caratterizza per la presenza dell'avanzata trasmissione ibrida bimodale. Questa sofisticata tecnologia costituisce un'importante pietra miliare per l'industria automobilistica, in quanto ha portato ad un'integrazione senza precedenti tra due motori elettrici e quattro ingranaggi fissi all'interno di un'unica scatola di trasmissione.

Solitamente descritta come ibrida bimodale, per via delle modalità di trasmissione elettrica a variazione continua a bassa ed alta velocità, questa tecnologia, che permette di ridurre i consumi di carburante, comprende anche quattro rapporti fissi per un totale di sei funzioni operative. Il risultato è una tecnologia ibrida d'avanguardia che assicura minori consumi, migliori prestazioni e maggiori potenzialità di utilizzo. I motori elettrici dell'ibrido bimodale possono essere utilizzati per muovere il veicolo con la sola energia elettrica, per migliorare le prestazioni del motore a combustione interna e per recuperare l'energia prodotta quando si frena. Per ridurre ulteriormente i consumi, il funzionamento di alcuni accessori del motore (come la pompa dell'acqua, il compressore del climatizzatore ed il servosterzo) non è più affidato alla cinghia della distribuzione, ma ai motori elettrici del sistema ibrido. La trasmissione ibrida bimodale ha dimensioni analoghe a quelle di un normale cambio automatico ed è studiata in modo da adattarsi alle esigenze di dimensioni, peso e prestazioni di motori e veicoli differenti.

Motore BioPower

Saab 9-5 2.0t BioPower, una vettura che funziona con carburante E85 (85% bioetanolo/ 15% benzina), sta riscuotendo grande successo in Svezia dove in questo momento è il veicolo "flex-fuel" più venduto.

Il prototipo Saab BioPower Hybrid Concept rappresenta un ulteriore passo avanti della tecnologia Saab nel campo dei carburanti alternativi in quanto funziona con carburante E100. Il suo motore è un'evoluzione BioPower del 2.000 turbo a 16 valvole costruito interamente in alluminio ed attualmente impiegato sulla gamma Saab 9-3. Sfruttando il maggiore numero di ottano del carburante E100, sviluppa 260 CV (191 kW) e ha una coppia massima di 38,2 kgm (375 Nm), valori che sono superiori del 24% e del 25% a quelli del corrispondente motore a benzina.

L'accensione diretta SIDI (Spark Ignited Direct Injection) assicura una combustione ottimale con il carburante E100, garantendo lo stesso comportamento di un motore a benzina negli avviamenti a freddo. La fasatura variabile dell'aspirazione e dello scarico assicurano una fluidodinamica ottimale, mentre valvole e relative sedi sono realizzate in materiali più resistenti.

Struttura ibrida

E' stato adottato un sistema operativo ibrido parallelo la cui modalità di controllo si basa su un'efficiente "gestione dell'energia" che sarebbe invece perduta in un veicolo azionato solo da un motore a combustione interna. Oltre ai trasformatori di corrente AC/DC ed alle interfacce a 12 e 300 Volt, il sistema comprende tre componenti principali: le due trasmissioni ibride bimodali con i due motori elettrici (descritti in precedenza) ed un gruppo motrice posteriore con un terzo motore elettrico ed una batteria da 300 Volt.

Il gruppo motrice posteriore dispone di un motore da 38 kW che muove un differenziale ed i semiassi. In fase di accelerazione a bassa velocità, questo gruppo è in grado di generare per un breve periodo una coppia motrice aggiuntiva di 950 Nm. Il motore è anche configurato per recuperare l'energia che si genera nelle frenate e dalla rotazione dei semiassi in fase di decelerazione

L'elettricità così prodotta è immagazzinata in una batteria in litio-ioni da 300 Volt dotata di una ventola di raffreddamento. Questa batteria è alloggiata sotto al pavimento in modo da non limitare la capacità del bagagliaio. Il funzionamento della batteria è tenuto sotto controllo e regolato con precisione da una centralina elettronica specifica.

Vantaggi nella guida

La sofisticata gestione elettronica del sistema ibrido è legata ai parametri operativi del motore BioPower per assicurare l'assistenza necessaria per la migliore erogazione della potenza, la riduzione dei consumi ed una confortevole gestione dei cambi marcia. In determinate situazioni di guida, possono essere attivati per brevi periodi di tempo tutti e tre i motori elettrici in modo da aumentare la potenza del motore, l'accelerazione nello spunto da fermo e la possibilità di effettuare un sorpasso in modo sicuro senza cambiare marcia e senza incidere sui consumi. Il guidatore avrà anche modo di apprezzare immediatamente la fluidità di funzionamento della trasmissione ibrida bimodale.

In fase di partenza, fino a circa 1.500 giri/minuto, Saab BioPower Hybrid Concept sfrutta l'immediata disponibilità di coppia motrice e la forte progressione tipiche dei motori elettrici; quando la vettura si ferma, il motore a scoppio si spegne immediatamente per risparmiare carburante. Al momento di ripartire, è riavviato silenziosamente da un motore della trasmissione ibrida bimodale.

Quando ci si muove nel traffico più congestionato, la funzione "Zero Mode", che riduce a zero il consumo di carburante e di conseguenza anche le emissioni allo scarico, contribuisce ad un ulteriore risparmio. Il guidatore può attivarla premendo un pulsante sulla console centrale. Quando la velocità della vettura scende al di sotto dei 50 km/h, "Zero Mode" spegne il motore alternativo ed inserisce la propulsione elettrica. In questa modalità d'uso le batterie assicurano un'autonomia di 10-20 chilometri. Il motore principale si riattiva dolcemente ogniqualvolta la

carica delle batterie scende troppo oppure la pressione sul pedale dell'acceleratore fa "capire" al sistema che il guidatore vuole superare i 50 km/h.

A motore spento, le funzioni ausiliarie, quali ad esempio, il servosterzo, l'aria condizionata e le luci continuano a funzionare in quanto alimentate da una batteria. Il fatto stesso che anche in condizioni normali non sottraggano energia al motore permette ulteriori risparmi e maggiore autonomia. Infine, in condizioni di scarsa aderenza, è possibile ottimizzare la trazione inserendo la motricità delle ruote posteriori, cosa che migliora il comportamento su strada e la sicurezza. Quando, ad esempio, entra in funzione il controllo elettronico della trazione (TCS) sulle ruote anteriori, la vettura può essere bilanciata inserendo la trazione posteriore.

La strumentazione di Saab BioPower Hybrid Concept ha un aspetto discreto quanto la presenza della tecnica ibrida. Le spie luminose sul quadro principale indicano quando la vettura utilizza il motore alternativo e/o quello elettrico. Uno strumento aggiuntivo indica invece lo stato di carica delle batterie. La pressione del turbocompressore è evidenziata da tre simboli, un modo gradevole per ricordare che la vettura utilizza una fonte energetica rinnovabile. Saab BioPower Hybrid Concept è studiata per offrire alte prestazioni ed un apprezzabile risparmio energetico. Questo prototipo può accrescere il piacere di guida, puntando al tempo stesso all'obiettivo di una mobilità sostenibile.

Saab BioPower Hybrid Concept: Caratteristiche tecniche

- **Tipo di veicolo:** Prototipo di autovettura realizzato sulla base di Saab 9-3 Cabriolet
- **Configurazione:** Motore trasversale, trazione anteriore, propulsione elettrica posteriore
- **Trasmissione ibrida bimodale:** Trasmissione elettrica a variazione continua, lock-up meccanico. Due motori integrati, 55 kW/55 kW
- **Motore 2.0 BioPower turbo:** Potenza (con alimentazione E100) 260 CV (191 kW), coppia massima 38,2 kgm (375 Nm). Alimentazione flex-fuel.
- **Gruppo motrice posteriore (RDU):** Motore da 38 kW con differenziale sulle ruote posteriori
- **Batteria:** 300 Volt, litio-ioni, ventola di raffreddamento
- **Prestazioni:** Da 0 a 100 km/h: 6.8 secondi (simulata)

5.4 SCANIA: Autobus ibrido alimentato a bioetanolo



Il nuovo sistema di trazione ibrida di Scania è il risultato di un progetto di ricerca di cinque anni condotto allo Scania Technical Centre di Södertälje, in Svezia. Lo sviluppo della nuova tecnologia di trazione si è basata su una valutazione generale del sistema di trasporti pubblici, ed anche sulla necessità di attrarre un numero sempre maggiore di passeggeri. La nuova trazione ibrida in serie offre numerose opportunità per migliorare

l'attrattiva degli autobus urbani del futuro.

Ibrido in serie

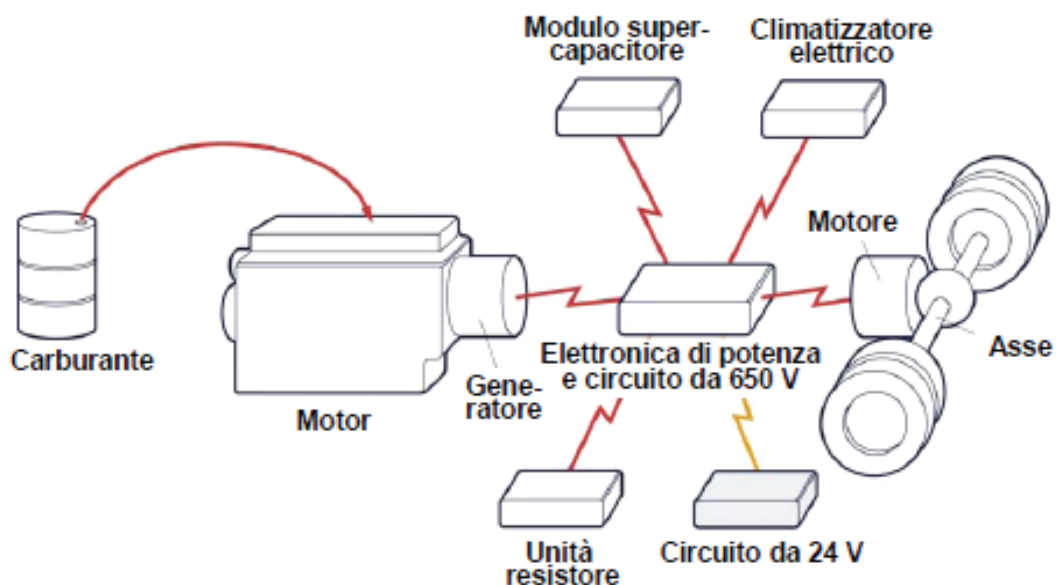
Studi preliminari hanno dimostrato che la trazione ibrida in serie è adatta al servizio urbano caratterizzato da frequenti "stop-and-go", dato l'elevato grado di rigenerazione della forza frenante. Quest'ultima è il risultato del potente motore elettrico che eroga tutta la potenza propulsiva ma rigenera anche la stessa energia in fase di frenata.

I componenti principali della catena cinematica sono illustrati in figura 5.1.

Il motore è un normale motore Scania diesel a bioetanolo.

Sul motore è installato un potente generatore elettrico. Un'unità simile alimenta l'asse posteriore, fungendo da motore per la propulsione e da generatore per la frenata. Inoltre ci sono organi ausiliari azionati meccanicamente o elettricamente.

Figura 5.1 La trazione ibrida in serie di Scania



Flessibilità della trazione ibrida in serie

Un sistema di trazione ibrida in serie è caratterizzato dal fatto che non esiste alcun collegamento meccanico fra il motore a combustione e il motore elettrico di propulsione. Ciò garantisce una notevole libertà di progettazione e allestimento del veicolo. I componenti della catena cinematica possono essere sistemati in modo pressoché indipendente gli uni dagli altri, ad esempio per ottimizzare la distribuzione del peso e lo spazio per i passeggeri.

La soluzione di autobus ibrido di Scania lanciata nel 2007 è stata realizzata per valutare l'interesse pubblico in un nuovo concetto di design per autobus urbani con propulsione elettrica ibrida e da allora continua a svolgere il ruolo di laboratorio "su ruote". I componenti della catena cinematica sono situati l'uno sull'altro sul lato posteriore dell'autobus, con accumulatori di energia e funzioni ausiliarie integrati nella struttura del tetto, garantendo così spazio nella sezione centrale dell'autobus per un vano passeggeri agevolmente percorribile. Nella parte frontale la postazione di guida all'estremità dell'asse anteriore costituisce un modulo a se stante.



Con ruote situate negli angoli e trazione integrale, questo autobus vanta un'eccezionale maneggevolezza senza praticamente nessuna parte sporgente in curva. La struttura modulare offre la possibilità di realizzare nuovi tipi di autobus urbano con facilità di accesso ed un'elevata attrattività per i passeggeri. Questi moduli sono ugualmente adatti per autobus a due piani e per servizi aeroportuali, nonché per alcuni nuovi potenziali concetti di autocarri, ad es. per la raccolta rifiuti e la distribuzione in città.

Dettagli sulla progettazione del sistema di trazione

In sede di progettazione della trazione ibrida in serie sono stati considerati i seguenti fattori:

- una riduzione dei consumi e delle emissioni almeno del 25% nel servizio urbano "stop-and-go",

- maggior comfort con una accelerazione fluida e costante,
- motore diesel ad elevata efficienza per la generazione di potenza adattato a funzionare a bioetanolo,
- riduzione delle emissioni di CO₂ fossile fino al 90% grazie all'etanolo,
- catena cinematica di elevato rendimento con elevate prestazioni per un maggior piacere di guida,
- modulo di accumulo (supercapacitori), riscaldamento e ventilazione e climatizzatore elettrico sul tetto,
- possibilità di adattare in ugual misura la catena cinematica a motori a biogas o gas naturale, con spazio per il serbatoio sul tetto, nonché a potenziali concetti di propulsione del futuro quali motori di nuova generazione, batterie e celle a combustibile,
- operatività e qualità garantite grazie all'uso esclusivo di componenti progettati per il servizio pesante,
- concetto di trazione economicamente conveniente per Scania e per i suoi clienti.

Potenza e prestazioni

Vista l'elevata potenza e coppia dei motori Scania si sono scelti generatori/motori elettrici ad alto rendimento. Il motore elettrico di propulsione eroga la massima coppia (2750 Nm) fin dallo spunto e l'azionamento è continuo.

Anche il modulo di accumulo dell'energia con supercapacitori è progettato per un elevato rendimento e un'alta efficienza.

Oltre al differenziale sull'asse, non sono necessari altri riduttori dato l'ampio range di funzionamento del motore di propulsione (0-2400 giri/min, coppia massima fin dalla partenza). L'accelerazione del veicolo dipende solo dalla potenza del motore elettrico di propulsione e quindi è indipendente dalla potenza erogata dal motore a combustione interna.

Il motore è stato ottimizzato per funzionare con la massima efficienza, la minima rumorosità e le minime emissioni anziché cercare di bilanciare tutti i possibili parametri.

L'efficienza del generatore è di norma superiore al 90% e va anche oltre il 94%. Il motore funziona in base al principio diesel con un'efficienza tipica fra il 40 e il 45%. L'efficienza del motore di propulsione è simile al generatore ed è leggermente inferiore a velocità molto bassa.

Rispetto agli autobus tradizionali, grazie alla frenata rigenerativa e all'ottimizzazione del funzionamento del motore nel servizio urbano si ottiene almeno il 25% di risparmio totale di carburante.

Per soddisfare le esigenze dei clienti Scania in fatto di qualità del prodotto, i componenti che includono i moduli di accumulo dell'energia hanno una durata analoga a quella del veicolo, ovvero da 10 a 15 anni. Tutti i componenti sono quindi progettati per la minima manutenzione. L'azionamento elettrico offre

diversi vantaggi. Innovative soluzioni elettriche per organi ausiliari come climatizzatore, servosterzo e compressore dell'aria saranno introdotte nella produzione su vasta scala entro pochi anni [27].

Motore	Motore Scania da 9 litri diesel-etanolo
Potenza	198 kW (270 CV) a 1900 giri/min
Coppia	1200 Nm a 1100-1400 giri/min
Generatore	Voith ELVO Drive®, generatore TFM, raffreddato ad acqua Coppia costante: 1250 Nm Potenza costante: 220 kW meccanica dal motore Velocità massima: 2400 giri/min
Motore di propulsione	Voith ELVO Drive®, motore TFM, raffreddato ad acqua Coppia massima: 2750 Nm, coppia costante: 1800 Nm Potenza costante: 150 kW meccanica Velocità massima: 2400 giri/min
Accumulo di energia	Supercapacitori: 4 moduli da 125 volt Maxwell BOOSTCAP®, raffreddati ad aria Energia disponibile: >400 Wh
Sistema di controllo	Architettura CAN Scania di serie con funzionalità ampliata per comando ibrido
Velocità massima	78 km/h, a seconda del rapporto di trasmissione finale
Partner di sviluppo	Voith (sistema di trazione ibrida) Carrier-Sütrak (climatizzatore elettrico)

Tabella 5.3 Caratteristiche tecniche della trazione ibrida in serie di Scania

Conclusioni

La diffusione dei veicoli elettrici è limitata ad usi prevalentemente cittadini, a causa dell'autonomia ad oggi ridotta e dei costi ancora elevati.

Inoltre il contributo della mobilità elettrica alla riduzione dei gas serra non è sempre verificato in quanto dipendente dalla tecnologia utilizzata per produrre l'energia necessaria a caricare le batterie.

I veicoli a propulsione ibrida non hanno problemi legati all'autonomia e possono contribuire da subito alla riduzione delle emissioni di CO₂ e alla diminuzione della dipendenza dai combustibili fossili.

Tuttavia il settore della mobilità ibrida è contraddistinto da singole applicazioni che possono avere esigenze diverse e non è possibile definire uno standard adatto per ogni situazione.

Esistono varie tipologie di veicolo ibrido (micro, mild, full hybrid, extendend range, plug-in, ...) ed è opportuno valutare quale sia quella più efficace per le specifiche esigenze di ogni settore della mobilità.

Lo sviluppo dei veicoli ibridi deve necessariamente essere abbinato ad una continua evoluzione di diversi settori come quello dei motori a combustione interna, degli accumulatori elettrici e dei combustibili poiché, per raggiungere gli obiettivi di indipendenza dal petrolio e di riduzione delle emissioni, occorre migliorare l'efficienza di ciascun componente.

Nel campo delle batterie elettriche la tecnologia al litio (quella litio – ioni soprattutto, in quanto decisamente più matura, affermata, e già sperimentata con successo, mentre quella litio – polimeri è ancora in fase di studio e sviluppo) rappresenta in assoluto la soluzione potenziale migliore che si abbia a disposizione nel campo della trazione elettrica: uno dei punti dolenti di questa tecnologia può essere il fattore economico.

Il costo di questi accumulatori è infatti ancora relativamente elevato rispetto ad altri tipi di batterie, ma d'altro canto è pur vero che un mercato dell'auto elettrica destinato ad espandersi potrà solo giovare all'economia di tale tecnologia: è infatti abbastanza intuitivo capire che un forte aumento della domanda porterà ad un grosso aumento della produzione, che a sua volta potrà indurre una riduzione dei costi e dei prezzi, con vantaggi sia per i produttori, che per i clienti finali.

È comunque giusto sottolineare che questa tecnologia ha ancora ampi margini di sviluppo e miglioramento, e gli investimenti in questo senso da parte di numerosissimi paesi in tutto il mondo.

L'abbinamento dei supercondensatori alle batterie al piombo nella trazione stradale presenta un duplice interesse.

Da un lato consente un aumento di efficienza dell'intero sistema di accumulo ibrido, dall'altro livellando i picchi di potenza che dovrebbero assorbire od erogare le batterie al piombo nelle fasi di accelerazione e di frenatura ne permette un allungamento della durata.

I biocarburanti rivestono un ruolo importante nella definizione della nuova politica energetica ed ambientale europea, in particolare l'impiego dell'etanolo derivato da fonti rinnovabili (bio-etanolo) da impiegare come "fuel extender" della benzina e del gasolio.

Le problematiche inerenti all'uso del bioetanolo hanno carattere essenzialmente prestazionale, data la forte diversità chimica di questa sostanza rispetto agli idrocarburi. Ciò nonostante l'esperienza pregressa, come quella conseguita in Brasile negli anni '80 e '90 col Progetto Pro-Alcool, e lo sviluppo di tecnologie motoristiche e di materiali resistenti all'azione aggressiva dell'etanolo hanno consentito di mettere già sul mercato autoveicoli autoadattanti (FFV) compatibili con combustibili contenenti etanolo, sia a basse concentrazioni che a elevate concentrazioni nella benzina.

A riguardo delle emissioni inquinanti generate dalla combustione delle miscele etanolo/benzina nei motori, le poche esperienze svolte negli ultimi anni con autoveicoli dotati di propulsori avanzati (Euro 3 ed Euro 4) hanno indicato generalmente una diminuzione delle specie regolamentate a fronte di un netto aumento dell'emissione dell'acetaldeide rispetto all'alimentazione con benzina convenzionale.

Bibliografia

- [1] John M.German, “*Hybrid Powered Vehicles*”, SAE International 2003
- [2] “*A better battery for stop-start*”, Automotive Engineering International (AEI), 10/2011
- [3] “*Lithium battery bonanza*”, AEI, 12/2009
- [4] “*Integration of a Lithium-ion battery into hybrid and electric vehicles*”, ATZ Autotechnology, 12/2009
- [5] “*Italian power*”, Emissioni Zero, 05/2011
- [6] “*Oltre il litio*”, Emissioni Zero, 05/2011
- [7] G.Riboli, F.Sala, “*Studio di un veicolo ibrido serie con configurazione innovativa*”, Tesi di laurea, 2008/2009
- [8] “*E' ora di smettere di bere*”, Emissioni Zero, 05/2009
- [9] “*PSA e-HDI micro-hybrid system*”, AEI, 10/2010
- [10] “*Impacts of an electric powertrain on the braking system*”, ATZ Autotechnology, 08/2011
- [11] “*Lotus Engineering unveils ICE for range-extender hybrids*”, AEI, 11/2009
- [12] <http://www.groupplotus.com/engineering/showcases.html>
- [13] “*Gas-Turbine part of U.K. technology thrust*”, AEI, 04/2010
- [14] <http://www.bladonjets.com/applications/automotive/>
- [15] <http://www.insideline.com/jaguar/jaguar-c-x75-concept-first-drive.html>
- [16] “*Honda Insight*”, AEI, 10/2009
- [17] “*Trapianto riuscito*”, Emissioni Zero, 05/2011
- [18] “*Chevrolet Volt*”, AEI, 04/2011

- [19] <http://www.h2roma.org>
- [20] “*Voltec-the propulsion system for Chevrolet Volt and Opel Ampera*”, ATZ Autotechnology, 04/2011
- [21] <http://www.autoblog.it/post/34266>
- [22] http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries
- [23] F.Vellucci, G. Pede, “*Sviluppo di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive*”, ENEA Report RdS/2011/27
- [24] <http://www.autoblog.it/post/38343/>
- [25] M.Ciavatta, I.Gentile, “*Stato dell’arte dei sistemi propulsivi*”, Tesi di laurea, 2007/2008
- [26] F.Avella, “*Il bioetanolo come combustibile per l’autotrazione*”, Rapporto tecnico SSC (stazione sperimentale per i combustibili) N. 200904183
- [27] <http://www.scania.com>
- [28] <http://stirlingfreepiston.blogspot.com>
- [29] “*EcoMotors’ OPOC program enters combustion-optimization phase*”, AEI, 12/2010
- [30] E. Tironi, L. Piegari, V. Musolino, S. Grillo, “*Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia quali supercondensatori e sistemi di accumulo misti (batterie + supercondensatori)*”, ENEA Report RdS/2011/34