

SISTEMI DI PROPULSIONE ELETTRICA ED IBRIDA

Dalla sorgente a bordo all'attuazione meccanica

SISTEMI DI PROPULSIONE ELETTRICA ED IBRIDA
Dalla sorgente a bordo all'attuazione meccanica

A cura di Giampiero Brusaglino, Giovanni Pedè ed Emilio Vitale

2009 ENEA
Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e
lo sviluppo economico sostenibile

Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 Roma

ISBN 978-88-8286-205-3



Agenzia nazionale per
le nuove tecnologie, l'energia e
lo sviluppo economico sostenibile



Commissione Italiana Veicoli Elettrici Stradali
a Batteria, Ibridi e a Celle a combustibile

SISTEMI DI PROPULSIONE ELETTRICA E IBRIDA

Dalla sorgente a bordo all'attuazione meccanica

A cura di Giampiero Brusaglino, Giovanni Pede ed Emilio Vitale

PRESENTAZIONE

Gli ultimi dieci anni (il lancio commerciale della Prius risale al 1997) hanno visto il veloce sviluppo di una tecnologia, quella dei veicoli ibridi, che si è progressivamente imposta come una delle maggiori innovazioni nel settore della mobilità individuale dai tempi dell'introduzione del diesel "veloce", all'inizio degli anni 70.

I contemporanei sviluppi della tecnologia dei sistemi di accumulo elettrico, con lo sviluppo delle batterie al litio, hanno poi rivitalizzato anche il settore dei veicoli elettrici, le cui prestazioni, soprattutto in termini di autonomia, sono finalmente cresciute a livelli tali da soddisfare un'ampia serie di esigenze, dal trasporto merci "porta a porta" a quello dei servizi ad alcune nicchie del trasporto pubblico.

La tecnologia è ancora una volta a disposizione della naturale esigenza di mobilità individuale nelle nuove condizioni sociali, ambientali ed economiche che caratterizzano il nostro tempo.

A questi temi l'ENEA ha dedicato attenzione e risorse fin dagli anni 80, ed alle attività e conoscenze acquisite sulle batterie si sono aggiunte nel tempo le prove con i veicoli elettrici ed in seguito con gli ibridi, con competenze e infrastrutture che permettono oggi di accompagnare lo sviluppo dell'industria nazionale in questo settore da sempre strategico per il nostro paese.

Uno dei primi contributi dell'ENEA alla crescita del settore è stato infatti l'offerta ai costruttori di servizi di prova e di qualificazione. Grazie a importanti attrezzature realizzate allo scopo, sono stati sperimentati presso il Centro Ricerche Casaccia e sul campo componenti e veicoli di ogni genere, con prove di durata, prestazioni, consumi ed emissioni che hanno contribuito a far chiarezza sulle possibilità delle tecnologie.

Un secondo tipo di contributo, più prettamente di ricerca e sviluppo, l'ENEA lo ha fornito in alcuni settori poco esplorati, ma ritenuti, a ragione, particolarmente promettenti, come l'elettrochimica del litio o lo sviluppo di sistemi di gestione e controllo per batterie e supercondensatori, insieme alla modellazione, sviluppo e realizzazione di sistemi di trazione completi, in associazione con l'industria nazionale e l'università.

L'ENEA, anche in questo settore, ha operato pertanto in stretta collaborazione con il mondo industriale, individuando obiettivi di rilevante interesse economico e sociale da raggiungere con competenze e capacità di alto livello tecnico e scientifico.

L'ENEA si fa adesso promotrice di un'opera che raccoglie in modo organico le informazioni e le conoscenze che intervengono nella progettazione e nello sviluppo di questi sistemi, conoscenze che, per la loro stessa natura, si fondano sull'integrazione di due grandi branche dell'ingegneria, quella elettrica e quella meccanica.

Il lavoro, reso possibile dalla collaborazione di un gruppo di tecnici e ricercatori che operano da anni in questo settore, vuole contribuire a diffondere la conoscenza di questo tipo di veicoli, delle loro potenzialità e delle possibili applicazioni.

L'opera si compone di cinque parti, la prima per raccontare la storia di questa tecnologia e le motivazioni alla base della sua diffusione, le tre parti centrali per accompagnare il tecnico nella loro progettazione, la quinta parte per illustrarne le applicazioni e le potenzialità.

Si rivolge quindi non solo a studenti e tecnici, ma anche a quanti operano nel settore, svolgono azione di orientamento e partecipano ai processi decisionali, contribuendo in tal modo a rafforzare l'interesse verso un settore in cui è indispensabile investire soprattutto nelle risorse umane, attraverso un organico sviluppo delle necessarie competenze tecniche e scientifiche.

Giovanni Lelli

Commissario ENEA

PREFAZIONE

La crisi che ha coinvolto tutti i settori dell'economia è particolarmente rilevante nell'area dei sistemi di mobilità e della produzione dei relativi mezzi di trasporto.

La contrazione del mercato e, conseguentemente, sia dei volumi di veicoli venduti che dei relativi componenti, sta comportando una profonda revisione del modo in cui si realizza il prodotto.

Per continuare ad assicurare la disponibilità di un efficiente sistema di mobilità, sarà necessario un razionale impegno delle risorse, in un contesto di sostenibilità ecologica ed energetica.

Occorre quindi abbandonare l'ottica integralista della migliore soluzione possibile, perseguendo lo sviluppo di un sistema di trasporto costituito da una pluralità di soluzioni tecnologiche, adatte alle varie tipologie di missioni operative e di situazioni ambientali ed orientate al miglior utilizzo delle risorse energetiche ed alla conservazione dell'ambiente.

Sarà altresì necessario adeguare alla nuova situazione economica le risorse dedicate alla produzione dei mezzi e delle infrastrutture.

Viene in soccorso a questo problema il patrimonio maturato nel campo delle tecnologie per i veicoli elettrici sviluppato dagli enti di ricerca, pubblici e privati, e dalle università, che può trovare opportunità applicativa in nuove linee di prodotto ed in settori di mercato addizionali.

Tali linee coinvolgono sistemi di propulsione diversificati, motori e componenti elettrici, sistemi di accumulo e convertitori elettronici.

I nuovi settori di mercato, relativi all'uso di tali prodotti prevalentemente nelle aree urbane e suburbane, richiedono in contemporanea l'allestimento delle infrastrutture per il rifornimento di energia elettrica.

Quest'opera vuole quindi essere una testimonianza del cammino tecnologico che istituti di ricerca, università e industria hanno sinora percorso, dei risultati e delle conoscenze acquisite sui sistemi di propulsione elettrica e ibrida al fine di offrire soluzioni per il sistema di mobilità in grado di ridurre le emissioni di CO₂ e inquinanti, contribuendo ad un uso razionale dell'energia.

Queste tecnologie disponibili per realizzare soluzioni nel campo dei veicoli stradali, sono poi altrettanto utili anche in altri settori quali i veicoli su rotaia e la propulsione in campo agricolo.

Nessuno, infine, è oggi in grado di dire se il futuro sarà veramente basato sull'idrogeno e sulle applicazioni delle celle a combustibile, ma, indubbiamente, le soluzioni illustrate in questo testo possono costituire le basi tecnologiche e conoscitive.

Nevio Di Giusto

***Presidente ATA – Associazione
Tecnica dell'Automobile***

***Amministratore Delegato
Centro Ricerche Fiat ed Elasis***

PREMESSA

Un contributo sostanziale alla instaurazione di un sistema di trasporto eco-sostenibile è dato dalla disponibilità di mezzi elettrici e ibridi, per le loro prerogative di emissioni limitate o nulle e per la ridotta produzione globale di CO₂ nell'utilizzo del mix europeo di fonti primarie di energia.

La tecnologia della propulsione elettrica ha infatti raggiunto uno sviluppo tale da porre l'industria nella condizione di produrre veicoli con sistemi propulsivi diversificati, con soluzioni congruenti alle esigenze ambientali, alla tipologia d'uso e alla disponibilità delle infrastrutture.

Le tecniche di base, illustrate nel presente volume, sono frutto di sviluppi decennali di enti di ricerca, dell'industria e del mondo accademico, maturati con il contributo di istituzioni e collaborazioni a livello nazionale ed europeo.

La diffusione dei veicoli elettrici su scala significativa richiede la partecipazione di tutti gli operatori in questo campo e l'adesione ad una linea di cultura rivolta alla valorizzazione dei benefici ambientali ed energetici acquisibili con la loro introduzione nel sistema di trasporto.

Prosegue con questo obiettivo l'impegno sinergico fra università e industria per il consolidamento delle tecnologie e l'apertura verso soluzioni di sistema mirate alla sostenibilità economica e al miglior utilizzo delle risorse energetiche, incluse le fonti rinnovabili.

L'utenza disporrà man mano di una scelta di mezzi adatti a missioni diversificate, che potranno essere anche oggetto di indicazioni degli Operatori del traffico e della Pubblica Autorità, a beneficio della salvaguardia dell'ambiente e dell'uso razionale dell'energia.

La lettura di questo libro è consigliata a

- operatori dei trasporti, per l'orientamento sulle scelte delle tipologie dei mezzi
- studenti e tecnici, per un approfondimento sulle tecnologie dei sistemi elettrici
- Pubbliche Autorità, per l'impostazione delle strategie di impiego e di supporto.

Francesco Profumo

Rettore del Politecnico di Torino

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, la domanda di trasporto è cresciuta a ritmi molto elevati a causa di profondi mutamenti nella struttura economica e sociale; contemporaneamente le prestazioni energetiche ed emissive dei sistemi di trazione sono migliorate in modo consistente. Parallelamente sono aumentate, però, le masse e le potenze medie installate del parco veicolare; inoltre sono aumentate le percorrenze e la congestione per cui la crescita dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra del settore trasporti sembra inarrestabile.

Nelle recenti analisi dell'Agencia Europea per l'Ambiente (EEA) il contenimento della domanda, attraverso il governo dei fattori che la generano, viene considerato come l'elemento cruciale per la riduzione degli effetti negativi della mobilità. Ci si scontra però con una "incomprimibilità" che sembra strutturale, e la insostenibilità del sistema trasporti rispecchia fedelmente l'insostenibilità di un sistema economico ed organizzativo a macroscale. Solo alcuni classici esempi: come è conciliabile con la sostenibilità ambientale la gestione "just in time" e la delocalizzazione del lavoro" in aree estese anche centinaia e migliaia di chilometri? Come è possibile ridurre i consumi energetici (e conseguentemente le emissioni di gas serra) in un sistema dove i costi energetici si confrontano in modo diretto con gli altri costi industriali senza un'adeguata contabilizzazione delle esternalità negative?

La Comunità Europea è andata definendo con chiarezza ed incisività le sue strategie per il contenimento di consumi energetici ed emissioni climateranti, compresi quelli dei trasporti. La sottoscrizione degli impegni internazionali, le direttive comunitarie e, non ultimo, il palesarsi della crisi energetica ed economica costringono anche il nostro Paese a confrontarsi più efficacemente con il problema, anche per non perdere l'opportunità di innovare prodotti e processi.

Attualmente le politiche comunitarie per la riduzione degli impatti energetici ed ambientali dei trasporti si concentrano sull'introduzione di standard ambientali per i veicoli stradali e sull'applicazione del principio di "chi inquina paga" anche attraverso la tariffazione d'uso delle infrastrutture. Non vi è però accordo sulle misure di tassazione in quanto ritenute penalizzanti per il sistema economico.

Secondo l'OECD (dicembre 2007), ad esempio, i trasporti sono relativamente refrattari a forzanti di prezzo, anche quello dei combustibili; se si sceglie di agire sui prezzi, perciò, le variazioni devono essere tanto consistenti da essere praticamente inattuabili. L'OECD valuta che l'unica misura proponibile con costi accettabili per ridurre l'impatto energetico ed

ambientale del settore risulta essere, nel breve termine, il miglioramento delle prestazioni energetiche ed emissive dei veicoli.

Dalle analisi svolte, anche recentemente, dall'ENEA risulta che il settore dei trasporti presenta un elevato margine di contenimento di consumi energetici ed emissioni climalteranti, nonostante le ipotesi di crescita della domanda (da verificarsi alla luce dell'andamento del prezzo del petrolio e della crisi economica in atto); sono comunque necessarie sinergie tra interventi di sistema e disponibilità di veicoli a bassi consumi ed emissioni. Per ottenere risultati tangibili, è necessario agire su più fronti, dalle prestazioni energetiche del parco veicolare alla promozione delle modalità di trasporto meno energivore e a minor impatto sul clima e sull'ambiente più in generale, all'introduzione graduale di biocombustibili di terza generazione.

Tra gli economisti dei trasporti vi è, quindi, un consenso generalizzato riguardo alla opportunità, nel breve termine, di sforzi per ottenere i miglioramenti delle prestazioni energetiche dei veicoli. Le misure volte al miglioramento tecnologico dei veicoli e l'utilizzo dei sistemi infotelematici per il controllo e la gestione del traffico, risultano effettivamente più efficaci in termini di costi-benefici (relativamente agli obiettivi energetici e climatici) del potenziamento e adeguamento infrastrutturale, anche quando questo sia rivolto alle modalità di trasporto a minor impatto energetico/ambientale (linee su ferro).

Se gli interventi di adeguamento della infrastruttura stradale spesso comportano a regime un incremento del traffico, gli interventi sulla rete ferroviaria, sicuramente essenziali per la sostenibilità del sistema dei trasporti, necessitano di investimenti sempre più difficili da realizzare con risorse pubbliche.

Il consenso degli analisti sulla priorità di interventi di miglioramento dell'efficienza del parco veicolare stradale non va però intesa esclusivamente come miglioramento delle prestazioni energetiche dei veicoli, perché un ruolo essenziale dovranno avere misure che influenzino le scelte degli utenti. Perché il rinnovo del parco veicolare consenta di raggiungere i target ambiziosi previsti dalla Comunità dovranno essere messe in atto misure decise su più fronti:

1. incentivazione all'acquisto e l'utilizzo veicoli con massa e potenza ridotte, attraverso politiche fiscali e di restrizione agli accessi in alcune aree.
2. politiche ed interventi strutturali per l'integrazione fra citycar (a consumo minimo) e Trasporto Pubblico Locale (per es. realizzazione parcheggi di scambio, agevolazioni fiscali sul loro uso sistemi telematici per la gestione delle prenotazioni ecc.) con interventi più

decisi di regolamento degli accessi , di *enforcing* del sanzionamento delle infrazioni, di messa in atto di misure di *calming* e di governo del traffico (sistemi ITS per la gestione in tempo reale del traffico.

3. riduzione dei limiti di velocità sulle autostrade e messa in atto di reali controlli sul rispetto dei limiti stessi(si pensi agli ottimi ritorni del sistema TUTOR); quest'ultimo provvedimento, oltre a ridurre in modo diretto i consumi, tendono a favorire l'utilizzo di altre modalità di trasporto quali il treno (visto anche il miglioramento dell'offerta con il prossimo esercizio della rete ad Alta Velocità).

Quando si parla di miglioramenti tecnologici per la riduzione dei consumi energetici dei veicoli stradali non ci si riferisce, ovviamente, solo al miglioramento dell'efficienza energetica dei propulsori ma va considerato il ruolo importante degli altri componenti (gomme, sistemi di trasmissione, uso di materiali in grado di alleggerire la carrozzeria ecc.) e soprattutto va accettata una riduzione delle potenza e quindi delle prestazioni dei veicoli stessi compatibilmente con gli standard di sicurezza.

Tra i miglioramenti delle prestazioni energetiche del parco stradale vanno infine considerati anche quelli ottenibili da una migliore consapevolezza da parte dell'utenza di poter ridurre significativamente i consumi energetici mediante accorgimenti di guida e di manutenzione dei veicoli.

Solo un cenno infine alla necessità di un incremento decisivo del trasferimento modale da trasporto privato a trasporto pubblico (sia su gomma che su ferro) e questo sia per ridurre i consumi en energetici (purché si raggiungano coefficienti di riempimento medi elevati dei mezzi) che per migliorare la vivibilità delle città. Le misure da adottare son note da anni:

1. Miglioramento dell'offerta del trasporto pubblico di massa
2. Creazione di una rete adeguata di parcheggi di scambio nelle aree suburbane e periferiche
3. Politiche di regolamento degli accessi e sistemi di tariffazione integrata (trasporto pubblico, parcheggi)
4. Messa a disposizione di sistemi di informazione all'utenza fruibili sia nella modalità pre-trip che in quella on-trip.

Come detto sopra, nel lungo periodo un ruolo sostanziale potranno avere solo le misure di gestione e contenimento della domanda di trasporto che però prevedono interventi non limitati strettamente all'ambito del sistema trasporti ma coinvolgono cambiamenti organizzativi e strutturali del sistema complessivo (quasi un nuovo modello di civiltà).

In conclusione, in attesa che questa difficile evoluzione possa concretizzarsi lo sviluppo e l'introduzione di nuovi veicoli con consumi energetici molto ridotti ed impatto ambientale quasi nullo sono un obiettivo raggiungibile nel breve-medio termine con vantaggi sostanziali in termini di costi-benefici. A tal fine, le tecnologie esposte in questo volume sono sicuramente tra quelle prioritarie.

L'ENEA, che ha dedicato attenzione e risorse al tema della mobilità e delle motorizzazioni a basso impatto ambientale fin dagli anni 80, è attualmente impegnato in attività di caratterizzazione e sviluppo di sistemi di trazione elettrica ed ibrida.

Alcuni degli argomenti su cui l'ENEA può oggi vantare una specifica competenza sono la gestione delle batterie, lo sviluppo di sistemi di controllo dei flussi di potenza, le applicazioni dei supercondensatori, anche in associazione alle batterie, la modellazione di componenti e sistemi, lo studio e la realizzazione di sistemi di trazione completi.

Voglio a riguardo ricordare solo due realizzazioni dei nostri laboratori che fanno parte degli sviluppi recenti, una dedicata al trasporto pubblico urbano, l'altra all'utenza privata, entrambe illustrate in questo volume. Si tratta dello ZeroFilo-Bus e della micro vettura Urb-e, due soluzioni a basso consumo che utilizzano una tecnologia innovativa e molto promettente, quella dei supercondensatori, anch'essa di seguito ampiamente trattata.

Maurizio Romanazzo

ENEA, Responsabile Unità trasporti e mobilità sostenibile

INDICE

Parte I

Introduzione ai veicoli elettrici ed ibridi

| | |
|---|----|
| Capitolo 1 | 21 |
| Un po' di storia: le linee di sviluppo dei veicoli elettrici e ibridi <i>Giampiero Brusaglino, ATA – Associazione Tecnica dell'Automobile</i> | |
| Capitolo 2 | 29 |
| Classificazione dei veicoli ibridi <i>Giampiero Brusaglino, ATA – Associazione Tecnica dell'Automobile</i> | |
| Capitolo 3 | 37 |
| Una road-map per i veicoli elettrici ed ibridi <i>Giampiero Brusaglino, ATA – Associazione Tecnica dell'Automobile</i> | |
| Capitolo 4 | 45 |
| Costi e benefici in campo energetico ed ambientale della trazione elettrica stradale <i>Pietro Menga, CEI-CIVES – Commissione Italiana Veicoli Elettrici Stradali a batteria, ibridi e a celle a combustibile</i> | |

Parte II

Tecnologie e componenti

| | |
|---|-----|
| Capitolo 5 | 91 |
| I motori a combustione interna nei veicoli ibridi <i>Leone Martellucci, Enrico Sciubba, Università di Roma "La Sapienza"</i> | |
| Capitolo 6 | 125 |
| Macchine elettriche nei sistemi elettrici di propulsione <i>Giampiero Brusaglino, ATA, Vittorio Ravello, Centro Ricerche Fiat</i> | |
| Capitolo 7 | 147 |
| La conversione elettronica di potenza nei sistemi elettrici di propulsione <i>Fabio Crescimbeni, Luca Solero, Università degli Studi Roma Tre</i> | |
| Capitolo 8 | 209 |
| I sistemi di accumulo elettrico <i>Mario Conte, ENEA</i> | |
| Capitolo 9 | 243 |
| Le celle a combustibile <i>Stefano Galli, Alfonso Pozio, ENEA</i> | |

Parte III

Il progetto di sistema del veicolo ibrido

| | |
|--|-----|
| Introduzione alla parte terza | 277 |
| Capitolo 10 | 281 |
| Strategie di gestione energetica dei veicoli ibridi <i>Massimo Ceraolo, Università degli Studi di Pisa</i> | |
| Capitolo 11 | 313 |
| Il dimensionamento preliminare del sistema <i>Manlio Pasquali, Giovanni Pedè, ENEA</i> | |
| Capitolo 12 | 339 |
| Processo di sviluppo e messa a punto <i>Fernando Ortenzi, CTL – Centro di ricerca Trasporti e Logistica dell’Università di Roma “La Sapienza” Ennio Rossi, ENEA</i> | |

Parte IV

Approfondimenti metodologici e progettuali

| | |
|--|-----|
| Capitolo 13 | 355 |
| I motori a combustione interna nei veicoli ibridi: esempi applicativi <i>Enrico Sciubba, Leone Martellucci, Università di Roma “La Sapienza”</i> | |
| Capitolo 14 | 369 |
| Sistemi con trasmissione a rotismo epicicloidale <i>Massimo Ceraolo, Università degli Studi di Pisa</i> | |
| Capitolo 15 | 383 |
| I sistemi di accumulo elettrico di tipo “misto” <i>Manlio Pasquali, Giovanni Pedè, ENEA</i> | |
| Capitolo 16 | 411 |
| Metodi sperimentali ed apparecchiature/impianti di prova <i>Fernando Ortenzi, CTL – Centro di ricerca Trasporti e Logistica dell’Università di Roma “La Sapienza” Ennio Rossi, ENEA</i> | |

Parte V

Esperienze ed applicazioni

| | |
|---|-----|
| Capitolo 17 | 431 |
| Analisi tecnologica delle soluzioni e delle strategie di sviluppo proposte dalle grandi case automobilistiche <i>Fabio Orecchini, Adriano Santiangeli, Fabrizio Zuccari, GEA – Gruppo Energia Ambiente, CIRPS – Centro Interuniversitario di Ricerca Per lo Sviluppo sostenibile, Università di Roma “La Sapienza”</i> | |
| Capitolo 18 | 469 |
| Veicoli ibridi solari Progetto ottimizzato e gestione dei flussi energetici <i>Ivan Arsie, Cesare Pianese, Gianfranco Rizzo, Marco Sorrentino, Università degli Studi di Salerno</i> | |
| Capitolo 19 | 497 |
| I veicoli ibridi per il trasporto pubblico urbano <i>Antonino Genovese, ENEA</i> | |
| Capitolo 20 | 521 |
| I veicoli ibridi per il trasporto delle merci in ambito urbano <i>Adriano Alessandrini, Antonio Coccia, Francesco Filippi, CTL – Centro di ricerca Trasporti e Logistica dell’Università di Roma “La Sapienza”</i> | |
| Capitolo 21 | 545 |
| L’esperienza di mobilità sostenibile elettrica di Reggio Emilia <i>Roberto Badalotti, TIL Srl</i> | |
| Capitolo 22 | 555 |
| Applicazioni dei sistemi di accumulo elettrico al trasporto su rotaia <i>Romano Giglioli, Università degli Studi di Pisa Giovanni Pedè, ENEA</i> | |
| Capitolo 23 | 573 |
| L’ibrido in agricoltura <i>Bruno Paggi, Massimo Ribaldone, Samuele Tomasoni R&D SDFG</i> | |
| Capitolo 24 | 593 |
| Scooter ibrido parallelo “hyscooter - hys” <i>Luca Carmignani, Piaggio & Co SpA Massimo Ceraolo, Università degli Studi di Pisa</i> | |
| Capitolo 25 | 611 |
| Le auto elettriche più veloci al mondo <i>Giorgio Rizzoni, Center for Automotive Research, Ohio State University</i> | |

Parte I

Introduzione ai veicoli elettrici ed ibridi

CAPITOLO 1

UN PO' DI STORIA: LE LINEE DI SVILUPPO DEI VEICOLI ELETTRICI E IBRIDI

Giampiero Brusaglino

ATA – Associazione Tecnica dell'Automobile

L'automobile a trazione elettrica nasce e si sviluppa in parallelo a quella tradizionale, con la quale inizialmente concorre ad armi pari, offrendo vantaggi significativi in termini di comodità d'uso, pulizia, robustezza. Il sistema ibrido nasce invece dalla integrazione dei due tipi di motorizzazione, come meglio specificato nel seguito, e per la varietà possibile delle architetture, dei componenti e delle strategie di gestione, si presta a rispondere a specifici requisiti operativi e ad opportunità di ottimizzazione globale del sistema secondo obiettivi di tipo energetico o ambientale.

Queste potenzialità di applicazione e di uso, con obiettivi diversi e di volta in volta dipendenti da opportunità od esigenze tecniche, o contingenze storiche, ambientali ed energetiche, hanno già trovato riscontro, nel secolo scorso, in uno sviluppo tecnologico intrecciato e integrato delle due tecnologie, quella a trazione elettrica "pura" e quella ibrida.

1.1 Le alternanze e le motivazioni degli sviluppi: dai primordi della motorizzazione agli anni 70

Come è noto, il primo tipo di motorizzazione utilizzato per veicoli stradali nel pratico impiego è stato quello elettrico, con alimentazione da accumulatori, nell'ultimo decennio del 1800.

Con l'entrata in uso del veicolo a motore a scoppio, apparve, già agli inizi del nuovo secolo, l'opportunità di prevedere una doppio sistema di trazione, per migliorarne le prestazioni, tipicamente in accelerazione.

Un veicolo di questo tipo fu brevettato nel 1905 e un'automobile commerciale, attualmente esposta al Ford Museum di Dearborn, Michigan, era già in circolazione negli anni 1910-20. Per entrambi questi veicoli, il motore elettrico contribuiva a raggiungere la velocità di 50 km/h in 10 s, in luogo dei 20 s necessari al solo motore termico.

Una prima motivazione del sistema ibrido è stata quindi di tipo funzionale, come supporto alle prestazioni del veicolo.

Nei periodi delle guerre mondiali (1914-18 e 1940-45), in alcuni casi trovarono impiego nuovamente i veicoli elettrici a batteria, a causa della limitata disponibilità di combustibili liquidi.

Negli anni 60, con la motivazione del problema dell'inquinamento atmosferico, si iniziarono gli studi e le ricerche sui veicoli elettrici ad accumulatori, assu-

mendo come base nuove tecnologie nel frattempo maturate nel campo dei motori elettrici e dell'elettronica.

Queste nuove tecnologie consentivano il raggiungimento di prestazioni adatte all'inserimento dei veicoli nel traffico urbano e permettevano un miglioramento della prestazione energetica, anche grazie al recupero di energia in fase di frenatura.

Successivamente (fine anni 70, inizio anni 80) furono quindi realizzate dal Centro Ricerche Fiat, in collaborazione con ENEL, flotte di veicoli elettrici per servizi di pubblica utilità, per ENEL, SIP, per la Municipalità di Torino e per i suoi enti operativi.

Veicoli elettrici a batteria per trasporto persone e merci vennero poi costruiti in piccola serie da parte di diversi costruttori; si ricordano i veicoli della Piaggio, APE Electrocar e successivamente il Porter, i veicoli ZELE con struttura ad hoc realizzati da Zagato, diffusi anche in USA, i veicoli della PGE, con carrozzeria ad hoc, oggetto di sperimentazione assieme a veicoli Fiat e Piaggio in programmi dimostrativi CNR, i veicoli da trasporto Boxel e, in un tempo successivo, il Fiat Ducato Elettra, realizzato in co-produzione con PSA (gruppo Peugeot-Citroen).



Fig. 1.1 - Furgone elettrico FIAT-ENEL 900 E con pacco batterie estraibile

1.2 Dagli USA una spinta allo sviluppo dei veicoli elettrici e ibridi

Negli anni 70 e inizio '80 ci fu una grande spinta verso il veicolo elettrico da parte del Department of Energy (DOE) USA, sostenuta anche dal Department of Transportation, per i mezzi di trasporto collettivo.

Vennero sviluppati programmi dimostrativi con numerose flotte di veicoli elettrici in varie località degli Stati Uniti, principalmente adibite a servizi di pubblica utilità.

La motivazione era allora quella dell'inquinamento atmosferico (si ricorda la situazione drammatica del bacino di Los Angeles), ma anche la necessità di affiancamento dal petrolio come fonte energetica.

Le limitate autonomie dei veicoli elettrici, in relazione alle distanze in gioco negli insediamenti abitativi nord-americani, indussero il DOE a promuovere ricerche e sviluppi sui veicoli ibridi, doppiamente motivati dalla potenziale riduzione dei consumi di combustibili petroliferi e delle emissioni.

Il Centro Ricerche Fiat partecipò, con successo, assieme ad altre tre aziende USA, alla parte di sviluppo progettuale di una vettura ibrida negli anni 1977-78, a seguito di un concorso emesso dal DOE- JPL, a cui avevano risposto 40 aziende.

La soluzione di sistema definita dal Centro Ricerche Fiat era stata quella dell'architettura *parallelo*¹, adatta in particolare per lunghe percorrenze, e però con possibilità di funzionamento anche in puro elettrico nei centri cittadini. Lo sviluppo realizzativo prototipale fu poi affidato alla General Electric. Anche se non ci fu un seguito immediato nella produzione industriale, l'idea era stata lanciata e fu ripresa nel decennio successivo in più parti del mondo.

1.3 Gli sviluppi per il trasporto collettivo e le prime flotte di ibridi

In Europa e in Italia in particolare, negli anni fine 70 e 80 venne studiata la soluzione con architettura di tipo *serie*², per applicazione agli autobus urbani.

La motivazione era ormai duplice: riduzione dei consumi e riduzione delle emissioni, ivi compresa la possibilità di marcia in puro elettrico.

Un autobus urbano serie (con grado di ibridizzazione³ del 50%) fu sviluppato sul modello Fiat Iveco 418 AL nell'ambito del Progetto Finalizzato Energetica del CNR.

Il risultato fu una riduzione del consumo di gasolio del 21% rispetto ad un autobus convenzionale dello stesso tipo, a parità di carico trasportato, misurato sullo stesso percorso di linea urbana.

La batteria di accumulatori consentiva una marcia in puro elettrico di 12 km, sufficiente per l'attraversamento di un centro urbano.

Questo sistema serie fu poi ulteriormente sviluppato con l'applicazione ad un filobus bimodale realizzato nell'ambito del Progetto Finalizzato Trasporti, concluso nel 1987 con le prove in linea a Milano, presente una commissione europea del Programma COST 303, ed inoltre con l'applicazione successiva ad un filobus articolato con la motorizzazione elettrica alle ruote.

Autobus con sistema ibrido serie, costruiti dalla Società Altra, del Gruppo Iveco, sono in esercizio, dalla fine degli anni 80, in diverse città italiane.

¹ Le due motorizzazioni convogliano in parallelo (meccanico) i flussi di potenza alle ruote (vedi Cap. 2).

² La potenza del motore termico arriva alla trasmissione attraverso due macchine elettriche (vedi Cap. 2).

³ Vedi Cap. 11, Par. 4.

Nel campo dei veicoli per trasporto collettivo, in questo periodo vennero costruiti da Altra/Iveco minibus elettrici e posti in servizio a Roma.

Si sperimentò anche la procedura della ricarica delle batterie durante l'esercizio, che fu seguita in particolare dall'ENEA per l'analisi dei consumi e della tipologia di uso nel trasporto pubblico in aree urbane.

La soluzione ibrida di tipo serie venne studiata anche per applicazione ad autovetture, o veicoli da trasporto leggeri, con l'intendimento funzionale di "range extender" rispetto alle potenzialità di autonomia date dalle batterie.

Questa soluzione è stata sviluppata con la realizzazione ad hoc di un gruppo motore termico-generatore elettrico di piccola potenza e di emissioni molto ridotte, nell'ambito di un programma della Commissione Europea, con la partecipazione del Centro Ricerche Fiat e sperimentata su un veicolo elettrico Fiat Scudo. La soluzione "range extender" ha avuto un seguito in produzione, sul veicolo elettrico Renault Kangoo, negli anni 90.

Si può vedere in questo l'inizio del filone di sviluppo del veicolo ibrido "plug-in", il cui tipico impiego è quello di operare come puro elettrico nelle aree ad ambiente protetto, con estensione in ibrido a basse emissioni per impiego generale, e di effettuare la ricarica delle batterie dalla rete.

1.4 Lo sviluppo industriale negli anni 90

La fine degli anni 80 e l'inizio degli anni 90 segnarono l'avvio della produzione di veicoli elettrici da parte delle Case Automobilistiche.

Il concetto seguito fu quello di derivare le versioni elettriche da modelli di serie, al duplice scopo di contenere i costi di fabbricazione, che, dati i piccoli quantitativi, non avrebbero giustificato sviluppi di strutture ad hoc, e inoltre per beneficiare delle soluzioni tecnologiche della meccanica tradizionale, ampiamente collaudata e oggetto di certificazione nel campo della sicurezza e della guidabilità. All'inizio degli anni 90 Fiat e Peugeot misero a listino rispettivamente la Panda Elettra e la Peugeot 106, seguite a breve dalla Renault, di cui si è già detto a proposito del Kangoo.



Fig. 1.2 - Parcheggio di interscambio a Torino, con vetture Fiat Panda Elettra



Fig. 1.3 - Schema della Fiat Seicento Elettra

Nella seconda metà degli anni 90 la Fiat iniziò la produzione della Fiat Seicento Elettra, derivata dal modello convenzionale, con le modifiche appropriate per l'integrazione del sistema di trazione elettrica (Fig. 1.3).

Le soluzioni tecnologiche introdotte nei veicoli derivati da modelli convenzionali beneficiarono degli studi avviati da tempo con lo sviluppo di veicoli "concept" da parte di vari costruttori.

Questi veicoli erano impostati con strutture e carrozzerie ad hoc, seguendo la linea di pensiero orientata alla razionale integrazione degli elementi del sistema elettrico con l'architettura del veicolo, conformata secondo le esigenze dell'uso in città.

Si citano fra tutti la Fiat X1/23 (sviluppata già nel 1974), la Fiat Downtown, la ION della Peugeot, la Zoom della Renault, la E1 e la E2 della BMW, la Chico della Volkswagen, la ZIC (Fig. 1.5) e la Van ZIC .



Fig. 1.4 - Vettura elettrica di studio Fiat X 1/23

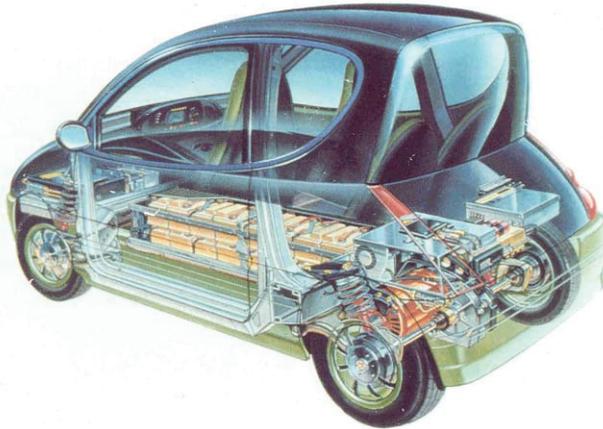


Fig. 1.5 - Vettura elettrica di studio ZIC del Centro Ricerche Fiat-CNR

Una menzione particolare va fatta per la vettura EV1 della General Motors, ad alte prestazioni, di cui fu costruita una piccola serie e messa in esercizio per un certo periodo in USA nella seconda metà degli anni 90.

Nel campo dei veicoli per trasporto collettivo vennero realizzati negli anni 90 autobus elettrici di medie dimensioni dalla Tecnobus e posti in servizio in città italiane ed estere. Un modello di autobus elettrico è stato realizzato anche dalla EPT, con sistema di ricarica delle batterie per induzione, utilizzato durante il servizio operativo in diverse città fra cui Torino.

A partire dalla fine degli anni 80 e fino ad oggi, costruttori specializzati producono veicoli elettrici in piccola serie per trasporto persone, merci o per impieghi speciali; segnaliamo Piaggio, FAAM, Microvett, Veicoli-EnerBlu, HTM, Moroni, ZEV. Ulteriori filoni di veicoli elettrici di sviluppo relativamente recente sono quelli dei veicoli a due e tre ruote, scooter, motocicli e biciclette a pedalata assistita realizzati da Peugeot, Vectrix e Oxygen (vedi Fig. 1.6).



Fig. 1.6 - CargoScooter elettrico della Oxygen

1.5 Gli scenari di sviluppo della motorizzazione ecologica

Negli anni 90, in parallelo alla produzione di veicoli elettrici in piccola serie, le Case Automobilistiche, nell'ambito del Gruppo di interesse strategico EUCAR, iniziarono a studiare gli scenari di una futura motorizzazione ecologica e sostenibile, tenendo conto delle acquisizioni tecnologiche raggiunte nel campo della trazione elettrica e, d'altra parte, delle istanze sociali e di economia energetica fortemente presenti nei piani di sviluppo dei Governi e della Commissione Europea.

Vennero individuate e focalizzate le linee di ricerca e sviluppo impostate sulla trazione elettrica, relative ai sistemi ibridi e ai veicoli a celle a combustibile, e fu riaffermata l'opportunità di disporre di sistemi di accumulo ad alte prestazioni con caratteristiche diversificate, adatte rispettivamente a veicoli a batteria o a sistemi ibridi.

La tecnologia degli ibridi a motore termico, considerati sistemi per il breve-medio termine, finalizzati alla riduzione dei consumi, quindi della CO₂ e delle emissioni nocive, venne impostata dai costruttori automobilistici prevalentemente secondo architetture di sistema e strategie di gestione a supporto del motore termico con l'integrazione del contributo di una motorizzazione elettrica a batteria. Questa motorizzazione integrativa consente in fase di trazione il funzionamento del motore termico nelle condizioni più favorevoli come consumi ed emissioni e, in fase di frenatura, il recupero di energia elettrica in batteria. Il sistema così concepito è definito "mild hybrid" e consente di acquisire riduzioni di consumo e di emissioni di CO₂ dell'ordine del 30%, su un profilo di utilizzo urbano e suburbano, quale quello riprodotto dal ciclo di riferimento NEDC previsto dagli standard normativi.

Lo sviluppo dei veicoli ibridi è stato, nella seconda metà del scorso decennio, particolarmente significativo in Giappone, con la messa in produzione da parte di Honda e Toyota di vetture ibride, secondo sistemi diversi, ma impostati entrambi secondo il concetto sopra esposto: la Honda Civic, con sistema di tipo parallelo e la Toyota Prius, seguita dalla Lexus, con doppio azionamento elettrico e rotismo epicicloidale.



Fig. 1.7 - Toyota Prius modello 1997

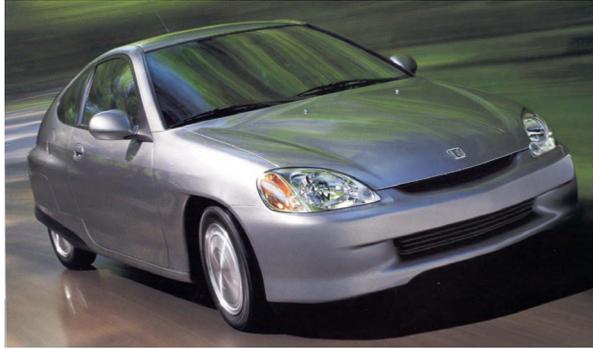


Fig. 1.8 - Honda Insight modello 1998

I veicoli ibridi sono oggi oggetto di sviluppo da parte di molte aziende produttrici di autoveicoli.

Le architetture di sistema considerate sono diverse e finalizzate alle applicazioni specifiche. Oltre alle architetture *parallelo* e *serie*, sono considerati i *sistemi compositi*, a più macchine elettriche e, per quanto si riferisce alla destinazione di uso, viene considerato il concetto di ibrido capace di percorrenze in puro elettrico, con alimentazione da sola batteria, quindi ad inquinamento locale nullo, ricaricabile dalla rete (ibrido “plug-in”).

I veicoli ibridi sono infine considerati una soluzione ponte verso i veicoli a celle a combustibile, che possono rappresentare un traguardo finale per veicoli totalmente ecologici e per uso generale, in particolare se alimentati ad idrogeno prodotto a partire da fonti rinnovabili.

A fronte di questa prospettiva, i veicoli ibridi, in particolare quelli ricaricabili da rete, anche per la loro versatilità di utilizzo, la flessibilità di progettazione di sistema finalizzabile all’uso specifico, la rifornibilità da fonti di energia diversificate, sia in termini di fonti primarie che di distribuzione infrastrutturata, possono costituire una soluzione ecologica sostenibile per veicoli di uso generale (senza limitazioni di autonomia).

La validità globale ecologica ed energetica di tutte le soluzioni tecnologiche sviluppate, basate sull’impiego totale o parziale della trazione elettrica, deve essere valutata considerando i settori e le modalità di uso e, in relazione a questi, l’efficienza energetica totale nella catena di elaborazione “dalla fonte primaria alle ruote”.

In quest’ottica è plausibile considerare il sistema di mobilità del futuro, su base ecologica sostenibile, come formato da un insieme di mezzi di trasporto diversificati obbedienti alle regole ambientali dettate dalla tipologia di uso, con una ripartizione condizionata dalle regole economiche di mercato e dai vincoli infrastrutturali, e nella misura consentita dalla riciclabilità a fine vita dei mezzi.

CAPITOLO 2

CLASSIFICAZIONE DEI VEICOLI IBRIDI

Giampiero Brusaglino

ATA – Associazione Tecnica dell'Automobile

L'integrazione delle due fonti di potenza finalizzate alla trazione, alimentate rispettivamente da combustibile fluido e da energia elettrica, può essere realizzata secondo diverse architetture di sistema e diverse strategie di gestione dei flussi di potenza, in dipendenza dalle finalità di uso.

Nella rassegna storica presentata nel preambolo, si sono messe in evidenza le circostanze e le esigenze di utilizzo per cui questa integrazione funzionale ha introdotto miglioramenti sui diversi fronti rispetto ai tipi di motorizzazione in atto. Di seguito si entrerà nel merito della classificazione dei sistemi di trazione ibridi.

2.1 Le architetture di base

La prima esigenza apparsa agli inizi della propulsione a motore termico è stata quella funzionale dell'incremento delle prestazioni, d'altronde rimasta sempre motivante anche per le applicazioni successive, assieme agli aspetti ecologici ed energetici.

La configurazione del sistema in questo caso è quella definita di tipo "parallelo", in cui le due sorgenti convogliano in parallelo (meccanico) i rispettivi flussi di potenza alle ruote (Fig. 2.1).

In questa configurazione il sistema di trazione elettrica fornisce assistenza funzionale al motore termico per ottimizzarne le prestazioni.

Questo tipo di supporto funzionale, oltre alle prestazioni, può essere utilizzato per la riduzione dei consumi e delle emissioni, grazie alla possibilità di complementare, per opera della trazione elettrica, la prestazione del motore termico in quelle condizioni di funzionamento non favorevoli a questi effetti. È parte di questa strategia il recupero di energia, che il sistema può operare in frenatura o in discesa, inviando energia di ricarica alla batteria, grazie alla reversibilità dell'azionamento elettrico.

La seconda opportunità, che poteva essere offerta dal sistema ibrido, è quella, già menzionata nel preambolo, di incrementare l'autonomia dei veicoli elettrici a batteria, mediante l'introduzione di un motore termico azionante un generatore elettrico, per l'alimentazione dell'azionamento di trazione, a supporto della alimentazione dalle batterie.

In questa configurazione, definita convenzionalmente "serie" (Figura 2.2), la potenza del motore termico perviene alle ruote attraverso la serie delle due macchine elettriche, generatore e motore di trazione.

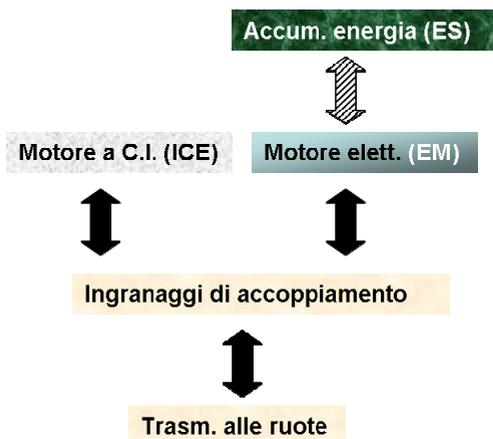


Fig. 2.1 - Schema di sistema ibrido con architettura di tipo “parallelo”¹

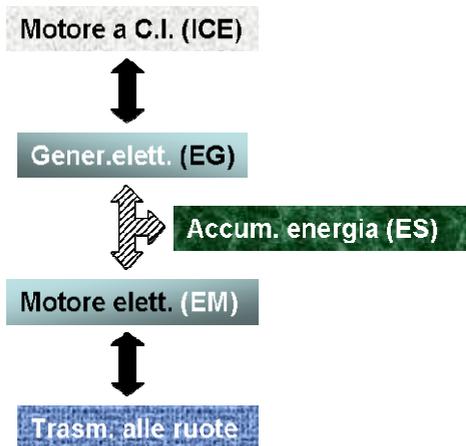


Fig. 2.2 - Schema di sistema ibrido con architettura di tipo “serie”

¹ Le frecce indicano un accoppiamento meccanico, quelle tratteggiate un accoppiamento elettrico

Il primo schema può essere pensato come derivato dal sistema convenzionale a motore termico, con assistenza operata dal sistema elettrico.

Il secondo schema può essere considerato come derivato dal sistema di trazione elettrico a batteria, con supporto energetico operato dal motore termico.

In entrambi i casi, il sistema si presta alla ottimizzazione a mezzo di un sistema di gestione globale dei flussi di potenza, agli effetti dei consumi e delle emissioni, considerati a partire dal combustibile usato per l'alimentazione del motore termico.

Ancora in entrambi i casi, con il dimensionamento appropriato dei componenti, il sistema consente il funzionamento della trazione in modo puro elettrico ed inoltre la ricarica della batteria anche dalla rete (veicolo elettrico ricaricabile dall'esterno “plug-in”).

2.2 La definizione del sistema

La scelta fra le due architetture di sistema, la tipologia ed il dimensionamento dei componenti sono determinati da diversi aspetti:

- il tipo di missione e di uso, incluse le specifiche di prestazione e le aree di utilizzabilità, con riferimento alla protezione ambientale e alle esigenze di autonomia;
- le prescrizioni regolamentate, incluse le emissioni nocive e di CO₂, il riciclo a fine vita con riguardo alla compatibilità ambientale;
- l'accettazione del mercato, incluso il costo di investimento e il costo operativo, i servizi di assistenza, la disponibilità delle infrastrutture;
- le qualità percepite dall'utente finale, quali il comfort, la guidabilità, i rifornimenti di energia e le relative infrastrutture.

Questi diversi aspetti presentano problemi di definizione di compromessi fra le diverse esigenze, ancor più se si intende considerare una flessibilità di uso del veicolo.

Tuttavia, in linea di massima, è possibile tratteggiare alcune tipiche applicazioni principali delle due configurazioni di sistema.

Il *sistema ibrido serie*, idealmente derivato dal veicolo elettrico a batteria, con l'integrazione di un gruppo di generazione elettrica con la funzione di estensore dell'autonomia, è particolarmente adatto a missioni di tipo urbano (tipicamente con funzionamento in puro elettrico) e suburbano (con l'ausilio del gruppo estensore dell'autonomia); quindi per impieghi con missioni programmabili e che prevedano la possibilità della ricarica delle batterie dalla rete (ibrido "plug-in").

Gli autobus ibridi urbani sono in genere equipaggiati con questo tipo di sistema. Fa eccezione il sistema Allison, sviluppato da General Motors per il mercato del Nord America.

Lo svincolo dalla trasmissione meccanica fra motore termico e ruote può consentire una gestione del gruppo di generazione più agevolmente finalizzata alla sua ottimizzazione agli effetti dei consumi e delle emissioni nelle condizioni operative caratterizzate da forti variazioni di potenza, come nel caso degli impieghi urbani. Prerogativa del sistema serie è inoltre la possibilità di un'agevole integrazione dei gruppi nel veicolo e di un facile isolamento acustico del motore termico.

Il *sistema ibrido parallelo*, idealmente derivato dal veicolo convenzionale, con l'integrazione di un sistema elettrico preposto al livellamento del carico del motore termico ed il conseguente incremento delle prestazioni transitorie di accelerazione e al recupero di energia in frenatura, meglio si adatta alle percorrenze a lungo raggio, nelle quali la potenza del motore termico può perve-

nire direttamente alle ruote senza la doppia trasformazione di energia meccanica in elettrica e viceversa nella marcia a regime livellato.

I due sistemi possono anche venire accomunati in una architettura combinata, che preveda all'occorrenza l'accoppiamento diretto del motore termico con la trasmissione, utilizzando, a scapito di una maggior complessità, le opportunità di entrambe le architetture e acquisendo una più ampia flessibilità di utilizzo in condizioni ottimizzate (Fig. 2.3).

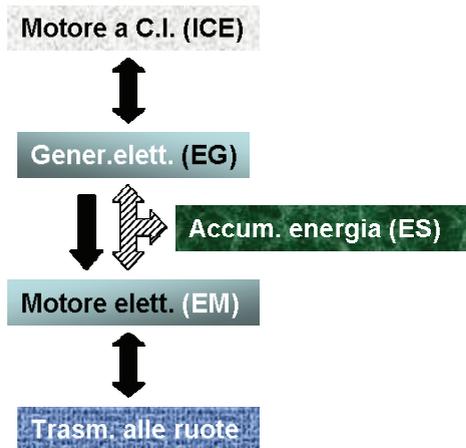


Fig. 2.3 - Schema di sistema ibrido con architettura combinata

Come si evince da queste indicazioni generali, il sistema ibrido è costituito fondamentalmente da motore termico, elementi di trasmissione meccanica, due macchine elettriche reversibili, con relativi convertitori elettronici ed un sistema di accumulo.

Questi componenti di base possono essere fra loro interconnessi in diversi modi, dando luogo a sistemi misti o combinati, come già sopra accennato, per utilizzare al meglio, a seconda dell'uso tipico, le prerogative del sistema serie e del sistema parallelo.

In particolare si possono impostare sistemi a ripartizione di potenza, introducendo uno o due rotismi epicicloidali (Figg. 2.4 e 2.5) che, attraverso la gestione della potenza delle macchine elettriche, possono realizzare la funzione del cambio continuo di velocità (es. Toyota, General Motors, DaimlerChrisler, BMW, Renault).

Il dimensionamento dei componenti di un sistema ibrido può dar luogo a varie soluzioni, con prestazioni operative diverse, adatte a varie tipologie di impiego.

La Fig. 2.6 illustra schematicamente queste varie combinazioni, in relazione con il dimensionamento delle parti del sistema e riporta anche le denominazioni comunemente accettate delle diverse tipologie di veicoli ibridi classificate in base al "peso" relativo della parte elettrica e di quella termica.

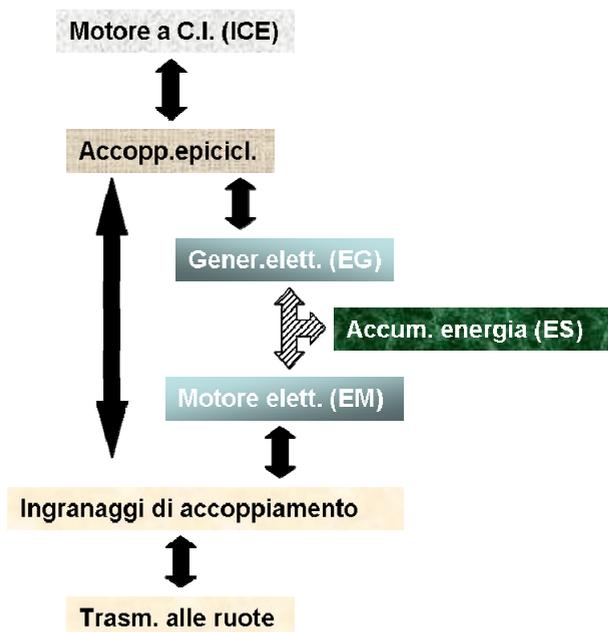


Fig. 2.4 - Schema di sistema ibrido con architettura mista, a ripartizione di potenza con un rotismo epicicloidale (Toyota)

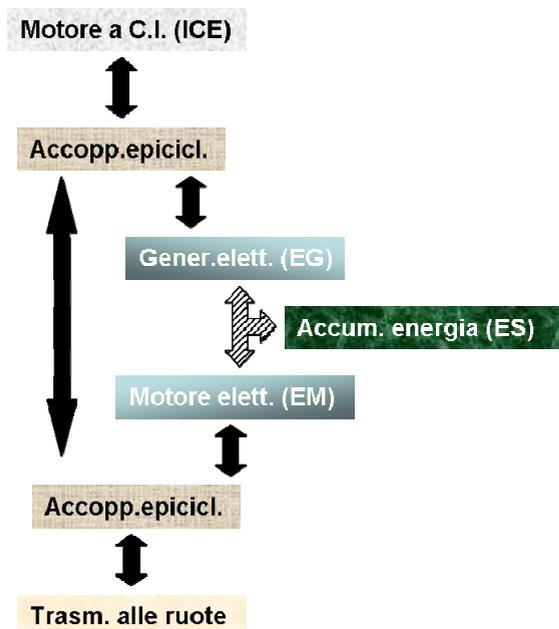


Fig. 2.5 - Schema di sistema ibrido con architettura mista, con due rotismi epicicloidali (General Motors, DaimlerChrysler, BMW, Renault)

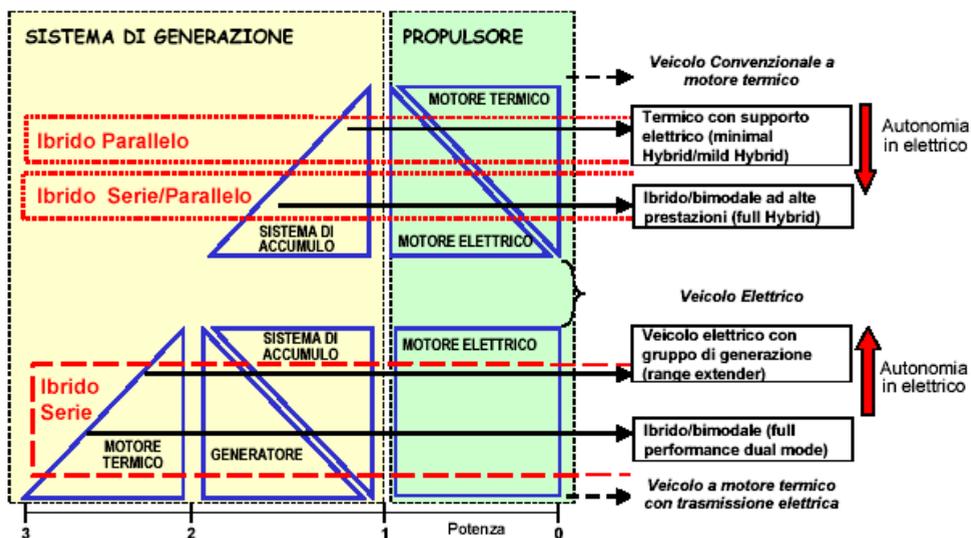


Fig. 2.6 - Tipologie di sistemi ibridi

Per mezzo di strategie finalizzate alla gestione dei flussi di potenza di questi sistemi integrati, è possibile ottimizzare la prestazione operativa ed energetica del sistema e ridurre di conseguenza l'emissione di CO₂.

Il risultato risulta particolarmente apprezzabile nell'esercizio urbano, in cui esistono forti variazioni di potenza richiesta alle ruote.

In sintesi, il beneficio energetico in termini di riduzione dei consumi consegue fondamentalmente da tre fattori:

- il recupero di energia elettrica nella batteria in frenatura e in discesa operato dal motore di trazione funzionante come generatore;
- il livellamento del carico del motore termico, che consente di condizionare il funzionamento di questo nelle aree di alta efficienza, grazie al complemento di potenza dato dal sistema elettrico. In particolare il motore termico viene disattivato automaticamente dal sistema di gestione durante i rallentamenti e le soste;
- la possibilità della ricarica della batteria dalle rete, nei sistemi "plug-in", che comporta un risparmio globale di energia riferito alla fonte, oltre ad un risparmio di costo al rifornimento.

Il beneficio dal punto di vista ambientale deriva dai seguenti fattori:

- la riduzione dei consumi di combustibile, che comporta una riduzione diretta della emissione di CO₂, responsabile dell'effetto serra;
- la flessibilità di condizionamento del motore termico agli effetti delle emissioni, oltre che del consumo;
- la possibilità di funzionamento con alimentazione dalla sola batteria, con motore termico spento, quindi con emissioni acustiche ridotte e con emissioni inquinanti locali nulle;
- il rifornimento di energia operato, nei sistemi "plug-in", dalla rete elettrica, si riflette su una minor emissione globale sia di CO₂, che di emissioni inquinanti.

Il beneficio di carattere operativo deriva da:

- elevate prestazioni in accelerazione, ottenibili senza sensibile aggravio dei consumi e con una motorizzazione termica di potenza anche ridotta, grazie al contributo complementare della motorizzazione elettrica.

Queste prerogative sono riscontrabili con tutti i tipi di motori termici impiegati nel sistema ibrido.

CAPITOLO 3

UNA ROAD-MAP PER I VEICOLI ELETTRICI ED IBRIDI

Giampiero Brusaglino

ATA – Associazione Tecnica dell'Automobile

Secondo una linea di pensiero generalmente condivisa, un sistema di trasporto orientato alla salvaguardia dell'ambiente e all'utilizzo razionale dell'energia e delle sue fonti primarie, può trovare l'ottimizzazione di questi obiettivi attraverso l'adozione di soluzioni veicolari diversificate, finalizzate all'utilizzo nelle diverse tipologie di missione e introdotte secondo criteri che ne riconoscano la maturità tecnologica, la sostenibilità industriale e del pratico utilizzo. Uno scenario relativo all'introduzione delle diverse soluzioni tecnologiche è rappresentato in Fig. 3.1.

Sull'asse orizzontale sono indicati i tempi in cui si prevede che le diverse tecnologie possano essere rese disponibili per l'applicazione pratica in base alla loro maturità tecnologica convalidata operativamente e alla comprovata sostenibilità industriale.

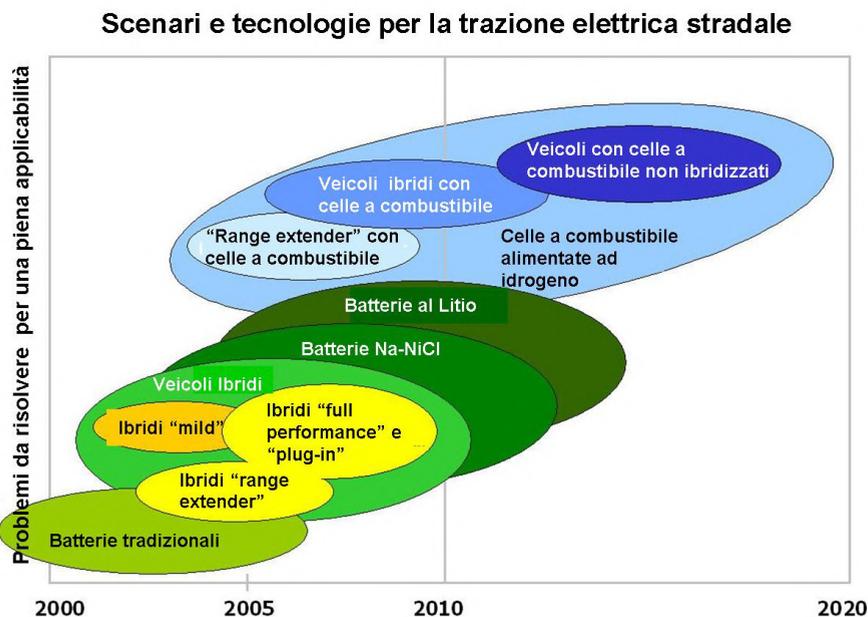


Fig. 3.1 - Scenari e tecnologie per la trazione elettrica stradale

Sull'asse verticale è indicato qualitativamente l'impegno necessario per portare a compimento questa maturità tecnologica e sostenibilità operativa.

Le aree temporali sono intese come inizio della possibile diffusione della tecnologia, la cui entità di penetrazione sarà poi condizionata dalle imposizioni legislative e dalle regole di mercato.

Le caratteristiche prestazionali e operative dei vari tipi di veicoli sono in sintesi richiamate di seguito.

3.1 Veicoli elettrici a batteria

La tecnologia dei veicoli elettrici, sviluppata a partire dagli anni 70 e convalidata negli anni 90 con la messa in produzione da parte di diversi costruttori e con la messa in esercizio di flotte di veicoli di vari utilizzatori, per servizi diversificati, consente la realizzazione di mezzi per trasporto di persone e di merci con prestazioni adeguate alla tipologia del traffico urbano e suburbano.

Con le batterie del tipo al piombo o al nichel-cadmio, i veicoli consentono autonomie dell'ordine di 80-100 km. Con le batterie di nuovo tipo, quali i sistemi di accumulo al sodio-cloruro di nichel o al litio, si possono ottenere autonomie di 140-180 km. Questi tipi di sistemi di accumulo sono già applicati su contingenti di veicoli in circolazione.

Secondo studi internazionali, basati sull'analisi dei tipi di utenza e di missioni operative, il potenziale di applicazione dei veicoli elettrici con batterie della tecnologia attuale, in sostituzione di equivalenti veicoli convenzionali, è stimabile dal 12 al 20%.

Le categorie di utenza includono missioni private, servizi di pubblica utilità, servizi di consegna merci e posta, trasporto di persone e merci per imprese pubbliche e servizi municipali. Si citano, come particolarmente significativi, i sistemi di noleggio e di servizio a domanda in atto, da tempo in città italiane ed estere (es.: Reggio Emilia, La Rochelle).



Fig. 3.2 - Veicoli elettrici per servizi urbani (Reggio Emilia, Porter della Micro-Vett)

Per i veicoli del più lungo termine, con batterie di nuovo tipo, la percentuale di sostituibilità può essere stimata fino al 35%.

Nel settore dei mezzi per trasporto pubblico o collettivo sono già in servizio minibus e autobus di medie dimensioni, equipaggiati con batterie della attuale generazione, che svolgono il servizio giornaliero in aree urbane con percorrenze dell'ordine di 70-90 km. Sono in atto soluzioni per incrementare la percorrenza, a mezzo di ricariche parziali delle batterie, recentemente realizzate con sistemi di trasferimento dell'energia dall'infrastruttura per via induttiva.

I problemi che si frappongono fra la disponibilità tecnologica e una larga diffusione dei veicoli elettrici sono in primo luogo quelli connessi con il loro costo iniziale, che risente del non favorevole effetto di scala di fabbricazione, per i limitati volumi che vengono prodotti.

Tuttavia, le percentuali di potenziale applicazione sopra indicate possono condurre a situazioni di costo globale sostenibili, considerando il vantaggio del costo operativo (energia e manutenzione) del veicolo elettrico rispetto al veicolo convenzionale.

Un altro aspetto è quello della infrastruttura per la ricarica della batteria.

Anche se per i veicoli di classe piccola e media, quali quelli per uso privato, questa infrastruttura consiste soltanto in una presa di corrente del tipo in uso nelle utenze domestiche, la sua disponibilità diffusa, nelle zone appropriate, costituisce una voce di costo e può dar luogo ad un problema di ubicazione.



Fig. 3.3 - Distribuzione merci con veicoli elettrici (Progetto EC ELCIDIS)

Da ultimo va considerato il tempo necessario per la ricarica (anche se normalmente effettuata di notte), che è dell'ordine di 6-8 ore e che, per una ricarica completa, può essere considerato un vincolo.

Per quanto si riferisce all'infrastruttura di generazione e distribuzione primaria dell'energia elettrica, il mantenimento di quella già esistente è considerato sufficiente, tenendo conto dell'utilizzo di energia per le ricariche, che avverrebbe in genere nelle ore notturne, in corrispondenza delle valli di carico richiesto dalle utenze normali.

3.2 Veicoli elettrici con gruppo di generazione per l'estensione dell'autonomia

L'utilizzabilità dei veicoli elettrici in zone suburbane, in percorrenze dell'ordine dei 200-250 km, può essere assicurata mediante l'integrazione del sistema di accumulo con un gruppo di generazione motore termico-generatore elettrico, di piccola potenza, attivabile per le missioni eccedenti l'autonomia propria della batteria.

Per minimizzare l'impatto ambientale del gruppo a motore termico, il funzionamento di questo, preposto alla generazione di energia, ma svincolato dall'impegno diretto per la trazione, viene regolato a regimi ottimizzati agli effetti emissioni e consumi ed anche agli effetti rumorosità, specialmente se accompagnato da un adeguato isolamento acustico (di agevolata installazione data l'indipendenza meccanica del gruppo).

Il sistema si configura come un ibrido con architettura serie, ricaricabile dalla rete (plug-in) ma, all'occorrenza, anche autonomo.

Questo tipo di sistema è già stato applicato nello scorso decennio a veicoli elettrici di produzione (es. Renault Kangoo), è stato generalmente adottato per la trazione sugli autobus urbani ibridi (es. IVECO) ed è stato recentemente fatto proprio da General Motors con la Chevrolet Volt.



Fig. 3.4 - Autobus ibrido IVECO Europolis

Il veicolo elettrico “range extender” può soddisfare i requisiti di missioni in aree ad ambiente protetto con i vantaggi energetici e di costo operativo dei veicoli a batteria e, nel contempo, assicurare l'utilizzabilità, con minimo impatto ambientale, per impieghi con requisiti di autonomia eccedenti i limiti naturali della batteria.

Il concetto di gruppo di alimentazione addizionale complementare al sistema di alimentazione elettrica principale è adottato anche sui filobus, che devono poter operare anche al di fuori della linea di alimentazione (filobus bimodale)

Il gruppo di alimentazione ausiliario può essere costituito da un gruppo motore termico-generatore o da una batteria di accumulatori elettrochimici.

3.3 Veicoli ibridi a motorizzazione elettrica ridotta (ibridi minimi e mild hybrid)

Il sistema si configura come ibrido con architettura parallelo o composita, in cui la funzione del sistema di trazione elettrica è di dare supporto al motore termico per complementarne le prestazioni, consentirne il funzionamento con minimi consumi ed emissioni ed effettuare la frenatura a ricupero di energia.

La motorizzazione elettrica è relativamente ridotta sia in termini di potenza che in termini di energia, essendo sostanzialmente destinata ad integrare il motore termico nelle sole fasi in cui l'efficienza e le emissioni di quest'ultimo sono particolarmente sfavorevoli, come alle partenze da fermo o in presenza di forti prelievi di potenza.

L'autonomia in puro elettrico è assai limitata, se non trascurabile.

Questo tipo di sistema si presenta come migliorativo della motorizzazione convenzionale a motore termico, destinato ad un impiego generale, ad eccezione delle aree ad ambiente protetto.

In quest'ottica un sistema di arresto e riavviamento del motore termico (stop-start) operato da un motore elettrico che utilizzi l'energia di frenatura può anche essere considerato un sistema ibrido (micro hybrid).

3.4 Veicoli ibridi a piene prestazioni (full performance hybrid) e ricaricabili da rete (plug-in hybrid)

Un dimensionamento della parte elettrica rilevante consente di realizzare un veicolo “full hybrid”, in grado di fornire prestazioni sia in ibrido che in puro elettrico per una autonomia di alcune decine di chilometri.

Un'autonomia significativa in puro elettrico legittima la possibilità e l'opportunità di ricaricare la batteria dalla rete elettrica, con vantaggi ecologici, energetici ed economici.

Si perviene così al concetto di ibrido ricaricabile dalla rete elettrica (plug-in).

Questo tipo di veicolo nel funzionamento su lunghe percorrenze beneficia dei vantaggi della motorizzazione termica integrata con quella elettrica (consumi ed emissioni ridotte specialmente in condizioni di richiesta di potenza variabile); nelle missioni di tipo urbano si presenta come veicolo ad emissioni nulle e beneficia della massima efficienza energetica ed ambientale offerta dalla ricarica dalla rete. Concrete possibilità per questa tipologia di sistema sono attualmente offerte dalla recente disponibilità di batterie ad elevate prestazioni.

Per questo tipo di applicazione la batteria deve a un tempo offrire buone caratteristiche di potenza per soddisfare le richieste prestazionali del sistema ibrido, ma anche di energia, per assicurare una autonomia in puro elettrico secondo le specifiche di progetto.

Secondo l'EPRI (Electric Power Research Institute, USA), gli ibridi "plug-in" potrebbero arrivare a coprire il 15-30% dei veicoli utilizzati nei grandi agglomerati urbani statunitensi, utilizzando per l'85% del loro fabbisogno energetico la rete elettrica.

I veicoli ibridi ricaricabili da rete, nella loro connotazione per uso generale, ma con opzione privilegiata per uso come veicolo elettrico, appaiono particolarmente adatti all'impiego come minibus urbani e suburbani o come mezzi per trasporto merci o promiscuo. Categorie particolari potrebbero essere quelle dei taxi e dei veicoli per distribuzione merci dagli interporti ai centri urbani.

Esistono già realizzazioni sperimentali o pilota nel campo dei veicoli per trasporto leggero di persone e merci (Micro-Vett in Italia, ad esempio).

Le verifiche sul campo da effettuare sono essenzialmente quelle a carattere di opportunità di impiego e di sostenibilità industriale, per definire i criteri di progetto del sistema in relazione ai requisiti operativi.

3.5 Veicoli elettrici a celle a combustibile

I veicoli elettrici utilizzando per la trazione celle a combustibile alimentate a idrogeno, dal punto di vista dell'utilizzo rappresentano un sistema ideale per la loro generale utilizzabilità, nei limiti sufficientemente ampi delle autonomie ottenibili fra due successivi rifornimenti, peraltro effettuabili in tempi e con modalità affrontabili ed inoltre per la assenza di emissioni nell'ambiente in cui operano.

I problemi da affrontare per una diffusione significativa della soluzione sono quelli di una convalida delle tecnologie veicolari, dei costi (dipendenti anche dall'effetto di scala produttiva), ma soprattutto della disponibilità adeguatamente distribuita di idrogeno e della relativa produzione (con la scelta appropriata delle fonti primarie in relazione all'efficienza e all'impatto ambientale globale).

Dal punto di vista di sistema, la soluzione in genere adottata è quella di una architettura ibrida, in cui l'erogazione elettrica dell'unità a celle a combustibile è integrata con quella di una unità di accumulo (batteria o supercondensatore) finalizzata all'ottimizzazione globale dell'efficienza del sistema, incluso il ricupero di energia in frenatura o in discesa.

In modo analogo a quanto presentato a proposito dei sistemi ibridi a motore termico, le soluzioni possono essere diversificate, tenendo conto dell'impiego tipico, dell'aspetto economico e della disponibilità dell'infrastruttura per il rifornimento. specie in relazione al tempo di introduzione, Si possono così considerare veicoli elettrici a batteria con estensore dell'autonomia realizzato con una unità a celle a combustibile, per giungere a sistemi con alimentazione prevalente a celle a combustibile, conservando comunque l'opzione della ricarica della batteria dalla rete, quale procedura che consente i massimi benefici energetici ed economici globali.

3.6 Conclusione

L'impostazione strategica di un sistema di trasporto, che intenda considerare in profondità gli aspetti energetici ed ambientali connessi con l'uso dei mezzi nei vari segmenti di impiego e con la disponibilità delle fonti di energia, può avvalersi quindi di una scelta fra molte tecnologie, di cui si sono tratteggiate più sopra le connotazioni principali e le prevedibili disponibilità.

Una possibile definizione dei campi di applicazione delle diverse tecnologie, in linea con quanto detto, è illustrata in Fig. 3.5, che richiama ed integra gli scenari presentati in Fig. 3.1.

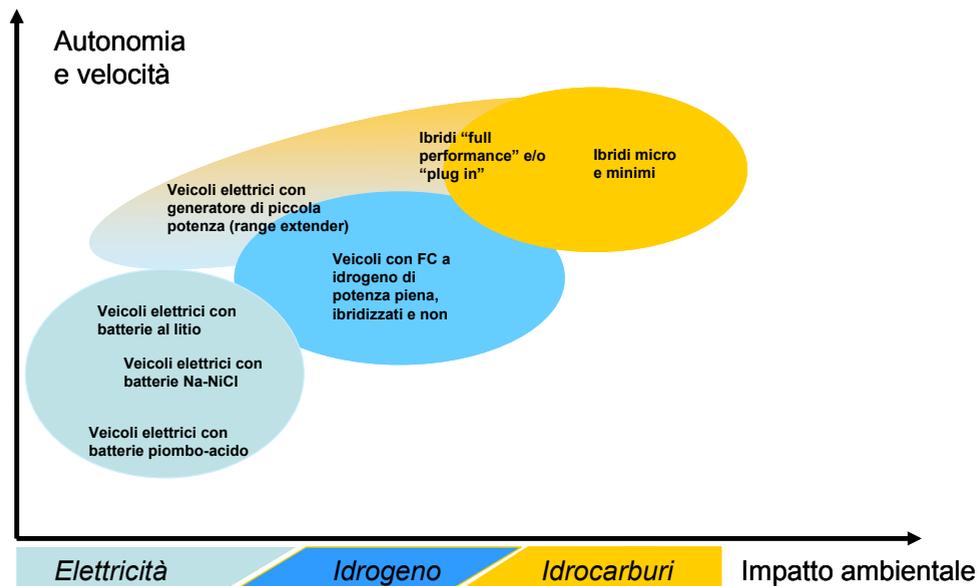


Fig. 3.5 - Scenari e tecnologie per la trazione elettrica stradale

In ascisse sono rappresentati tre sistemi di accumulo di energia a bordo del veicolo ad impatto ambientale crescente, l'accumulo elettrico, quello a mezzo idrogeno, un vettore energetico derivabile da molte fonti primarie, e per ultimo quello attualmente più diffuso, l'accumulo chimico con derivati degli idrocarburi. In ordinata, velocità ed autonomia del veicolo, tra le principali prestazioni richieste ad un sistema di trasporto.

La scelta delle diverse tipologie di accumulo è quindi funzione della missione del veicolo, attraverso un diverso peso dato agli obiettivi concorrenti di impatto ambientale e prestazionali.

Come può vedersi, comunque, la tecnologia dell'ibridazione è trasversale rispetto al tipo di accumulo considerato, potendo andare da applicazioni "range extender", dove nell'accumulo di bordo è prevalente la componente elettrica, ai micro ibridi, dove la funzione dell'accumulo elettrico è consentire il riavvio del motore ad ogni temporaneo spegnimento, insieme a (limitate) possibilità di recupero energetico in frenata.

Concludiamo con una speranza ed un auspicio, che in prospettiva si possa vedere sulle nostre strade un numero sempre crescente di veicoli ad impatto ambientale ridotto o se possibile nullo, dove anche l'energia necessaria alla ricarica delle batterie o alla produzione dell'idrogeno provenga da fonti rinnovabili¹, come ad esempio nel prototipo Phylla (Fig. 3.6), realizzato dal Centro Ricerche Fiat.



Fig. 3.6 - Phylla, veicolo elettrico solare realizzato dal Centro Ricerche Fiat

¹ Si veda a tale riguardo, in questo stesso libro, il Cap.18, a cura dell'Università di Salerno.

CAPITOLO 4

COSTI E BENEFICI IN CAMPO ENERGETICO ED AMBIENTALE DELLA TRAZIONE ELETTRICA STRADALE

Pietro Menga

CEI-CIVES – Commissione Italiana Veicoli Elettrici Stradali a batteria, ibridi e a celle a combustibile

4.1 Confronto ambientale delle diverse tecnologie in condizioni di riferimento standardizzate: emissioni di gas serra

4.1.1 “Cicli” stradali di riferimento

Consumi ed emissioni dei veicoli dipendono fortemente dalle loro condizioni di impiego. Per queste ragioni, per consentire un confronto praticabile, la normativa tecnica, fatta propria dalle Direttive UE per l’omologazione dei veicoli, definisce dettagliatamente le condizioni di riferimento standardizzate in base alle quali debbono essere condotte le rilevazioni di consumi ed emissioni.

La Direttiva base di riferimento per gli autoveicoli è la 70/220/EEC, ed il ciclo stradale standardizzato è il NEDC (New European Driving Cycle), indicato in Fig. 4.1, composto da una prima parte che simula l’uso cittadino (sottocicli EDC1-EDC4, uguali fra loro), ed una seconda parte (EUDC) che simula l’uso extraurbano.

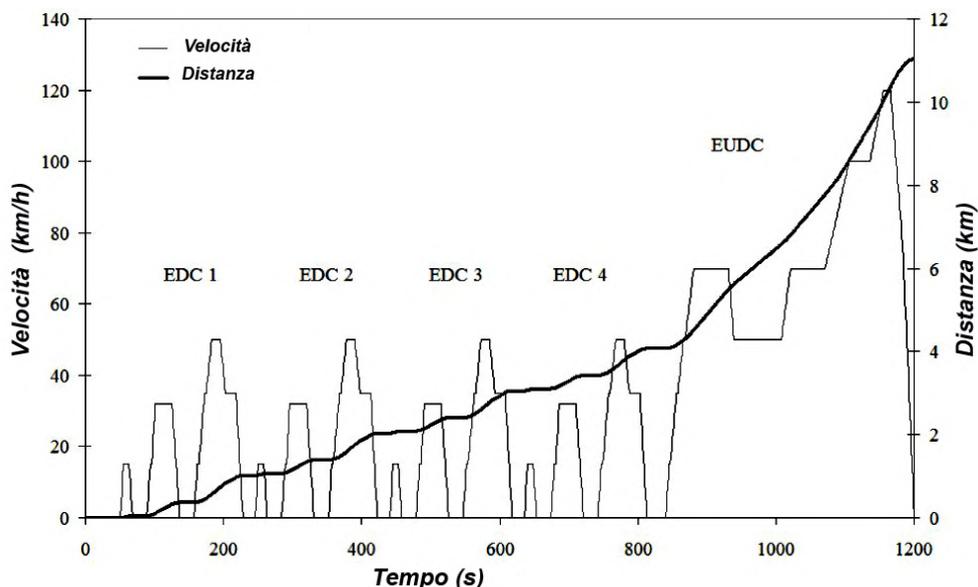


Fig. 4.1 - Grafico del ciclo stradale standardizzato NEDC utilizzato per la rilevazione di consumi ed emissioni di autoveicoli ai fini della loro omologazione nella UE

4.1.2 Emissioni di gas serra delle autovetture endotermiche al 2010, sul ciclo NEDC

Valutazioni approfondite sulle tecnologie disponibili ad un orizzonte di medio termine (2010-2015) sono state fatte dallo studio Comunitario [1], condotto da EUCAR (*European Council for Automotive R&D*), CONCAWE (*The Oil Company European Association for Environment*) e JRC (*Joint Research Centre della UE di Ispra*). Tale studio riporta le emissioni complessive “dal pozzo alle ruote”, comprensive dell’intera catena energetica e viene nel tempo costantemente aggiornato.

I veicoli considerati sono le autovetture diesel, a benzina, a metano, e le ibride mild/minimali. Le principali prestazioni assunte dallo studio sono: autonomia 600 km, velocità 180 km/h, accelerazione da 0 a 50 km/h in 4 secondi. È implicito che tali elevate prestazioni, in particolare l’alta autonomia, escludano di fatto dal confronto i veicoli a batteria.

La Tab. 4.1 sintetizza alcuni risultati elaborati a partire dalle conclusioni del citato lavoro [1].

Nelle versioni puramente endotermiche il miglioramento delle emissioni rispetto ai veicoli delle generazioni tecnologiche oggi in circolazione risulterebbe compreso tra il 6% e il 16% (il valore più modesto riguarda i diesel). Per le versioni ibride, il miglioramento salirebbe al 23-33%, evidenziando le forti potenzialità dell’elettrificazione.

Tab. 4.1 - Emissioni di gas serra delle autovetture endotermiche con tecnologia 2010

| <i>Tipologia</i> | <i>Emissioni di CO₂eq (grammi/km)</i> |
|------------------|--|
| Diesel | 160 |
| Benzina | 170 |
| Metano | 150 |
| Ibridi diesel | 130 |
| Ibridi benzina | 140 |
| Ibridi metano | 120 |

Nota: le emissioni standardizzate al 2002 sono: diesel 170 g/km; benzina 195 g/km; metano 180 g/km

4.1.3 Emissioni di gas serra dei veicoli a batteria al 2010, sul ciclo NEDC

4.1.3.1 Emissioni del sistema di generazione elettrico

Come noto le emissioni dei veicoli elettrici in sé sono totalmente nulle, ma vanno considerate le emissioni derivanti dalla produzione dell'energia elettrica, che dipendono dal mix di fonti energetiche usate dagli impianti di generazione e dall'efficienza di questi ultimi.

Specificatamente, è da determinare la quantità di inquinanti mediamente emessi per ogni kWh utilizzato ai consumi finali (nel caso in oggetto la ricarica delle batterie).

Nell'anno 2001 vi è stata da parte del sistema di generazione elettrico nazionale una emissione di gas serra di 140 Mt CO₂eq a fronte di una immissione complessiva in rete di circa 298 TWh elettrici, con una media di 470 grammi di CO₂eq per ogni kWh reso ai consumi finali.

Il margine di miglioramento per gli anni a venire è assai elevato, per una serie di importanti evoluzioni in atto:

- il ricorso, per la produzione dell'energia elettrica, a fonti primarie sempre meno inquinanti. Le previsioni a medio termine, espresse dal *Piano Nazionale di Riduzione di Gas Serra* [2] sono di un incremento del gas dall'attuale 35% al 52%; un decremento dell'olio combustibile dal 30% al 10%; un incremento delle fonti rinnovabili dal 3,3% al 7,8%. In controtendenza, per motivazioni economiche, un incremento del carbone dal 9% al 12%, peraltro utilizzabile su impianti moderni con emissioni ridotte. Più recentemente, è stato annunciato come noto un graduale ricorso al nucleare, che tuttavia non sposterebbe il quadro complessivo nel breve termine. Complessivamente, sempre secondo tali previsioni, la produzione termoelettrica assommerà a circa 245 TWh, pari al 67% della richiesta totale alla rete di 364 TWh per i consumi finali ⁽¹⁾;
- l'introduzione di dette nuove tecnologie per la generazione termoelettrica a carbone "pulito", con concentrazioni inquinanti largamente al di sotto degli attuali limiti di legge (100 mg/Nm³ per l'SO₂ contro il limite di 400; 150 mg/Nm³ per gli NO_x contro i 200 di legge; 20 mg/Nm³ di polveri contro i 50 di legge [3]);
- i nuovi vincoli posti dalla proposta di Direttiva UE 98/0225 sulle centrali termoelettriche, che prevede quali limiti 0,60 g/kWh per gli NO_x, 0,50 g/kWh per l'SO₂, e 0,09 g/kWh per le polveri; valori che, peraltro, sono di fatto mediamente superiori alle effettive emissioni di molti impianti italiani realizzati negli ultimi anni;

(1) A tali consumi concorrerebbe energia elettrica importata dall'estero per circa 60 TWh, in prevalenza da fonte nucleare quale quella francese, quindi priva di impatto sulle emissioni atmosferiche del settore.

- la continua introduzione di nuovi impianti di generazione a cicli combinati, con rendimento energetico ed emissioni considerevolmente migliori di quelli degli impianti tradizionali, e riduzione delle emissioni di CO₂ dell'ordine del 40% rispetto agli impianti tradizionali ([4, 5, 6]).

L'effetto congiunto di questa evoluzione è, nelle previsioni del citato *Piano Nazionale di Riduzione di Gas Serra*, di un consumo finale di energia elettrica di 364.000 GWh cui corrisponderebbero 124 Mt di CO₂eq, con una emissione media di 340 grammi di CO₂eq per ogni kWh reso ai consumi finali.

Tab. 4.2 - Rendimento delle fasi “dal pozzo alla centrale elettrica”, di varie fonti energetiche

| | <i>Estrazione</i> | <i>Trasporto</i> | <i>Trattamento</i> |
|---------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| Idroelettrico | 1 | 1 | 1 |
| Petrolio | 0,95 | 0,98 | 0,90 |
| Gas naturale | 0,95 | 0,97 | 0,97 |
| Combustibili solidi | 0,98 | 0,98 | 1 |
| Geotermico | 1 | 1 | 1 |

Fonte: elaborazioni da [7]

È infine da considerare che la “preparazione” dei combustibili utilizzati dalle centrali termiche (estrazione, trasporto, raffinazione, distribuzione all'impianto di generazione elettrica) a partire dalla fonte primaria implica a sua volta altre emissioni nell'atmosfera. Tali perdite energetiche sono contenute nel 10-15% secondo la fonte energetica [7, 8, 9], e sono quindi da incrementare in tale misura le emissioni complessive di gas serra della generazione termoelettrica. Considerato che quest'ultima costituirebbe all'orizzonte di medio termine il 67% circa della produzione elettrica nazionale, le corrispondenti emissioni specifiche di CO₂eq “dal pozzo all'energia destinata agli usi finali” pesando il contributo di ciascuna fonte concorrente al mix previsto, sono complessivamente da incrementare del 7,4% circa, salendo in conclusione da 340 a circa 365 gCO₂eq per ogni kWh reso ai consumi finali.

4.1.3.2 Consumi dei veicoli a batteria

Una volta definite le emissioni della generazione elettrica, per giungere alla determinazione delle emissioni connesse con la ricarica delle batterie è necessario valutare i consumi dei veicoli elettrici. Allo stato della tecnologia, i consumi tipici su percorsi urbani reali dei veicoli elettrici equipaggiati con batterie tradizionali (piombo/acido e nichel/cadmio), al momento ancora i più diffusi, si collocano tipicamente, sui 150-200 Wh assorbiti dalla rete per la ricarica delle batterie, per ogni chilometro percorso e per ogni tonnellata di peso del veicolo stesso [10, 11, 12].

Consumi “dal serbatoio alle ruote” così modesti in rapporto a quelli dei veicoli termici sono dovuti, come è noto, sia all’elevata efficienza della motorizzazione elettrica, sia al recupero in frenatura di parte dell’energia cinetica del veicolo, che nell’uso cittadino può costituire una frazione considerevole di quella complessivamente spesa alle ruote.

I consumi su ciclo standardizzato sono naturalmente inferiori ai succitati consumi su strada. Ad esempio il furgone elettrico Citroën *Berlingo II*, del peso a carico di 1900 kg ed equipaggiato con batterie nichel/cadmio, è stato omologato sul ciclo urbano europeo per un consumo di 275 Wh/km, ovvero circa 140 Wh/(t*km), e su ciclo extraurbano per circa 130 Wh/km [13].

Partendo da questi dati, e anche nell’ipotesi cautelativa che i possibili ulteriori miglioramenti tecnologici di questi veicoli siano limitati alla sola batteria, la sostituzione dell’attuale nichel/cadmio (con rendimento energetico di carica/scarica di circa il 60%) con una batteria di tipo avanzato (litio/ioni o anche sodio/cloruro di nichel, entrambe con rendimento superiore al 90%), porterebbe ad una riduzione dei consumi su ciclo urbano (quelli che a noi qui più interessano) a livelli di circa 100 Wh/(t*km). Un’autovettura a batteria del peso di 1200 kg consumerebbe quindi dalla rete circa 120-130 Wh/km.

4.1.4 Emissioni di gas serra del veicolo a batteria

In conclusione, si può assumere per il medio termine una tecnologia dei veicoli a batteria caratterizzata, per i percorsi standardizzati urbani, da un consumo attorno ai 130 Wh/km (nel caso di un’autovettura), con emissioni contenute in 50 grammi/km di CO₂eq.

Da notare che già oggi, con emissioni da generazione elettrica attorno ai 470 gCO₂eq/kWh, le emissioni chilometriche per un’autovettura elettrica (consumo 180-200 Wh/km) risultano contenute entro i 90 g/km, largamente inferiori a quelle di qualunque motorizzazione endotermica presente o futura. Va anche considerato che una frazione rilevante delle ricariche verrebbe certamente effettuata nottetempo, nelle valli del diagramma di carico, quando l’energia elettrica è prodotta dalle centrali elettriche di base che presentano rendimento ed emissioni più favorevoli: le emissioni di CO₂ sopra indicate sono quindi da ritenersi come un limite superiore.

4.1.5 Emissioni di gas serra dei veicoli ibridi “plug-in” al 2010, sul ciclo NEDC

Le analisi di EUCAR-CONCAWE-JRC di cui al paragrafo 4.1.2 si sono limitate ai soli veicoli ibridi a basso livello di elettrificazione (i soli considerati in tale contesto, che prendeva in esame esclusivamente veicoli con costi allineati alle aspettative del mercato consolidato).

Per i veicoli *full-hybrid plug-in* la valutazione ambientale ed energetica è più complessa, dipendendo fortemente sia dal livello di “elettrificazione” adottato (quantità di batterie ed entità delle possibili percorrenze a emissioni zero), sia dal tipo di gestione attuata durante il funzionamento in ibrido (mantenimento del livello medio di scarica della batteria come negli ibridi minimali, oppure sfruttamento a fondo della batteria per ottenere un miglior apporto energetico e ambientale del sistema, riducendo però la possibilità di funzionamento in puro elettrico).

Diversi studi sulle caratteristiche energetiche e ambientali da attendersi per gli ibridi plug-in sono stati condotti negli USA, soprattutto dall’EPRI – Electric Power Research Institute [14, 15]. Sotto l’ipotesi di una distribuzione di percorrenze urbane ed extraurbane analoga alla media statunitense, per i plug-in con alta autonomia in “puro elettrico” (60 miglia) le emissioni di gas serra, col mix di fonti primarie USA, risulterebbero grosso modo dimezzate.

Un’analisi parametrica più centrata sulla situazione europea [16] è stata condotta in ambito Eurelectric (la struttura di ricerca delle *utilities* elettriche europee) dall’istituto di ricerca francese INRETS, determinando consumi ed emissioni in funzione del dimensionamento e delle condizioni operative dei veicoli, nonché del mix di fonti primarie utilizzate per la produzione dell’energia elettrica. Su quest’ultimo punto lo studio ha parametrizzato emissioni di CO₂ che vanno dai 40 g/kWh per la generazione elettrica francese (basata sul nucleare) ai 600 g/kWh di impianti termoelettrici tradizionali.

Alcuni risultati, sintetizzati in Fig. 4.2 e relativi al caso di percorrenze di 75, 100 e 150 km effettuate in funzionamento ibrido con scarica graduale della batteria, evidenziano abbattimenti di emissioni, rispetto al caso di un veicolo puramente endotermico a benzina, che vanno dal 5% al 92%. Riportati alla situazione italiana del prossimo futuro, con emissioni di CO₂eq di 365 g/kWh, tali abbattimenti si collocherebbero tra il 43% (percorrenza 75 km) e il 33% (percorrenza 150 km), ovvero a emissioni dell’ibrido plug-in di 120-140 grammi di CO₂eq/km contro i 215 g/km del veicolo endotermico equivalente ⁽³⁾.

In prima approssimazione, i corrispondenti valori per un’autovettura plug-in da 1200 kg, in funzionamento ibrido, si manterrebbero sotto ai 90 grammi di CO₂/km. Conclusioni simili, anche se espresse solo in termini energetici (consumi attorno ai 1800 Joule/miglio degli ibridi plug-in contro i 3500 Joule/miglio del veicolo convenzionale), sono riportate anche in altri studi [17, 18, 19]. Questi ultimi lavori concludono che *“sembrano esserci pochi dubbi che la tecnologia plug-in sarà introdotta con successo sul mercato nel 21° secolo”*.

(2) Vedi Cap. 3, par. 4.

(3) Peso del veicolo base endotermico 1500 kg, contro i 1750 kg della versione ibrida plug-in.

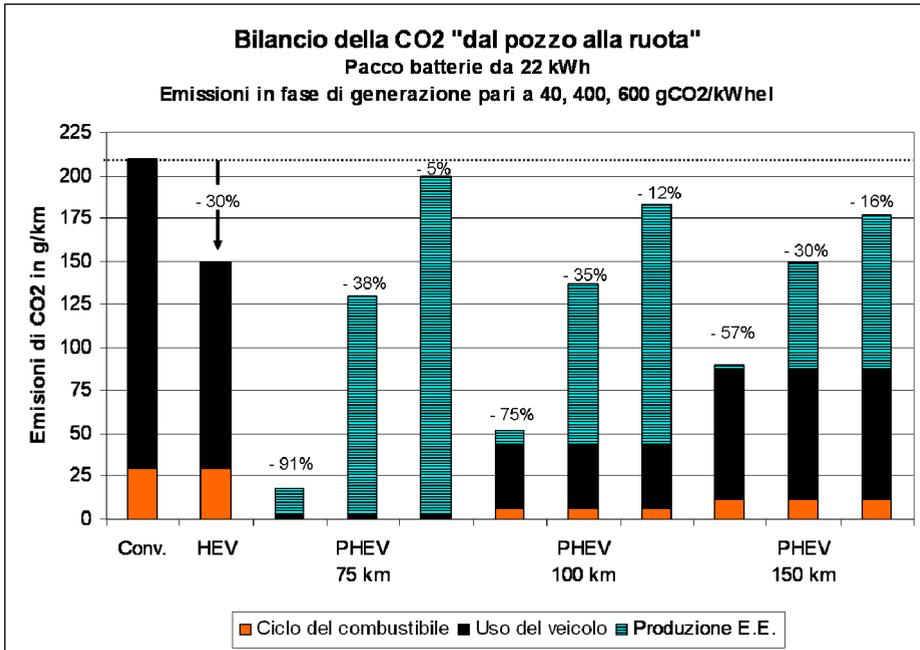


Fig. 4.2 - Emissioni di CO₂ di un veicolo ibrido in confronto a uno convenzionale a benzina (prima barra a sinistra). Percorsi di 75, 100 e 150 km con utilizzo dell'energia elettrica generata da vari mix energetici (dai 40 g/kWh della Francia ai 600 del termoelettrico a olio combustibile) (fonte: INRETS, [16])

Secondo alcune stime [19], una popolazione di veicoli plug-in utilizzati a batteria nell'ambito urbano e in funzionamento endotermico al di fuori, userebbe in Europa circa l'85% dell'energia di propulsione dalla rete elettrica. Negli USA, tenuto conto della diversa distribuzione delle percorrenze, tale frazione sarebbe del 64-74%. Con un approccio più schematico che conduca a una ripartizione paritetica del flusso energetico (ovvero metà del consumo finale speso su percorsi urbani a emissioni zero, con energia proveniente dalla sola batteria ricaricata dalla rete, e metà su percorsi con alimentazione a combustibile, in funzionamento ibrido minimale con mantenimento della carica della batteria), il *Libro Bianco sull'Auto Elettrica* della CIVES [12] stima, nel caso di fonte primaria gas naturale (Fig. 4.3), un rendimento complessivo dell'intera catena energetica dell'ordine del 28% per il plug-in, contro il 35% del sistema a batteria.

Considerato che il consumo energetico è in relazione sostanzialmente lineare con le emissioni di CO₂, ne conseguono in prima approssimazione, per il plug-in, emissioni di CO₂ orientativamente pari a 35/28 di quelle del veicolo a sola batteria (50 g/km, punto 4.1.4 precedente) e quindi, all'orizzonte del 2010, valori inferiori a 70 grammi/km nelle ipotesi indicate e per una autovettura da 1200 kg. Ovviamente, le emissioni durante il funzionamento in "puro elettrico" sarebbero sostanzialmente uguali a quelle del veicolo a batteria.

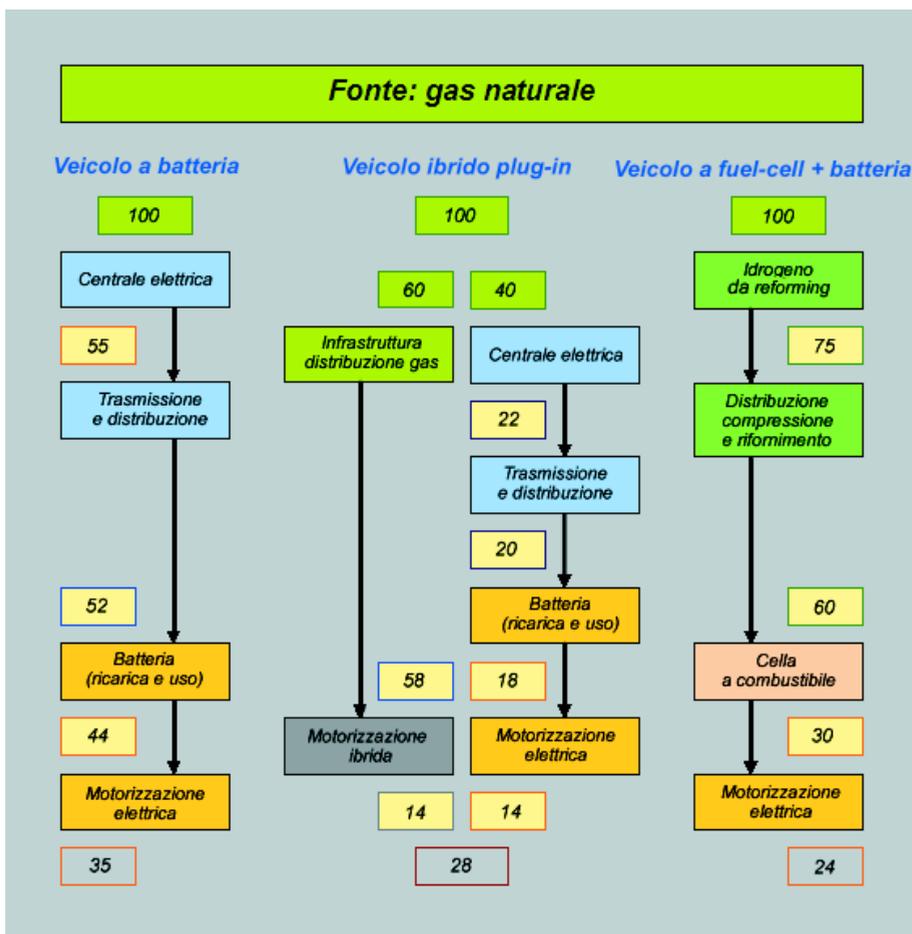


Fig. 4.3 - Confronto del rendimento energetico di tre veicoli (a batteria, ibrido, a celle a combustibile) ipotizzando il gas naturale come fonte energetica primaria (fonte: CIVES)

Concludendo, un'autovettura plug-in da 1200 kg presenterebbe emissioni di CO₂ collocate in un intervallo che si estende da 50 g/km (puro elettrico, in città), a circa 90 g/km (funzionamento ibrido su percorrenze non superiori a 150 km), fino ad emissioni analoghe a quelle dei veicoli endotermici in funzionamento con solo motore a scoppio, sui lunghi percorsi extraurbani.

4.1.6 Confronto delle emissioni di gas serra sul ciclo standardizzato NEDC

La Tab. 4.3 sintetizza le emissioni di gas serra di autovetture, dal pozzo alle ruote, con le diverse tecnologie considerate, allo stato attuale e a un orizzonte di medio termine, nelle condizioni di prova standardizzate del ciclo di percorrenza NEDC.

Tab. 4.3 - Emissioni medie di gas serra di autovetture, dal pozzo alle ruote, con diverse tecnologie, allo stato attuale e all'orizzonte del 2010, nelle condizioni di prova standardizzate del ciclo di percorrenza NEDC

| <i>Tecnologia autovettura</i> | <i>Anno</i> | <i>Emissioni di CO₂eq (grammi/km)</i> | <i>NOTE</i> |
|-------------------------------|---------------------|--|---|
| Diesel | <i>Oggi (EUCAR)</i> | 170 | |
| Benzina | | 195 | |
| Metano | | 180 | |
| Batteria (Ni/Cd) | | 90 | Su ciclo standard urbano |
| Diesel | <i>2010 (EUCAR)</i> | 160 | |
| Benzina | | 170 | |
| Metano | | 150 | |
| Ibridi diesel | | 130 | Mild hybrid |
| Ibridi benzina | | 140 | Idem |
| Ibridi metano | | 120 | Idem |
| Batteria (Na/NiCl) | <i>2010</i> | 50 | Su ciclo standard urbano |
| Ibridi Plug-in | | 50-90 | Rispettivamente in puro elettrico e in ibrido |

4.1.7 Considerazioni sui costi sociali dell'effetto dei gas serra

Valutazioni sui costi che le collettività vengono a sostenere in conseguenza degli effetti dei gas serra sono state condotte dalla serie di studi ExternE sviluppati nel contesto del Programma Joule della UE [20]. Per il parco veicoli in circolazione all'anno 2000, e in termini generali, l'impatto dell'effetto serra veniva stimato attorno ai 40 €/tCO₂eq. Per la frazione che attiene ai trasporti le stime di ExternE vanno da 0,0039 €/km per l'auto a benzina a 0,0051 €/km per le auto diesel, con una media di 0,0045 €/km. Per i veicoli elettrici a batteria tali costi verrebbero abbattuti di un fattore 3-4, restando quindi contenuti attorno a 0,0010-0,0015 €/km. Per gli ibridi plug-in sarebbero orientativamente contenuti entro 0,002 €/km.

4.2 Confronto ambientale delle diverse tecnologie in condizioni di riferimento standardizzate: emissioni "regolamentate"

4.2.1 Emissioni regolamentate dei veicoli endotermici, sul ciclo NEDC

Il citato studio EUCAR-CONCAWE-JRC si è concentrato sulle emissioni di CO₂ e non riporta valutazioni sulle emissioni inquinanti al tubo di scappamento dei futuri motori. I valori da assumersi in prospettiva non potranno d'altra parte

che essere contenuti nei limiti che verranno imposti per i prossimi anni dalle Direttive Comunitarie, alla cui formulazione concorrono peraltro in misura sostanziale le informazioni sulla possibile evoluzione tecnologica fornite dall'industria automobilistica. In Tab. 4.4 sono riportati, per alcune tipologie di veicoli, i limiti massimi imposti negli ultimi decenni per gli agenti inquinanti "regolamentati", nonché le previsioni dei nuovi limiti stabiliti per la regolamentazione "Euro 5" all'orizzonte del 2010.

4.2.2 Emissioni locali regolamentate dei veicoli a batteria, sul ciclo NEDC

I veicoli a batteria non presentano alcuna emissione nel punto di utilizzo e quindi il loro contributo all'inquinamento locale, soprattutto in ambito urbano, è nullo. Sono invece da valutare le emissioni degli impianti di generazione elettrica conseguenti all'alimentazione dei veicoli in questione, anche se, come noto, tali emissioni, attentamente controllate, e minimizzate in particolari condizioni atmosferiche (ad esempio in presenza di inversioni termiche), vengono immesse in quota da camini di grande altezza in località decentrate dai grandi insediamenti urbani. Tutto ciò limita drasticamente la concentrazione di inquinanti al livello del suolo. Nel seguito viene comunque condotta una stima quantitativa dell'impatto al suolo.

La Tab. 4.5 riporta rispettivamente le emissioni specifiche degli impianti termoelettrici al 2003 [6], le valutazioni ENEL del 2006-2007 e i limiti imposti dalla proposta di Direttiva UE 98/0225 sulla Grande Combustione [3].

Da tale quadro emerge che già allo stato attuale i limiti della citata Direttiva parrebbero soddisfatti, spesso con largo margine. A titolo cautelativo, assumendo che a breve non intervengano ulteriori miglioramenti tecnologici e che valgano sostanzialmente i limiti della Direttiva, ne risulta che, tenuto conto che la generazione termoelettrica contribuirà per tale data al 67% dei consumi finali nazionali, le emissioni specifiche riferite al kWh reso ai consumi finali possono essere assunte rispettivamente in circa 0,40 g/kWh per gli NO_x, 0,06 g/kWh per le polveri e 0,34 g/kWh per gli SO₂.

Le conseguenti emissioni per un'autovettura a batteria da 1200 kg e un consumo di 130 Wh/km risulteranno di circa 0,052 g/km di NO_x, di 0,007 g/km di PM₁₀ e di 0,065 g/km di SO₂ (quest'ultimo non regolamentato dalle vigenti Direttive sui motori dei veicoli). Tali valori, di per sé già oggi del tutto compatibili con quanto preconizzato dalla prossima normativa Euro 5, riguardano come detto l'emissione al camino delle centrali elettriche. La ricaduta al suolo dipende da un assieme di fattori orografici e climatici e non è facilmente calcolabile (le stime parlano tipicamente di pochi percento o frazioni di percento della quantità immessa in atmosfera).

Tab. 4.4 - Limiti massimi di emissione degli inquinanti regolamentati dalle Direttive UE

| Veicoli | Combustibile | Direttiva e- missioni | Anno | Limiti max di emissione (g/km) | | | | | |
|---------------------------|---------------------|--------------------------|-------------|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--|
| | | | | CO | HC | NOx | HC+NOx | PM | |
| Autovetture M1 | Gasolio | Euro 1 | 1992 | 2,72 | - | - | 0,97 | 0,14 | |
| | | Euro 2 | 1996 | 1,00 | - | - | 0,90 | 0,10 | |
| | | Euro 3 | 2000 | 0,64 | - | 0,50 | 0,56 | 0,05 | |
| | | Euro 4 | 2005 | 0,50 | - | 0,25 | 0,30 | 0,025 | |
| | | Euro 5 | 2010 | 0,50 | - | 0,20 | 0,20 | 0,005 | |
| Autovetture M1 | Benzina e metano | Euro 1 | 1992 | 2,72 | - | - | 0,97 | - | |
| | | Euro 2 | 1996 | 2,20 | - | - | 0,50 | - | |
| | | Euro 3 | 2000 | 2,30 | 0,20 | 0,15 | - | - | |
| | | Euro 4 | 2005 | 1,00 | 0,10 | 0,08 | - | - | |
| | | Euro 5 | 2010 | 1,00 | 0,075 | 0,06 | - | - | |
| Autocarri N1 > 1760 kg | Gasolio | Euro 1 | 1994 | 6,90 | - | - | 1,70 | 0,25 | |
| | | Euro 2 | 1998 | 1,50 | - | - | 1,60 | 0,20 | |
| | | Euro 3 | 2001 | 0,95 | - | 0,78 | 0,86 | 0,10 | |
| | | Euro 4 | 2006 | 0,74 | - | 0,39 | 0,46 | 0,06 | |
| | | Euro 5 | 2010 | 0,74 | - | 0,31 | 0,39 | 0,006 | |

Legenda inquinanti

CO: monossido di carbonio

HC: idrocarburi incombusti

NOx: ossidi di azoto

HC+NOx: idrocarburi incombusti e ossidi di azoto

PM: particelle microscopiche con diametro uguale o inferiore a 10 µm (cioè 10 millesimi di millimetro)

Tab. 4.5 - Emissioni specifiche degli impianti termoelettrici al 2003, le previsioni ENEL del 2006-2007 e i limiti imposti dalla proposta di Direttiva UE 98/0225 sulla Grande Combustione

| <i>Agente inquinante</i> | <i>Emissioni 2003 impianti termoelettrici Edison (g/kWh termico)</i> | <i>Emissioni 2003 impianti termoelettrici ENEL (g/kWh termico)</i> | <i>Previsioni ENEL per 2006-2007 (g/kWh termico)</i> | <i>Limiti Proposta di Direttiva UE 98/0225 (g/kWh termico)</i> |
|--------------------------|--|--|--|--|
| NOx | 0,422 | 0,600 | 0,300 | 0,600 |
| PM10 | 0,011 | 0,030 | 0,050 | 0,090 |
| SO ₂ | 0,174 | 0,900 | 0,650 | 0,500 |

Un'idea più indicativa dell'impatto ambientale locale di una ipotetica flotta di veicoli a batteria può aversi se si considera, in via del tutto ipotetica, che una eventuale diffusione all'anno 2020 di 4 milioni⁽⁴⁾ di vetture elettriche con percorrenza di 15.000 km/anno, incrementerebbe i consumi elettrici annui di meno di 8 TWh⁽⁵⁾, con un aumento delle emissioni dovute alla generazione elettrica solamente del 2%.

Se si considera che tale sorgente di inquinamento (processi energetici/industriali) incide di per sé solo per pochissimi percento sull'inquinamento nelle nostre città, si comprende come il contributo dei veicoli elettrici resti oggettivamente del tutto trascurabile. Nell'area milanese, ad esempio, delle 14.005 tonnellate di NOx immesse annualmente (anno 2004), solo 400 derivano dai processi energetici/industriali [22], e analogamente delle 1312 tonnellate di PM10 soltanto 98 derivano da tali sorgenti.

Si tratta quindi di percentuali largamente inferiori al 10%, che la popolazione di veicoli a batteria ipotizzata incrementerebbe di un fattore 1,02, quindi con impatto assolutamente irrilevante. Come dire che paradossalmente, anche se per assurdo tutta la produzione di elettricità fosse di origine termoelettrica, l'impatto sull'ambiente urbano resterebbe del tutto marginale.

(4) Tale ipotesi è congruente con le analisi del mercato potenziale dei veicoli elettrici condotte dallo studio dell'UE *COST 302*, rif. [21] che stima quale mercato potenziale il 7% del parco auto e 14% del parco furgoni e autocarri, nonché con la capacità di allocazione dei loro consumi elettrici nelle valli notturne del diagramma giornaliero dei consumi elettrici, senza la necessità di realizzare nuovi impianti di generazione elettrica per questo nuovo carico elettrico.

(5) Sulla base dei consumi di 130 Wh/km calcolati al paragrafo 4.1.3.

4.2.3 Emissioni locali “regolamentate” dei veicoli ibridi plug-in

Assumendo, ai fini di una stima almeno orientativa, il medesimo utilizzo “intermedio” indicato nel precedente paragrafo 4.1.5 (50% dell’energia alle ruote fornita dal ramo elettrico in funzionamento a zero emissioni, e 50% dal ramo endotermico in funzionamento ibrido), le emissioni locali risulteranno corrispondentemente composte per metà dalla quota pertinente alla generazione elettrica, che come visto sono trascurabili a livello dell’ambito urbano, e per metà da quelle della motorizzazione a combustione, ovvero in misura pari alla metà di quanto attinente ai motori conformi ai limiti Euro 5, come mostrato in Tab. 4.6.

Tab. 4.6 - Emissioni locali dei veicoli ibridi plug-in

| <i>Veicolo ibrido plug-in con motorizzazione termica diesel</i> | <i>NOx (g/km)</i> | <i>PM10 (g/km)</i> | <i>SO₂ (g/km) (non regola- mentato)</i> |
|---|-------------------|------------------------|--|
| Emissioni nell’atmosfera per la genera- zione elettrica | 0,026 | 0,0035 | 0,033 |
| Ricaduta al suolo dalla generazione e- lettrica | circa 0 | circa 0 | circa 0 |
| Emissioni dalla motorizzazione en- dotermica | 0,10 | 0,0025 | / |
| <i>Emissioni totali al suolo</i> | <i>0,10</i> | <i>0,0025</i> | <i>0,033</i> |

4.2.4 Riepilogo del confronto ambientale sul ciclo standardizzato

Sempre ipotizzando a titolo esemplificativo il caso di un veicolo della categoria M1 del peso di 1200 kg (le conclusioni sarebbero poco diverse per altre tipologie o taglie di veicoli), il confronto complessivo dell’impatto ambientale è sintetizzato nella Tab. 4.7.

Si può notare che, nel medio termine, le emissioni di gas serra dei veicoli a batteria e ibridi plug-in sarebbero da 2 a 4 volte inferiori a quelle di ogni altra configurazione. Per gli ibridi plug-in anche le emissioni al suolo degli inquinanti regolamentati risulterebbero mediamente dimezzate. Per i veicoli a batteria le emissioni al suolo sono nulle. Si può anche notare che gli attuali veicoli a batteria sono fin d’ora meno inquinanti di ogni altra alternativa.

Tab. 4.7 - Emissioni nell'atmosfera (CO₂ ed emissioni regolamentate per i veicoli) ed emissioni al suolo delle diverse motorizzazioni (taglia autoveettura M1) allo stato attuale e all'orizzonte del 2010, sul ciclo standardizzato NEDC

| Veicolo | Anno | Direttiva emissioni | Emissioni CO ₂ (g/km) | Emissioni regolamentate | | | | | | | | Note e fonti |
|------------------------|------|---------------------|----------------------------------|-------------------------|-------|--------|-----------------|----------------------------------|---------|---------|---------------------------------------|--------------|
| | | | | Nell'atmosfera (g/km) | | | | Al suolo, limiti di legge (g/km) | | | | |
| | | | | CO | HC | NOx | PM | CO | HC | NOx | PM | |
| Diesel | 2002 | Euro 3 | 170 | | | | ≤ 0,64 | / | ≤ 0,56 | ≤ 0,050 | Elaborazione da fonte EUCAR | |
| Benzina | | | 195 | | | | ≤ 0,20 | ≤ 0,15 | / | | | |
| Metano | | | 180 | | | | ≤ 0,20 | ≤ 0,15 | / | | | |
| Ibridi benzina | 2005 | Euro 4 | 150 | | | | ≤ 1,00 | ≤ 0,10 | ≤ 0,08 | / | Mild hybrid Euro 4 | |
| Batteria (Ni/Cd) | | | 90 | | 0,052 | 0,0035 | circa 0 | circa 0 | circa 0 | circa 0 | | |
| Diesel | 2010 | Euro 5 | 160 | | | | ≤ 0,50 | / | ≤ 0,20 | ≤ 0,005 | Elaborazione da fonte EUCAR Euro 5 | |
| Benzina | | | 170 | | | | ≤ 1,00 | ≤ 0,075 | ≤ 0,06 | / | | |
| Metano | | | 150 | | | | ≤ 1,00 | ≤ 0,075 | ≤ 0,06 | / | | |
| Ibridi diesel | | | 130 | | | | ≤ 0,50 | / | ≤ 0,20 | ≤ 0,005 | | |
| Ibridi benzina | | | 140 | | | | ≤ 1,00 | ≤ 0,075 | ≤ 0,06 | / | | |
| Ibridi metano | | | 120 | | | | ≤ 1,00 | ≤ 0,075 | ≤ 0,06 | / | | |
| Plug-in hybrid diesel | | | 50-90 | | | | 0,026el + 0,10 | ≤ 0,0035el + 0,0025 | ≤ 0,25 | ≤ 0,10 | ≤ 0,0025 | |
| Plug-in hybrid benzina | | | 50-90 | | | | 0,026el + 0,030 | 0,0035el | ≤ 0,25 | ≤ 0,03 | circa 0 | |
| Batteria (Na/NiCl) | | / | 50 | | | | 0,052 | 0,0035 | circa 0 | circa 0 | circa 0 | |

4.3 Confronto energetico sul ciclo di riferimento standardizzato

L'analisi energetica *Well-to-Wheels* viene condotta seguendo la stessa metodologia adottata nello studio di EUCAR-Concawe-JRC [1], e cioè computando la spesa energetica complessiva della fase *Well-to-Tank* (processi di produzione, trasporto, preparazione e distribuzione dei combustibili, o, nel caso dei veicoli elettrici, per la produzione dell'energia elettrica) e della fase *Tank-to-Wheels* (l'energia spesa per la trazione). Da notare che questa metodologia non tiene in conto la spesa energetica per la costruzione dei veicoli. Ciò non inficia tuttavia significativamente il confronto tra le diverse alternative tecnologiche qui considerate, in quanto:

a) l'energia per la costruzione dei veicoli rappresenta una frazione esigua di quella complessivamente spesa nell'arco completo della loro vita utile (con le attuali tecnologie è stimabile nel 15% circa);

b) in prima approssimazione, tale spesa energetica può ritenersi sostanzialmente equivalente per le diverse tecnologie veicolari qui considerate: il componente che maggiormente differenzia i veicoli elettrici da quelli tradizionali è la presenza della batteria, la cui costruzione – quanto meno per le batterie convenzionali – richiede un dispendio energetico proporzionalmente inferiore a quanto attinente alla costruzione dei veicoli convenzionali; per le batterie Ni/Cd e Pb/acido, ad esempio [23], l'energia complessivamente spesa per la costruzione e il successivo riciclaggio è dell'ordine del 5% solamente di quella complessivamente elaborata nel corso della vita. Queste valutazioni vanno tuttavia approfondite per le future batterie di tipo avanzato, in particolare le filiere al litio.

4.3.1 Consumi standardizzati dei veicoli a motore endotermico

I consumi standardizzati stimati a partire dal già citato studio EUCAR-CONCAWE-JRC sono sintetizzati in Tab. 4.8. Nelle versioni ibride, il miglioramento dei consumi dal serbatoio alle ruote, rispetto alla tecnologia odierna, risultano rispettivamente del 10% (benzina), del 25% (metano) e del 18% (diesel), evidenziando le forti potenzialità dell'elettrificazione.

Tab. 4.8 - Consumi standardizzati medi elaborati a partire dallo studio EUCAR-CONCAWE-JRC

| Tipologia | Consumo in energia primaria (Wh/km) |
|----------------|-------------------------------------|
| Diesel | 570 |
| Benzina | 590 |
| Metano | 670 |
| Ibridi diesel | 470 |
| Ibridi benzina | 530 |
| Ibridi metano | 500 |

(*) I consumi standardizzati alla tecnologia del 2002 sono: diesel 610 Wh/km; benzina 710 Wh/km; metano 810 Wh/km

4.3.2 Consumi standardizzati dei veicoli a batteria e ibridi plug-in

Nel 2004, il consumo specifico medio di fonti primarie per la produzione complessiva italiana di 287 TWh elettrici (con fonti primarie fossili per il 20% da carbone, 39% da gas, 20% da petrolio), è risultato di 2100 kcal/kWh, con un rendimento medio complessivo degli impianti di generazione attorno al 41% [24, 25].

Anche qualora non dovessero intervenire miglioramenti significativi nel rendimento energetico degli impianti rispetto ai valori odierni (rendimento circa 39% per le centrali a carbone, 41% per quelle a olio combustibile, 55% per quelle a gas a cicli combinati), l'effetto del diverso mix di fonti a tale data (punto 4.1.3.1 precedente, *fonte [2]*), con combustibili fossili nella misura del 12% per il carbone, 52% gas e 10% petrolio, si tradurrà comunque in un miglioramento del rendimento complessivo del sistema, che ricalcolato a partire dal 40,8% del 2004 dovrebbe collocarsi ad almeno il 42%.

Come già indicato al punto 4.1.3.2, allo stato della tecnologia odierna il consumo standardizzato (dalla rete elettrica) su ciclo urbano di veicoli equipaggiati con batterie tradizionali (piombo/acido e nichel/cadmio) si colloca sui 140-150 Wh/(t*km) e quindi, per un'autovettura di taglia 1200 kg, sui 180-200 Wh/km. Al 2010 ed oltre, l'utilizzo di batterie di tipo avanzato (litio/ioni o sodio/cloruro di nichel) ridurrebbe tale valore a circa 130 Wh/km.

Su queste basi, il consumo di energia primaria del veicolo in questione si aggirerebbe sui 310-320 Wh/km, molto meno dei veicoli endotermici (quello di un veicolo elettrico odierno, con batteria Ni/Cd, è tra i 440 e i 490 Wh/km). Va inoltre sottolineata la rilevante valenza economica e politica che deriva dal fatto che l'approvvigionamento energetico del veicolo in questione dipende dal petrolio in misura assai limitata.

Nel caso di veicoli plug-in, e assumendo mediamente una utilizzazione energeticamente "paritetica" dello stesso (50% in "puro elettrico" a emissioni zero, e 50% in ibrido con mantenimento dello stato di carica della batteria), il conseguente consumo di energia primaria risulterebbe pari a:

$310/2 = 155$ Wh/km nell'uso a emissioni zero, oltre a:

$470/2 = 235$ Wh/km nell'uso in ibrido (ibrido diesel [1])

oppure $500/2 = 250$ Wh/km nel caso di un ibrido a metano, [1])

oppure $530/2 = 265$ Wh/km nel caso di un ibrido a benzina [1]),

per un totale di 390-420 Wh/km (in funzionamento ibrido) a seconda del combustibile della motorizzazione endotermica, contro i 570-670 Wh/km dei veicoli puramente endotermici al 2010 e i 470-530 Wh/km dei *mild hybrid* alla stessa data [1]. Assumendo un funzionamento paritetico (metà in puro elettrico, con consumo 310 Wh/km, e metà in ibrido), il consumo medio si aggirerebbe sui 370 Wh/km.

Anche in questo caso interverrebbe un significativo svincolamento dal petrolio, la cui dipendenza per questi veicoli si ridurrebbe al 60% circa. Ad ulteriore vantaggio dei plug-in vi è inoltre la possibilità di percorrenze a zero emissioni con ricarica della batteria dalla sola rete elettrica e, in tali condizioni, con il medesimo svincolamento dal petrolio dei veicoli a batteria.

4.3.3 *Confronto energetico in condizioni di riferimento standardizzate*

La Tab. 4.9 nella pagina successiva sintetizza il confronto tra le alternative considerate.

4.4 Impatto ambientale delle diverse tipologie veicolari nelle condizioni operative reali

Per una serie di ragioni, il ricorso a condizioni di riferimento standardizzate per la determinazione dei consumi e delle emissioni non fornisce un quadro realmente rappresentativo dell'impatto ambientale ed energetico, in quanto nell'uso reale diversi fattori difficilmente controllabili incidono considerevolmente su tali aspetti, per di più in misura assai differente per le diverse tecnologie.

Sia i consumi sia le emissioni dipendono in misura sostanziale dal tipo di percorso effettuato dal veicolo, a causa delle differenti condizioni di lavoro dei motori nell'uso reale. Inoltre, le prove standardizzate, intese a consentire confronti secondo procedure definite e riproducibili ai fini di certificazione, sono condotte su banchi dinamometrici in condizioni perfettamente programmate (temperatura, uso ottimale del cambio ecc.) che non possono evidentemente riprodurre l'ampio grado di variabilità dell'uso reale.

Lo studio UE *"Reducing NOx Emissions on the Road"* (anno 2006, fonte [26]) indica in effetti che *"the air quality does not improve as predicted with the tightening of emissions standards. One reason is the gap between the performance of emissions measured during approval tests and their effectiveness under real operating conditions Real traffic is insufficiently represented by the NEDC cycle"*.

In sostanza, le strategie di controllo della combustione e di controllo dei fumi non riescono a tenere conto dell'ampia estensione del comportamento dei motori nel traffico reale. Inoltre, le prove standardizzate fanno riferimento a motori nuovi perfettamente messi a punto, in condizioni climatiche ottimali, di fatto "tarati" sul ciclo di riferimento, e non tengono quindi conto né del funzionamento imposto dai cicli di lavoro reali né dell'usura e del decadimento del motore che si manifesta nella realtà.

Tab. 4.9 - Confronto tra i consumi tra le tipologie di auto

| Veicolo | Anno | Consumo in energia primaria (Wh/km) | Dipendenza Dalle fonti fossili | Ricorso ai prodotti petroliferi rispetto ad oggi (1) | Note |
|--------------------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| Diesel | 2002 | 610 | Petrolio | 100% | |
| Benzina | | 710 | Petrolio | 100% | |
| Metano | | 810 | Gas | 100% | |
| Ibridi benzina | 2005 | 540 | Petrolio | 75% | Mild hybrid, sulla base di un minor consumo del 25% rispetto agli equivalenti veicoli non ibridi. |
| Batteria (Ni/Cd) | | 440-490 | 20% petrolio + 39% gas + 20% carbone | 14-16% petrolio + 27-31% gas | |
| Diesel | 2010 | 570 | Petrolio | 93% | Elaborazioni a partire da fonte EU-CAR [1] |
| Benzina | | 590 | Petrolio | 83% | |
| Metano | | 670 | Gas | 83% | |
| Ibridi diesel | | 470 | Petrolio | 79% | |
| Ibridi benzina | | 530 | Petrolio | 75% | |
| Ibridi metano | | 500 | Gas | 62% | |
| Plug-in hybrid | | 320-420 | 60% petrolio + 20% gas + 10% carbone | 38-41% petrolio + 13-14% gas (2) | |
| Batteria (Na/NiCl) | 310 | 10% petrolio + 52% gas + 12% carbone | 5% petrolio + 26% gas (2) | | |

(1) Rappresenta la quantità di prodotti petroliferi consumati in rapporto all'analogo veicolo puramente endotermico (non ibrido) allo stato attuale della tecnologia

(2) Rispetto a un veicolo diesel all'attuale tecnologia.

Le vigenti Direttive impongono in effetti che i livelli ammessi vengano mantenuti per una ragionevole durata di vita dei motori (le Euro 4 impongono 100.000 km o 5 anni), ammettendo tuttavia un certo decadimento nel tempo (per Euro 4, è ammesso che i livelli di emissione possano superare di 3-7,5 volte i limiti, a seconda del composto inquinante considerato e del tipo di motore).

Per soddisfare questo vincolo i costruttori producono veicoli che da nuovi, e in condizioni standardizzate, presentano emissioni largamente al di sotto dei limiti ammessi, e provvedono i veicoli moderni di dispositivi diagnostici/controllore di bordo (OBD) che debbono anche notificare i possibili deterioramenti quando si superano determinati limiti. L'approccio va certamente nella giusta direzione, ma allo stato della tecnica (fonte: *Euro Emission Standards, 2004, [27]*) gli OBD *“presentano ancora un'area di controllo molto ristretta e insoddisfacente, con forti gap tra gli obiettivi e il funzionamento reale, che richiede ancora grossi miglioramenti e il monitoraggio di diversi altri parametri in aggiunta a quelli utilizzati”*. In questo quadro, e ai fini del presente lavoro, interessa in sostanza stimare quali possano essere i valori di emissioni “vere” ragionevolmente rappresentative di quanto avviene sulla strada nell'arco della vita dei veicoli. Nel presente lavoro ci si limita a stimare, sulla base della bibliografia esistente, l'entità di tali fattori di influenza, per valutare almeno orientativamente in quale misura il loro effetto possa modificare il confronto ambientale ed energetico complessivo presentato ai punti precedenti.

4.4.1 Influenza del percorso su emissioni e consumi dei veicoli endotermici

Sono stati condotti diversi studi “in condizioni reali”, misurando le emissioni effettive su strada, che hanno portato a risultati di confronto molto significativi [28, 29, 30, 31].

I lavori [28] e [29], che si riferiscono a veicoli Euro 3 ed Euro 4, diesel e a benzina, confrontano le emissioni al banco su ciclo ECE (la parte urbana del ciclo NEDC) e sul “ciclo Mol” (ovvero la simulazione di un percorso stradale misto cittadino-rurale-autostradale nella cittadina belga di Mol e dintorni), con quelle misurate su strada nell'effettivo percorso in Mol, nonché su un altro percorso reale nella città di Barcellona.

La Tab. 4.10, relativa a una vettura a benzina Euro 4, mette a confronto le emissioni al dinamometro e quelle reali, distinguendo per queste ultime tra le emissioni in percorso urbano (ciclo ECE) e quelle in percorso rurale-extraurbano (ciclo EUDC). Le emissioni di NO_x, che nelle prove standardizzate al banco rientrano bene nei limiti Euro 4 (0,08 g/km), risultano anche 4 volte maggiori al limite ammesso nel ciclo Mol simulato al banco e, soprattutto eccedono anche di 7 volte il limite nel traffico urbano reale. I valori del CO nel traffico reale, pur rimanendo nei limiti (1 g/km), risultano fino a 15 volte più elevati rispetto ai valori sul ciclo standard al dinamometro.

Tab. 4.10 - Confronto tra le emissioni al dinamometro e quelle reali, distinguendo per queste tra quelle in percorso urbano (ciclo ECE) e quelle in percorso rurale-extraurbano (ciclo EUDC)

| <i>Misure al dinamometro su una city car Euro 4 in commercio (peso simulato 1050 kg)</i> | | | | | | | |
|---|------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| | <i>Unità di misura</i> | <i>Ciclo UE</i> | | <i>Ciclo Mol</i> | | | |
| | | <i>Ciclo urbano ECE</i> | <i>Ciclo extraurbano EUDC</i> | <i>Città</i> | <i>Fuori città</i> | <i>Autostrada</i> | |
| Velocità | km/h | 18,5 | 61,8 | 19,2 | 62,6 | 93,7 | |
| RPA | m/s ² | 0,16 | 0,10 | 0,40 | 0,26 | 0,14 | |
| Consumo carburante | L/100 km | 8,5 | 6,1 | 10,6 | 6,9 | 7,6 | |
| CO ₂ | g/km | 202 | 143 | 250 | 163 | 179 | |
| CO | g/km | 0,003 | 0,039 | 0,071 | 0,479 | 0,579 | |
| NOX | g/km | 0,025 | 0,007 | 0,350 | 0,123 | 0,50 | |
| THC | g/km | 0,004 | 0,002 | 0,005 | 0,008 | 0,010 | |
| <i>Misure da percorso stradale reale su una city car Euro 4 in commercio (peso 1400 kg)</i> | | | | | | | |
| | | <i>Barcellona</i> | | | <i>Mol</i> | | |
| | <i>Unità di misura</i> | <i>Città</i> | <i>Fuori città</i> | <i>Autostrada</i> | <i>Città</i> | <i>Fuori città</i> | <i>Autostrada</i> |
| Velocità | km/h | 16,7 | 52,6 | 96,9 | 20,6 | 51,6 | 102,8 |
| RPA | m/s ² | 0,32 | 0,22 | 0,09 | 0,35 | 0,18 | 0,12 |
| Consumo carburante | L/100 km | 12,0 | 7,0 | 7,3 | 10,7 | 6,9 | 7,3 |
| CO ₂ | g/km | 283 | 165 | 172 | 254 | 162 | 172 |
| CO | g/km | 0,072 | 0,621 | 0,635 | 0,013 | 0,131 | 0,620 |
| NOX | g/km | 0,231 | 0,063 | 0,030 | 0,570 | 0,109 | 0,018 |
| THC | g/km | 0,006 | 0,006 | 0,007 | 0,006 | 0,006 | 0,013 |

Da notare invece che i consumi e le corrispondenti emissioni di CO₂ aumentano in misura che, pur essendo rilevante (dal +30 al +100% nei percorsi reali rispetto al ciclo ECE urbano, e mediamente del +16% nei percorsi extraurbani), è assai più bassa dell'incremento nelle emissioni dei composti inquinanti regolamentati.

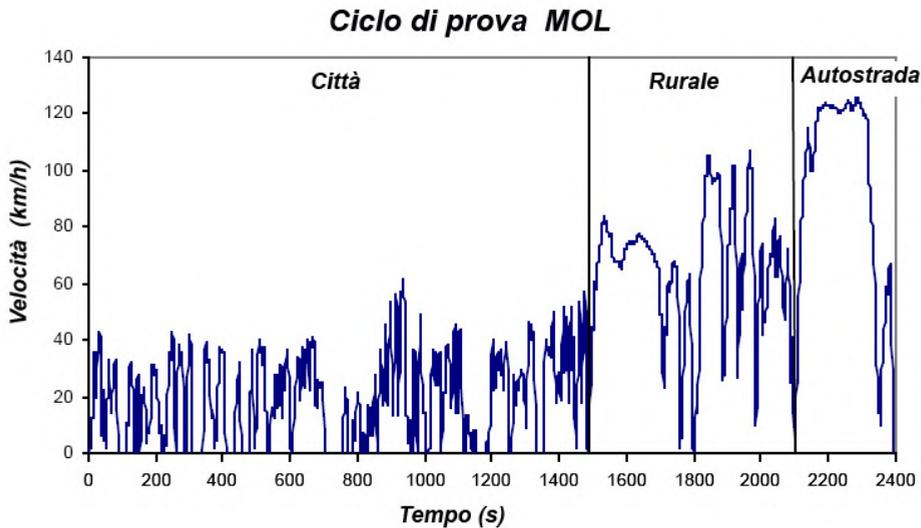


Fig. 4.4 - Rappresentazione grafica del ciclo “città di Mol”

Il Progetto di ricerca Artemis condotto in ambito UE ha formulato la proposta di una serie di nuovi cicli di prova (*CADC - Common Artemis Driving Cycle*), più rappresentativi del NEDC, dei quali quello relativo all’uso urbano dei veicoli, che qui più interessa, è riportato nella successiva Fig. 4.5, assieme alla distribuzione della velocità e accelerazione rispetto al ciclo NEDC.

La maggior significatività del ciclo Artemis, e in sostanza la forte influenza tra profilo velocità/tempo ed emissioni, è stata verificata su motorizzazioni Euro sia a benzina sia diesel e GPL, evidenziando su questo ciclo un forte incremento delle emissioni di NOx rispetto al ciclo NEDC [32], come appare in Tab. 4.11.

Da notare che l’incremento delle emissioni (nel caso esaminato gli NOx) è di gran lunga superiore a quello dei consumi, espressi dalla produzione di CO₂ che di questi costituisce un’immagine speculare.

Un altro fattore con forte incidenza sulle emissioni, ancor più che sui consumi, è la “aggressività” di guida, anche nell’ambito urbano. Uno studio dei laboratori della Ford [33], relativo a veicoli a benzina, evidenzia effetti particolarmente rilevanti sugli NOx e gli HC.

Anche in questo caso l’incremento delle emissioni è radicalmente maggiore di quello dei consumi. Per i diesel risultati analoghi sono stati pubblicati dalla Volvo [32], che evidenzia come la guida aggressiva possa aumentare di un ordine di grandezza le emissioni di particolato.

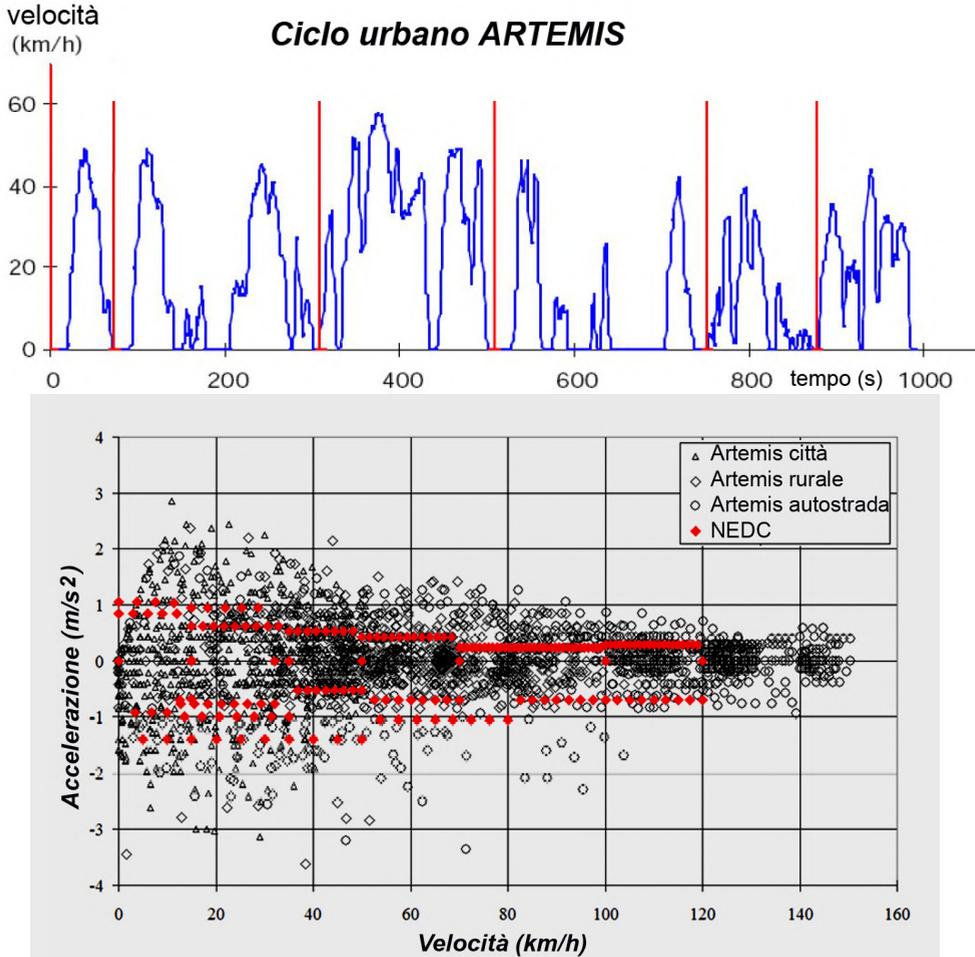


Fig. 4.5 - Profilo del ciclo Artemis [55] e confronto dei punti di lavoro del motore rispetto al ciclo NEDC [31]

Tab. 4.11 - Confronto tra le emissioni di NO_x e di CO₂ nel percorso urbano misurate secondo il ciclo ECE e quello Artemis

| | Veicolo diesel (g/km) | | Veicolo a benzina (g/km) | | Veicolo a GPL (g/km) | |
|-----------------------|-----------------------|---------------|--------------------------|---------------|----------------------|---------------|
| | Ciclo EDC | Ciclo Artemis | Ciclo EDC | Ciclo Artemis | Ciclo EDC | Ciclo Artemis |
| NO_x | 0,417 | 0,899 | 0,050 | 0,093 | 0,018 | 0,042 |
| CO₂ | 161,4 | 170,9 | 197,9 | 193,4 | 174,2 | 172,6 |

Nota: prove al banco dinamometrico

Ancora sul rapporto tra consumi reali e consumi standardizzati, numerosi dati sperimentali sono disponibili con riferimento ai cicli standardizzati in vigore in Giappone [34].

Sulla base di circa 3 milioni di rilevazioni in uso reale di veicoli nell'ambito cittadino, i consumi reali (Fig. 4.6) risultano mediamente superiori del 40% rispetto a quelli rilevati sul ciclo standardizzato "10.15", che è quello utilizzato per la certificazione di consumi ed emissioni in ambito urbano.

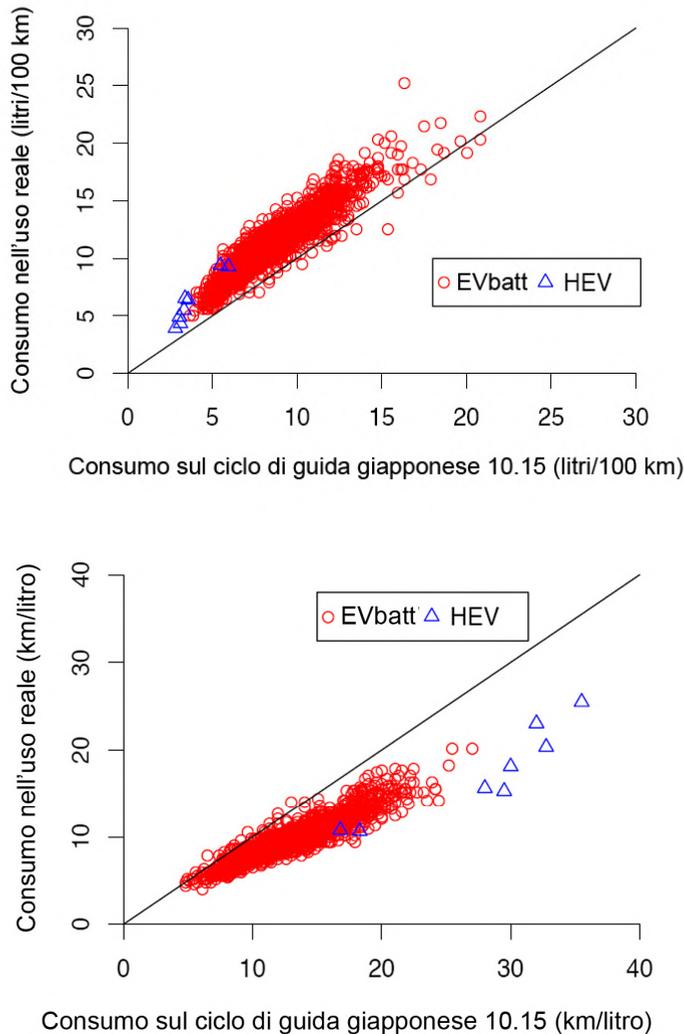


Fig. 4.6 - Confronto del consumo (in litri/100 km, grafico in alto) e dell'economia (in km/litro, grafico in basso) tra il ciclo standardizzato giapponese 10.15 e il ciclo misurato in uso reale (fonte: NIT, [34])

4.4.2 Influenza dell'invecchiamento dei motori sulle emissioni e sui consumi dei veicoli endotermici

Come già detto, le vigenti Direttive ammettono un certo aumento delle emissioni, oltre i limiti stabiliti, nel corso della vita dei veicoli, e diversi studi hanno valutato l'entità di tale degradamento [35, 36, 37].

I lavori condotti in ambito CORINAIR [36] propongono una modellizzazione dell'evoluzione, per i principali inquinanti regolamentati e per tutti i motori da Euro 1 a Euro 4 (assumendo un "normale" piano di manutenzione), basata su "coefficienti di evoluzione" quali quelli riportati a titolo di esempio nella Tab. 4.12 per una vettura a benzina nell'uso a velocità inferiore a 19 km/h che dovrebbe caratterizzare l'uso nell'ambito urbano.

Tab. 4.12 - Aumento delle emissioni dei veicoli durante il loro ciclo di vita. Stime CORINAIR veicoli a benzina (1400-2000 cc), misurate a una velocità inferiore ai 20 km

| Motore | Inquinante | Coefficiente relativo a 0 km | Coefficiente relativo a 50.000 km | Coefficiente relativo a 100.000 km | Rapporto emissioni tra 0 e 100.000 km |
|---|------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Euro 1 – Euro 2 Benzina Uso urbano 1,4-2 litri | CO | 0,543 | 1,303 | 2,063 | 3,8 |
| | NOx | 0,282 | 1,082 | 1,882 | 6,7 |
| | HC | 0,509 | 0,916 | 1,739 | 4,0 |
| Euro 3 – Euro 4 Benzina Uso urbano 1,4-2 litri | CO | 0,543 | 0,960 | 1,378 | 2,5 |
| | NOx | 0,282 | 0,932 | 1,582 | 5,6 |
| | HC | 0,509 | 0,974 | 1,362 | 2,7 |

Tali coefficienti esprimono il rapporto tra le emissioni in un determinato stadio di invecchiamento del motore (espresso in km di percorrenza totale), rispetto al valore limite ammesso dalla Direttiva. Si noti che i valori attorno ad 1, cioè con emissioni pari al limite previsto dalla Direttiva) si collocano attorno ai 50.000 km, e parimenti le emissioni medie nel corso della vita sarebbero quelle attorno ai 50.000 km, all'incirca corrispondenti ai limiti delle Direttive.

Le Figg. 4.7 e 4.8 [38] sintetizzano invece alcuni risultati di rilievi sperimentali sull'effettivo degrado, e riportano l'evoluzione delle emissioni di CO ed NOx su motori diesel Euro 3 nell'intervallo tra 3.000 km e 67.000 km, sul ciclo standardizzato NEDC. In tale intervallo di invecchiamento le emissioni risultano aumentare rispettivamente di 11 volte per il CO e di 2 volte per gli NOx (nonché di 5 volte per gli HC, dato non visualizzato nelle figure).

In particolare, si nota che le emissioni specifiche (grammi/km) sono sempre molto più elevate nel tratto urbano (i primi 4 cicli con velocità contenuta in 50 km/h e percorrenza totale di 4 km) che in quello extraurbano successivo, a volte superando in misura considerevole i limiti ammessi.

Gli NOx a 49.000 km risultano ad esempio attorno a 6,5 grammi su 4 km (1,6 g/km, ovvero tre volte il limite di 0,5 g/km della Direttiva e tre volte quanto ipotizzato dalla modellizzazione di CORINAIR/COPERT), e ciò nonostante le rilevazioni siano state fatte al banco dinamometrico e non durante l'uso reale del veicolo.

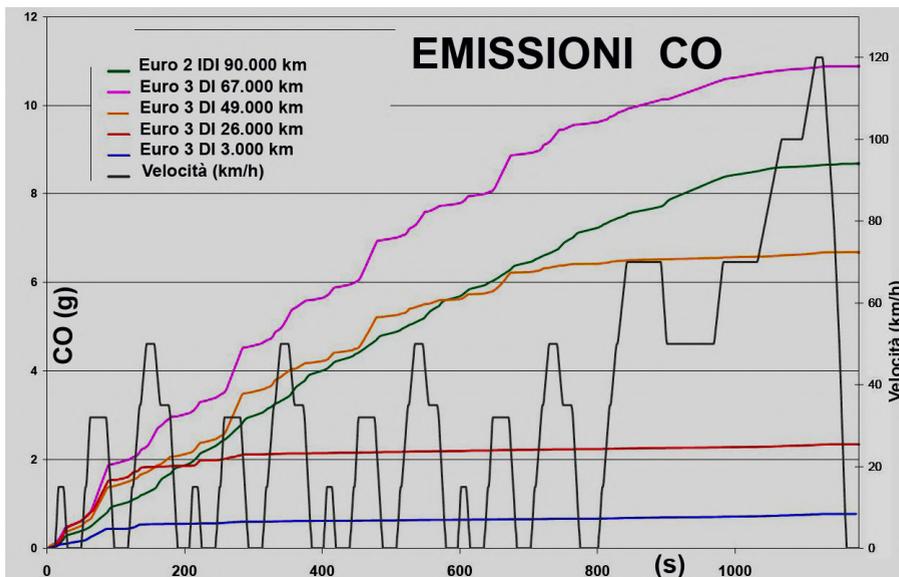


Fig. 4.7 - Emissioni di CO su motori diesel Euro 3 nell'intervallo tra 3000 km e 67.000 km, sul ciclo standardizzato NEDC (fonte: IES, DG-JRC [38])

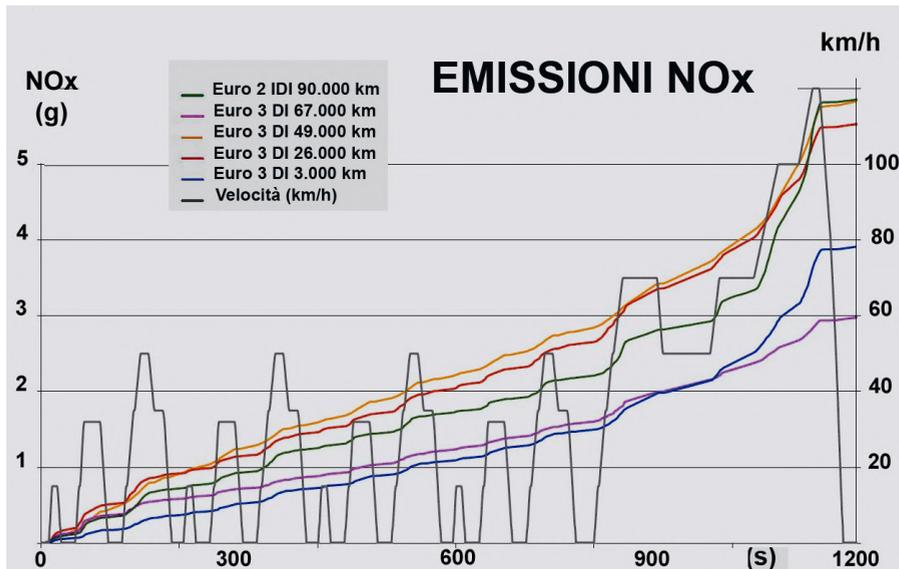


Fig. 4.8 - Emissioni di NOx su motori diesel Euro 3 nell'intervallo tra 3000 km e 67.000 km, sul ciclo standardizzato NEDC (fonte: IES, DG-JRC [38])

4.4.3 *Influenza delle condizioni climatiche sulle emissioni e sui consumi dei veicoli endotermici*

I citati lavori in ambito COPERT e CORINAIR trattano anche la modellizzazione dell'influenza della temperatura ambiente sulle emissioni. I riferimenti [35-37] stimano ad esempio che con motore avviato a 0 °C le emissioni possano aumentare fino a 3,7 volte (a seconda dell'inquinante considerato e del tipo di motore, diesel o benzina, Euro 1 o Euro 4), rispetto a quelle con partenza a 30 °C.

Per quanto riguarda i consumi, alcuni risultati sperimentali sono riportati in Fig. 4.9 per vetture Euro 3 [39]. Va sottolineato che, per ottenere risultati più significativi, le nuove Direttive hanno eliminato, durante le prove di emissione, la fase di preriscaldamento precedentemente prevista per raggiungere lo stato termico ottimale del motore e del catalizzatore, stabilendo in 30 °C la temperatura di avvio. Resta tuttavia il fatto che, nell'uso reale, le emissioni introdotte restano condizionate dall'effettivo rapporto tra avviamenti a freddo e a caldo.

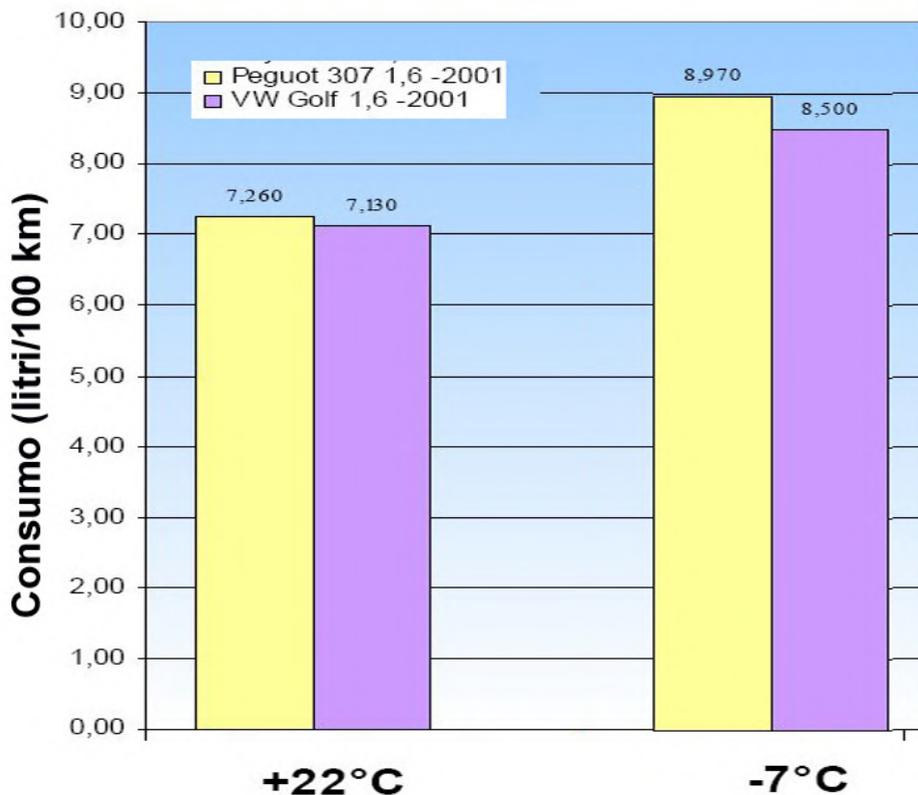


Fig. 4.9 - Consumi di combustibile (in litri/100 km) di veicoli medi a diverse temperature di avviamento (fonte: AVL-MTC [39])

4.4.4 Sintesi dei fattori che influenzano emissioni e consumi dei veicoli endotermici

In conclusione, i dati sopra riportati, sia pure frammentari, convergono verso l'evidenza che, anche se le emissioni (dei composti regolamentati) rilevate durante le certificazioni dei veicoli su ciclo standardizzato sono di regola inferiori ai limiti normativi, i valori rilevati in condizioni reali sotto l'influenza delle variabili considerate, dal tipo di percorso (probabilmente quella con maggior effetto) all'invecchiamento e alle condizioni climatiche, e soprattutto nell'ambito urbano, siano da ritenersi certamente superiori a quelli standardizzati.

La stima quantitativa dell'entità di tali maggiori emissioni è ovviamente assai difficile in mancanza di un quadro sistematico di dati. In prima approssimazione, sulla base di quanto esposto nel presente punto 6, si può comunque assumere che, nell'arco complessivo della vita dei veicoli e con particolare riferimento all'utilizzo nell'ambito urbano – quello di maggior interesse quale possibile ambito applicativo dei veicoli elettrici e ibridi – il limite inferiore delle emissioni sia rappresentato dai limiti normativi, e quello superiore possa raggiungere per alcuni inquinanti anche un multiplo di tali limiti. Tenuto conto che tale comportamento risulta valere per i motori di tutte le generazioni, da Euro 1 ad Euro 4, sembra plausibile che anche i futuri motori Euro 5 (e successivi) non si sottraggano a tali influenze, e che anche le loro emissioni nell'uso reale possano essere comprese tra quelle standardizzate e un multiplo di queste. Tuttavia, in assenza di studi sistematici in materia, e con intento fortemente cautelativo (sfavorevole ai veicoli a tecnologia elettrica), nelle tabelle riepilogative conclusive si assume comunque che le emissioni dei composti inquinanti regolamentati nell'uso reale coincidano, come media nell'arco complessivo della vita dei veicoli, con i limiti Euro 5.

Per quanto riguarda i consumi e le connesse emissioni di CO₂, l'influenza delle condizioni operative reali rispetto ai dati standardizzati è a sua volta evidente e sistematica, anche se quantitativamente più ridotta. Sulla base dei dati disponibili, il maggior consumo e le maggiori emissioni di CO₂ nell'uso urbano (comprensivo dei consumi per la climatizzazione), rispetto ai dati standardizzati, sono compresi tra il 30 e il 40%, con punte che superano l'80%. Ai fini del presente lavoro sembra ragionevole assumere un incremento medio attorno al 35%. L'incremento è più ridotto nell'uso extraurbano, in misura valutabile nel 15%.

4.5 Emissioni e consumi dei veicoli elettrici nell'uso reale

4.5.1 Veicoli a batteria

I consumi di questi veicoli sono molto meno suscettibili alle condizioni di guida e di traffico cittadino rispetto a quelli con motore endotermico, in quanto:

a) il motore elettrico è fermo durante le fermate;

b) è presente la frenatura rigenerativa, che durante le frenate e le decelerazioni consente di recuperare almeno parzialmente in batteria l'energia cinetica del veicolo; se si considera che nel traffico urbano questa può superare il 50% dell'energia complessivamente spesa per la trazione, il risparmio energetico è rilevante.

È perciò da attendersi che i consumi nel traffico reale ne risultino accresciuti, rispetto a quelli su ciclo standardizzato, in misura inferiore a quanto avviene per i veicoli endotermici. I dati rilevati su un parco significativo di furgoni elettrici Citroën *Berlingo*, diffusi in Europa in numero significativo a inizio anni 2000 nell'ambito del Progetto UE Elcidis [40], forniscono, quale media dei consumi effettivi su percorrenze urbane nelle città di LaRocheville, Milano, Stavanger e Stoccolma, un valore attorno ai 340 Wh/km, contro i 275 Wh/km rilevati quale consumo urbano standardizzato [13], con un incremento inferiore al 25%.

Tab. 4.13 - Consumo urbano standardizzato di varie motorizzazioni del furgone Citroen Berlingo II

| <i>Veicolo Citroen Berlingo II</i> | <i>Consumo specifico [kWh/km] (*)</i> |
|--|---------------------------------------|
| <i>14i</i> | <i>0,802</i> |
| <i>16i 16V</i> | <i>0,786</i> |
| <i>19D</i> | <i>0,880</i> |
| <i>20 HDi 90 CV</i> | <i>0,720</i> |
| <i>Electric</i> | <i>0,275</i> |
| <i>(*) dal vettore energetico secondario</i> | |

Le emissioni, sia di CO₂ sia degli agenti inquinanti regolamentati, ne risultano accresciuti in ugual misura, essendo gli stessi provenienti dalla sola centrale elettrica.

A differenza di quanto avviene sui veicoli endotermici, non è inoltre da prevedere alcun aumento dei consumi con l'invecchiamento del veicolo; il componente maggiormente soggetto a degrado è la batteria, il cui invecchiamento si traduce di regola in un decadimento delle prestazioni (autonomia e accelerazione del veicolo, riduzione dell'autonomia) ma non in incrementi di consumo. Nel corso del già citato Progetto Elcidis è anche stata determinata, per il veicolo di cui sopra, l'influenza sui consumi della temperatura ambiente, risultata mediamente in un +20% passando da 20 °C a 4 °C. Va tuttavia sottolineato che tale influenza è fortemente connessa al tipo di batteria utilizzata, ed è particolarmente evidente per quelle con elettrolito acquoso tradizionali.

Per le batterie di tipo avanzato che verrebbero adottate oltre il 2010 in caso di concreta realizzazione di un mercato degli elettrici, l'influenza può essere trascurata; le Na/NiCl, ad esempio, operano a +300 °C e non presentano quindi alcuna suscettibilità alla temperatura ambiente esterna, ed anche la filiera al litio (litio/ioni, litio/polimeri) ha suscettibilità assai modesta.

Va infine considerato che i consumi e le conseguenti emissioni finora esaminate per i veicoli a batteria riguardano esclusivamente quanto attiene alla trazione. Per i veicoli moderni non si può tuttavia prescindere dai consumi degli ausiliari di bordo per la climatizzazione (ventilazione, riscaldamento, condizionamento) e per la sicurezza passiva (sbrinamento, riscaldamento lunotto posteriore). In molti veicoli a batteria attuali le funzioni di riscaldamento e sbrinamento sono affidate a bruciatori a combustibile analoghi a quelli usati per le cabine di guida dei grossi autocarri TIR.

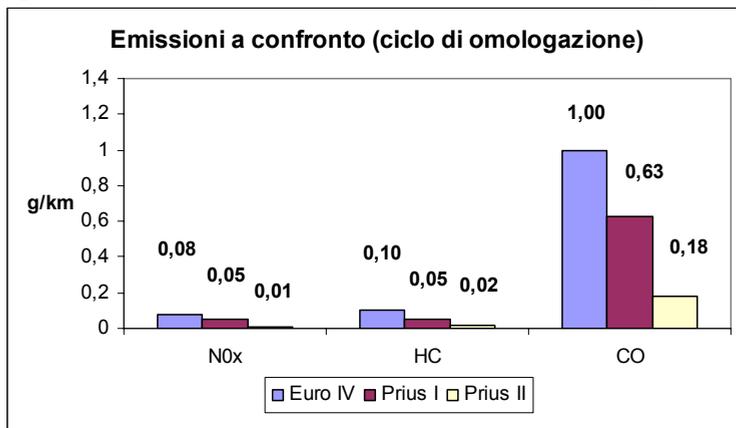
Per una valutazione cautelativa, e considerato anche che questi ultimi dispositivi non provvedono comunque al raffrescamento (aria condizionata), ormai essenziale sui veicoli di oggi, si assume qui che per i futuri veicoli elettrici le funzioni ausiliarie vengano soddisfatte attingendo energia dalla batteria, con un consumo addizionale per la ricarica. Valutazioni su questi aspetti sono state pubblicate dalla VDI [41], ed indicano che per un'autovettura a batteria, con un assorbimento complessivo dei sistemi ausiliari di 1-2 kW, l'incremento dei consumi sarebbe compreso tra il 12% e il 32% di quelli per la trazione, a seconda dell'uso. Nel seguito del presente lavoro si assume una media del 22%, con analogo impatto in termini energetici e ambientali, e a scopo cautelativo, certamente sfavorevole ai veicoli elettrici, si assume parimenti che questi consumi siano sempre presenti in concomitanza con quelli della trazione, e che per i veicoli endotermici questi stessi consumi siano invece trascurabili.

4.5.2 *Veicoli ibridi minimali e mild*

Sia le emissioni che i consumi dei veicoli ibridi già oggi in commercio sono sensibilmente inferiori a quelli dei veicoli endotermici convenzionali. I valori di omologazione per le emissioni risultano infatti attorno al 50-80% di quelli delle auto endotermiche di riferimento (gli NO_x sono quasi dimezzati), ed i consumi inferiori del 25 o 30% (Fig. 4.10).

In merito all'evoluzione nel tempo conseguente all'invecchiamento dei motori mancano ovviamente dati concreti, considerata la diffusione ancora limitata di questi veicoli. Ai fini del presente lavoro, e avendo assunto a scopo cautelativo per gli endotermici convenzionali emissioni medie (nel corso della vita) corrispondenti ai limiti Euro 5, si assumerà corrispondentemente una emissione media attorno al 60% dei limiti Euro 5. Anche i consumi sono sensibilmente inferiori a quelli di veicoli puramente endotermici (mediamente -30% su ciclo standardizzato), ma come per questi permane una sensibile influenza del ciclo, proporzionalmente anche maggiore che per i mezzi endotermici.

Fig. 4.10 - Emissioni a confronto di varie motorizzazioni Toyota Prius



Fonte: Toyota

Ciò appare con maggior evidenza dalle rilevazioni fatte su percorsi reali cittadini [42]), come quelle fatte nell'uso cittadino a Taipei (Taiwan) riportate nella Tab. 4.14, a confronto con i risultati di prove standardizzate: i consumi ne risultano accresciuti fino al 50% e le emissioni di CO di circa 4 volte.

A loro volta, come già visto, le rilevazioni su larga scala del NIES (National Institute for Environmental Studies) in Giappone [34], evidenziano un maggior consumo del +50% circa nel traffico reale, rispetto al +40% dei veicoli puramente endotermici. Va tuttavia sottolineato che detti consumi restano comunque molto inferiori a quelli dei mezzi termici.

Tab. 4.14 - Confronto delle emissioni di vari inquinanti e dei consumi di due veicoli ibridi elettrici misurate in cicli standardizzati e in percorsi reali effettuati nella città di Taipei (Taiwan) (fonte: [42])

| | | Unità di misura | Veicolo A | Veicolo B |
|-----------------------------------|--------------------|-----------------|-----------|-----------|
| Ciclo standard FTP-75 | CO | g/km | 0,03 | 0,02 |
| | NMHC | g/km | 0,009 | 0,005 |
| | NOx | g/km | 0,006 | 0,005 |
| | Consumo | km/litro | 21,3 | 12,7 |
| Misure da percorso reale a Taipei | CO | g/km | 0,12 | 0,09 |
| | NMHC | g/km | 0,043 | 0,014 |
| | NOx | g/km | 0,001 | 0,002 |
| | Consumo carburante | km/litro | 17,8 | 7,3 |
| Media totale consumo combustibile | | km/litro | 18,7 | 9,2 |

4.5.3 Veicoli full-hybrid

Esperienze dirette sui *full-hybrid* sono state condotte in Italia su autobus urbani realizzati da ALTRA/IVECO. I risultati della sperimentazione di questi mezzi [43] testimoniano come essi abbiano emissioni considerevolmente ridotte in conseguenza del regime pressoché stazionario che viene ad assumere il motore termico (Figg. 4.11 e 4.12).

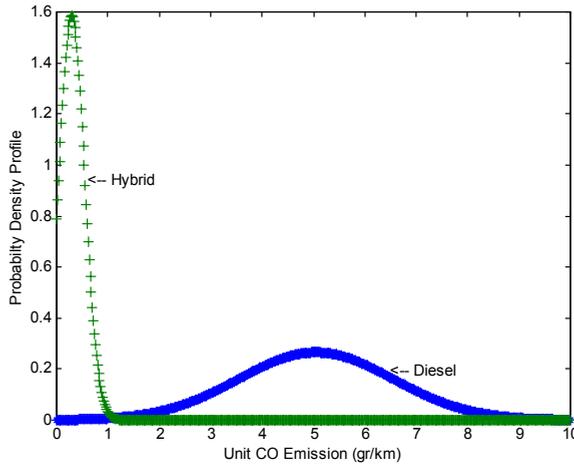


Fig. 4.11 - Emissioni di CO generate da un ALTROBUS da 12 m
Fonte: ENEA [43]

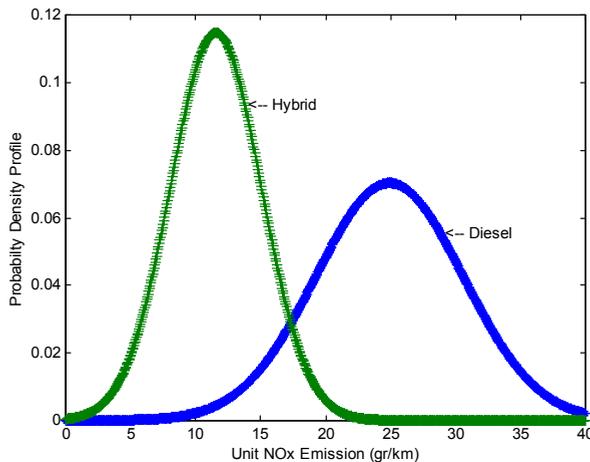


Fig. 4.12 - Emissioni di NOx generate da un ALTROBUS da 12 m
Fonte: ENEA [43]

Dati sulle emissioni di CO₂ di un “full-hybrid” a metano Fiat sono stati ottenuti nel corso del progetto ATENA [44]. In Tab. 4.15 è riportato il confronto con le equivalenti versioni a benzina e a metano, dal quale risulta che emissioni e consumi sono mediamente inferiori al 70% di quelle del mezzo a benzina, e che i consumi reali sono superiori a quelli di omologazione del 20% circa.

Tenendo conto che la motorizzazione termica è in funzione come per i normali veicoli puramente endotermici, non sono da assumersi per i *full-hybrid* consumi addizionali per le funzioni di climatizzazione.

Tab. 4.15 - Confronto delle emissioni di CO₂ di un veicolo “full-hybrid” a metano Fiat con le equivalenti versioni endotermiche a benzina e a metano (fonte: [44])

| <i>CO₂ (g/km)</i> | <i>Veicolo a benzina</i> | <i>Veicolo a gas naturale</i> | <i>Veicolo ibrido a gas naturale</i> |
|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Su ciclo NEDC</i> | 200 | 160 | 135 |
| <i>Su ciclo ECE a regime termico</i> | 223 | 180 | 120 |
| <i>In uso urbano reale su strada</i> | 245 | 203 | 164 |

4.5.4 Veicoli ibridi “plug-in”

In assenza di esperienze significative su prodotti effettivamente realizzati, gli studi esistenti presentano prevalentemente carattere di modellizzazione indirizzata all’ottimizzazione del sistema. I lavori del NREL, [45, 46], sembrano evidenziare una sensibilità al ciclo di percorrenza anche maggiore di quella dei veicoli endotermici convenzionali. Con riferimento alla situazione italiana, assumendo in prima approssimazione l’ipotesi di utilizzazione “media”⁽⁶⁾, sembra ragionevole ipotizzare, per gli ibridi “plug-in”, che la frazione di consumi ed emissioni pertinente alla motorizzazione endotermica ne risulti aumentata quanto per i veicoli endotermici, e la frazione elettrica quanto per quelli a batteria.

Una ripartizione analoga può assumersi anche per quanto riguarda i consumi degli ausiliari di climatizzazione. Per quanto riguarda le emissioni di inquinanti regolamentati, si assume a scopo cautelativo che le loro emissioni siano poco dissimili da quelle degli ibridi minimali.

(6) Si assume una utilizzazione “media” che conduca a una ripartizione paritetica del flusso energetico (metà del consumo speso su percorsi urbani a emissioni zero con energia proveniente dalla sola batteria ricaricata dalla rete, e metà su percorsi con alimentazione a combustibile in funzionamento ibrido minimale e mantenimento dello stato di carica della batteria).

4.5.5 Sintesi dei fattori che influenzano emissioni e consumi dei veicoli elettrici e ibridi

Il quadro complessivo dei fattori che modificano emissioni e consumi dei veicoli elettrici evidenzia che l'influenza del ciclo di percorrenza è assai più ridotta che per i mezzi endotermici. L'incremento dei consumi nell'uso reale per i mezzi a batteria è stimabile al più in un +25%⁽⁷⁾ (contro il +35% di quelli puramente endotermici), e per quelli "full-hybrid" in un +20%. Per i "plug-in" sembra ragionevole assumere un analogo incremento per la frazione di consumo elettrico e per quella endotermica (complessivamente, un incremento medio del 23%).

Non vi è inoltre un apprezzabile decadimento per invecchiamento della parte elettrica. Per contro, per i mezzi a batteria risulta importante l'incremento di consumi per climatizzazione e sistemi ausiliari di bordo, che incidono mediamente per un +22%. Ovviamente, le emissioni dei sistemi a batteria e dei "plug-in" (per la frazione di consumo elettrico) ne risultano aumentate in misura esattamente equivalente.

In merito alle emissioni di inquinanti regolamentati, i dati disponibili per i "full-hybrid" indicherebbero emissioni considerevolmente ridotte, congruamente con le rilevazioni fatte su gli ibridi in commercio, che sembrano presentare emissioni dell'ordine della metà di quelli puramente endotermici. Per contro, gli ibridi in commercio, proprio in relazione al limitato dimensionamento della parte elettrica, sono ancor più sensibili dei mezzi endotermici al tipo di percorso, con consumi medi incrementati nell'uso reale del +50%; ai fini del presente lavoro si assume cautelativamente un incremento del consumo urbano del +40%.

Tab. 4.16 - Incremento dei consumi urbani reali rispetto a quelli standardizzati in vari tipi di veicolo

| <i>Veicolo</i> | <i>Incremento dei consumi urbani reali rispetto a quelli standardizzati</i> | <i>Incremento dei consumi per la climatizzazione</i> | <i>Incremento totale</i> |
|--------------------------------|---|--|--------------------------|
| <i>Diesel, Benzina, Metano</i> | +35% | +0%, cautelativamente | +35% |
| <i>Mild hybrid</i> | +40% | +0%, cautelativamente | +40% |
| <i>Batteria</i> | +25% | +22% | +52% |
| <i>Ibridi plug-in</i> | +23% | +11% | +36% |

(7) Assumendo in via cautelativa che tale valore, valido per la tecnologia attuale, non venga migliorato da ulteriori perfezionamenti della trazione elettrica a breve termine.

4.6 Altre forme di emissione dei veicoli endotermici ed elettrici

4.6.1 *Particolato dovuto al rotolamento degli pneumatici e ad altre sorgenti*

È considerazione recente che, in aggiunta alle emissioni di particolato proveniente dalla combustione, soprattutto dei motori diesel, vi è produzione dello stesso per l'usura di pneumatici, freni, frizioni e dell'asfalto stradale.

L'entità di queste emissioni è ancora oggetto di investigazioni. Alcune fonti ARPA le stimano orientativamente attorno al 20% del particolato complessivo della motorizzazione stradale; secondo fonti norvegesi, peraltro riferite ai pneumatici chiodati normalmente usati in tali aree geografiche nei periodi invernali [47], il contributo di PM10 dovuto all'usura dei pneumatici di un'autovettura arriverebbe a 3,4 kg per ogni milione di chilometri di percorrenza (il PM2,5 sarebbe invece trascurabile), mentre l'usura dei freni contribuirebbe per 6 kg di PM10 e 6 kg di PM2,5 per milione di km. Su queste basi, ogni km di percorrenza produrrebbe circa 0,015 grammi di particolato sottile, quindi molto superiore ai limiti Euro 5.

Tuttora oggetto di investigazione sono anche gli effetti di questo particolato, che per le sue caratteristiche e composizione chimica potrebbe avere per la salute umana una pericolosità differente da quella dovuta al particolato carbonioso dei motori.

Per questa serie di incertezze il presente lavoro non considera per il momento queste emissioni. Tenuto conto che le stesse interessano ovviamente tutte le tipologie di motorizzazione – inclusi gli elettrici – tale omissione non inficia comunque i termini del confronto tra le diverse tecnologie.

4.6.2 *Gli inquinanti non regolamentati*

Un problema frequentemente sollevato in bibliografia riguarda il fatto che le nuove tecnologie endotermiche appaiono progettate per ridurre esclusivamente, o quasi, le emissioni dei composti regolamentati dalla vigente legislazione (oltre che i consumi e le emissioni di CO₂).

Si pone allora la domanda di quanto accada per i numerosi altri composti non ancora oggetto di regolamentazione per le emissioni veicolari ⁽⁸⁾, in particolare i composti organici tossici e i precursori dell'ozono, per i quali gli studi epidemiologici e tossicologici evidenziano una forte influenza sulla salute umana.

(8) Quali formaldeide, 1.3-butadiene, toluene, propano, benzene, acetaldeide, diossine, composti policromatici ecc. Sono composti non normati dalle Direttive sulle emissioni veicolari, ma comunque normati in termini di qualità dell'aria (concentrazioni limite): i valori limiti attuali sono ad esempio di 5 mg/m³ per il benzene e di 2,5 mg/m³ per l'1.3-butadiene.

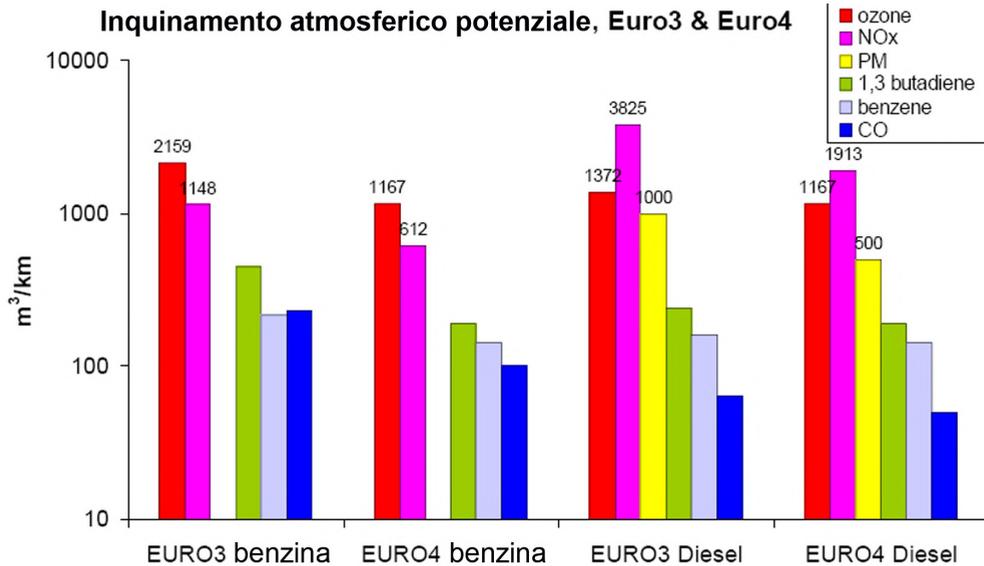


Fig. 4.13 - Potenziale di inquinamento atmosferico da sostanze non regolamentate emesse da veicoli Euro 3 ed Euro 4 a benzina e gasolio (fonte: JRC, [48])

Uno studio del JRC di Ispra [48] evidenzia che 1 km di percorrenza di un solo veicolo Euro-3 ed Euro-4 immette tali composti in quantità sufficiente a raggiungere le concentrazioni limite su migliaia di m³ di aria. Il problema si pone in misura più o meno importante per tutti i combustibili, inclusi quelli considerati “puliti”: secondo valutazioni dell’ITEC [49] il potenziale di rischio cancerogeno, proprio a causa di tali composti, sarebbe oltre 10 volte maggiore per i veicoli a metano che per i veicoli a motore diesel. Va da sé che il problema non si pone invece per le motorizzazioni elettriche, e risulta ridotto per quelle ibride in misura proporzionale al livello di “elettrificazione”.

4.6.3 Emissioni di SO₂ degli impianti di generazione termoelettrica

Come visto nelle sezioni precedenti, i livelli di emissioni dei composti regolamentati dalle Direttive sulla motorizzazione veicolare (NO_x, CO) introdotti nell’atmosfera dalla generazione termoelettrica, risultano di fatto contenuti nei limiti Euro 5, e la loro ricaduta al suolo nelle aree urbanizzate li diluisce ulteriormente a livelli sostanzialmente trascurabili.

Una considerazione a parte va tuttavia fatta per quanto riguarda le emissioni di SO₂ delle centrali, non regolamentate dalle Direttive UE sulla motorizzazione. Anche per questo composto il valore immesso nell’atmosfera è (all’orizzonte 2010) assai modesto (< 0,065 g/km nel caso di veicoli a batteria e circa la metà per gli ibridi plug-in) e la ricaduta al suolo in territorio urbano pressoché nulla.

Tuttavia, poiché l'SO₂ ha varie ripercussioni sull'ecosistema, è necessario che nelle comparazioni di impatto delle diverse tecnologie veicolari se ne tenga opportunamente conto, come in effetti viene fatto dalla metodologia di confronto "Eco-punteggio" proposta da CIVES (Commissione Italiana Veicoli Elettrici Stradali) nei lavori [50] e [54].

4.6.4 Emissioni acustiche

Un vantaggio delle motorizzazioni elettriche, importante soprattutto in città, risiede come noto nel basso livello di emissione. Rilevazioni del TUV [8] indicano che le emissioni acustiche nell'uso urbano si collocano mediamente 5-6 dB(A) al di sotto di quelle dei veicoli endotermici, equivalenti a una potenza acustica 3-4 volte più bassa.

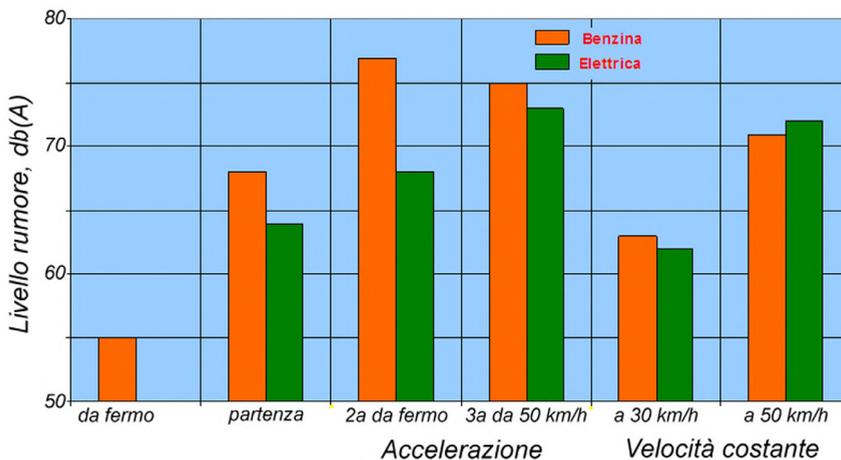


Fig. 4.14 - Confronto delle emissioni acustiche fra un veicolo a benzina ed uno elettrico
(fonte: TUV [8])

4.6.5 Emissioni elettromagnetiche

Rilevazioni sulle emissioni dei mild-hybrid dell'attuale generazione, condotte in fase di omologazione e riportati da [39], evidenziano livelli contenuti nel limite dei 6 microTesla previsti dalla normativa in vigore.

Per i veicoli a batteria una campagna di misure di ENEL e CESI - Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano [51, 52] condotta negli anni '90 ha a sua volta confermato che, già per quella generazione di veicoli, sia i livelli di emissione sia la suscettibilità ai campi esterni, risultavano del tutto conformi ai vincoli normativi.

4.7 Considerazioni sul ricorso ai biocarburanti e ai carburanti sintetici

In aggiunta alle tecnologie fin qui esaminate, gli scenari collocati ad un orizzonte più lontano considerano il ricorso ai bio-carburanti, ai carburanti sintetici e all'idrogeno.

In merito ai primi, uno studio recente di EUCAR-CONCAWE-JRC [53], sembra evidenziare che la conversione delle biomasse in bio-carburanti convenzionali (etanolo e bio-diesel) è in molti casi poco efficiente in termini energetici, nel senso che i processi per la loro produzione richiedono più bio-energia di quanta energia fossile tali combustibili permettono di risparmiare, anche se entrambi conducono comunque a un risparmio di prodotti petroliferi. L'abbattimento di gas serra è relativamente modesto per l'etanolo (rispetto alla benzina), ed è invece buono per il bio-diesel rispetto al gasolio da petrolio. In linea di principio, la produzione potenziale in Europa di biomasse da destinare ai bio-combustibili potrebbe coprire il 10% dei bisogni per la mobilità stradale.

Il gasolio sintetico ricavato da fonti fossili presenta invece una minor efficienza energetica e maggiori emissioni di gas serra rispetto ai combustibili convenzionali.

Particolarmente interessante, in conclusione del citato lavoro di EUCAR (Fig. 4.15), è che l'utilizzo più razionale del territorio si otterrebbe destinando la produzione delle biomasse non alla produzione di biocombustibili ma alla produzione di energia elettrica.

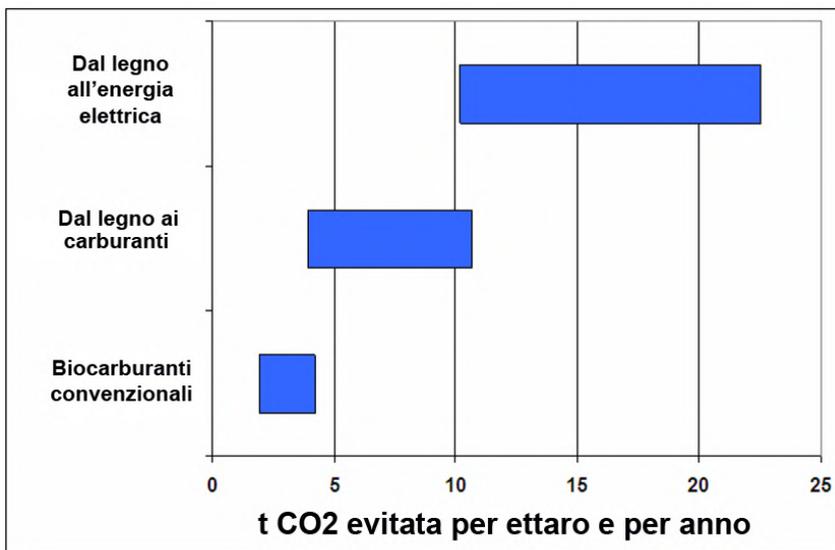


Fig. 4.15 - Confronto tra le emissioni di CO₂ evitate utilizzando, in sostituzione dei carburanti prodotti con combustibili fossili, biocombustibili convenzionali, biocombustibili nuovi, biomasse per la generazione elettrica (fonte: EUCAR, Concave, JRC [53])

In quest'ultimo caso infatti il risparmio di gas serra si aggirerebbe annualmente sulle 10-20 tCO₂eq per ettaro di territorio contro le 2-10 tCO₂eq nel caso di produzione di biocombustibili. Su queste basi resterebbe preferibile l'utilizzo di veicoli elettrici.

A titolo orientativo [54], l'impegno di territorio necessario per la percorrenza di 15.000 km/anno di un'autovettura a bioetanolo ottenuto da granturco sarebbe di circa 3000 metri quadri, con un consumo annuo di acqua di circa 500.000 litri; per un'auto a biodiesel ottenuto da girasoli occorrerebbero analogamente 12.000 metri quadri di territorio e 1.500.000 litri annui di acqua. Per confronto, un'auto elettrica alimentata da pannelli fotovoltaici dell'attuale generazione impegnerebbe viceversa solo 20-30 metri quadri di superficie.

4.8 Confronto complessivo delle emissioni e dei consumi in condizioni d'uso reale

Sulla base dei fattori correttivi esaminati nel precedente paragrafo, in particolare per quanto riguarda l'utilizzazione urbana dei veicoli, il quadro di confronto complessivo delle tipologie considerate ne risulta modificato come indicato in dettaglio nella successiva Tab. 4.17.

È da sottolineare che il quadro presentato è, con intento cautelativo, meno favorevole ai veicoli con tecnologia elettrica di quanto non sia presumibilmente in realtà, per le seguenti ragioni:

a) si assume che le emissioni reali su strada dei veicoli endotermici corrispondano ai limiti imposti dalle Direttive UE, mentre l'evidenza indica valori oggettivamente più elevati; questa scelta è stata fatta per l'impossibilità di definire un limite superiore alle emissioni reali;

b) si assume che nei veicoli elettrici siano sempre presenti i consumi per la climatizzazione (riscaldamento e raffrescamento) in aggiunta a quelli per la trazione, mentre nell'uso pratico non è evidentemente così.

Dal confronto effettuato su queste basi emerge in definitiva quanto segue:

- il consumo di energia primaria per i veicoli a batteria è compreso tra il 50% e il 60% di quello delle tipologie endotermiche non ibride, e attorno al 60-70% di quello dei *mild-hybrid*;
- il consumo dei "plug-in" è dell'ordine del 70% di quello dei *mild-hybrid* che usano lo stesso carburante;
- resta valido il quadro della dipendenza dagli idrocarburi di cui al punto 4.3.3, dal quale appare che all'orizzonte del 2010 i veicoli a batteria dipenderanno solo per il 6% del proprio fabbisogno energetico dal petrolio e per il 30% dal gas;
- le emissioni di gas serra dei veicoli a batteria sono attorno al 30% di quelle delle tipologie endotermiche non ibride e al 40% di quelle *mild-hybrid*;

Tab. 4.17 - Emissioni nell'atmosfera (CO₂ ed emissioni regolamentate per i veicoli) ed emissioni al suolo delle diverse motorizzazioni (tab. 4.18) alla guida di un'auto (dati 2010), nell'uso reale dei veicoli su strada in ambito urbano

| Veicolo (anno 2010) | Consumo energia primaria uso urbano reale (Wh/km) (1) | CO ₂ eq uso urbano reale (g/km) | Dipendenza dalle fonti Fossili | Ricorso ai prodotti petroliferi (2) | Emissioni al suolo (g/km) (3) | | | |
|-------------------------------|--|--|--|---|----------------------------------|---------|--------------------------|-----------------|
| | | | | | CO | HC | NOx | PM |
| Diesel | 770 | 220 | Petrolio | 93% | ≥ 0,50 | / | ≥ 0,20 | ≥ 0,005 |
| Benzina | 800 | 230 | Petrolio | 83% | ≥ 1,00 | ≥ 0,075 | ≥ 0,06 | / |
| Metano | 900 | 200 | Gas | 83% | ≥ 1,00 | ≥ 0,075 | ≥ 0,06 | / |
| Mild-hybrid diesel | 680 | 180 | Petrolio | 79% | ≥ 0,30 | / | ≥ 0,15 | ≥ 0,005 |
| Mild-hybrid benzina | 740 | 200 | Petrolio | 75% | ≥ 0,65 | ≥ 0,050 | ≥ 0,04 | / |
| Mild-hybrid metano | 700 | 170 | Gas | 62% | ≥ 0,65 | ≥ 0,050 | ≥ 0,04 | / |
| Plug-in hybrid | 470-570 (5) | 75-120 | 60% petrolio + 20% gas + 10% carbone | 39-42% petrolio +13-14% gas (4) | ≥ 0,25 | / | Da 0,03 a 0,10 (5) | 0÷0,0025 (5) |
| Batteria (Ni/NiCl o Litio) | ≤ 470 | ≤ 75 | 10% petrolio + 52% gas + 12% carbone | 6% petrolio + 30% gas | Circa 0 | Circa 0 | Circa 0 | Circa 0 |

(1) Well-to-wheels, uso urbano, inclusi consumi per climatizzazione
(2) Consumo di prodotti petroliferi in rapporto a quelli dei veicoli convenzionali della tecnologia odierna
(3) Limiti della Direttiva Euro 5; i valori reali per i veicoli endotermici possono essere mediamente superiori
(4) Rispetto a un diesel a tecnologia odierna
(5) A seconda della motorizzazione endotermica (benzina/metano o diesel)

- le emissioni di gas serra dei veicoli plug-in sono attorno al 40-60% di quelle delle tipologie endotermiche non ibride e al 50-70% di quelle *mild-hybrid*;
- le emissioni al suolo di inquinanti regolamentati dovuti alla motorizzazione sono praticamente nulle per i veicoli a batteria; inoltre le quantità immesse nell'atmosfera sono comunque contenute nei limiti Euro 5 imposte per la motorizzazione. Restano a carico degli elettrici solo le emissioni di particolato dovute all'usura dei pneumatici, analogamente a tutte le altre tipologie di veicoli;
- le emissioni dei veicoli plug-in durante l'utilizzo con motore termico inserito sono stimabili nella metà di quelle dei veicoli puramente endotermici, e sono invece nulle durante il funzionamento in puro elettrico;
- per gli elettrici a batteria e per i plug-in nel funzionamento a batteria sono del tutto esenti le emissioni di composti inquinanti non regolamentati;
- le emissioni acustiche degli elettrici a batteria, e dei plug-in durante il funzionamento a batteria, sono nell'uso urbano inferiori di 5-6 dB(A) a quelle dei veicoli endotermici, equivalenti ad una potenza acustica 3-4 volte inferiore.

Per un confronto della ecostenibilità complessiva delle diverse alternative, espresso sinteticamente in termini quantitativi, si vedano anche i lavori CEI-CIVES rif. [50, 54].

Riferimenti bibliografici

- [1] EUCAR - CONCAWE – JRC Research Centre of European Commission: *Final Report on Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and associated powertrains in the European context*, October 2003
- [2] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio: *Il Piano Nazionale per la riduzione delle emissioni di gas responsabili dell'effetto serra: 2003-2010*, anno 2002
- [3] G. De Michele (ENEL Ricerca): *Il carbone nella produzione di elettricità: oggi, domani e dopodomani*, 2004
- [4] P. Chiesa, S. Campanari (Politecnico Milano, Dipartimento di Energetica) – CE-SI: *Studi di scenario al 2030 sulle tecnologie per il parco elettrico italiano - Stato dell'arte ed evoluzione delle tecnologie avanzate per la pura generazione elettrica*, 2004
- [5] ENEL: *Rapporto Ambientale 2004*
- [6] EDISON: *Rendiconto ambientale e della sicurezza 2003*

- [7] A. Goubeau, R. Heuser, N. Metz (BMW), B. Nierhauve (ARAL), B. Sporkmann (RWE-UNIPED): *Comparison of emissions from combustion-engined and European electric vehicles*, EVS-18, 1997
- [8] *Electric Vehicles: Chance for Environment and Quality of Life*. Studio del TUV per il Programma UE Thermie, 1994.
- [9] INRETS - Institut National de Recherche sur les Transports et la Sécurité, *UE Action COST-319*, 1999.
- [10] P. Van Den Bossche, E. De Bisschop (CITELEC): Progetto UE Thermie E.V.D. Belgian Post, *Measurements performed in Belgium on February-March 2000*
- [11] J. Matheis, W. Van Autenboer, J.M. Timmermans, J. Van Mierlo, G. Maggetto, S. Meyers, A. De Groof, P. Van Den Bossche (VUB, Brussels): Project UE SUBAT, *Comparative Sustainability Assessment of Electric Vehicle Traction Batteries using LCA*, 2005
- [12] CIVES – Commissione Italiana Veicoli Elettrici a Batteria, Ibridi e a Celle a Combustibile: *Libro Bianco sull'Auto Elettrica*, 2006
- [13] Citroën Filiale Italia: *Risultati delle prove di omologazione europea del veicolo Berlingo II*
- [14] R. Graham (EPRI): *Comparing the Benefits and Impact of Hybrid EV Options*, Report EPRI 1000349, 2003
- [15] M. Duvall (EPRI): *An Assessment of Advanced Batteries for Plug-in hybrids and Battery Electric Vehicles*, Report EPRI 1001577, 2003
- [16] B. Jeanneret (INRET France): *Plug in Hybrids environmental prospect*, EURELECTRIC Workshop on The Role of Electricity in Meeting Energy Demand, Brussels, 2006
- [17] M.P. O'Keefe, T. Markel (National Renewable Energy Laboratory, USA): *Dynamic Programming Applied to Investigate Energy Management Strategies for a Plug-in HEV*, EVS-22, International Electric Vehicle Symposium, Yokohama, 2006
- [18] J. Gonder, A. Simpson (National Renewable Energy Laboratory, USA): *Measuring and Reporting Fuel Economy of Plug-in HEV*, EVS-22, International Electric Vehicle Symposium, Yokohama, 2006
- [19] D. Santini (Argonne National Laboratory, USA), M. Duvall (Electric Power Research Institute, USA), Valerio Conte (Arsenal Research, Austria), M. Alakula (Lund University, Austria), F. Badin (INRETS, France), R. Blejs (EdF, France), A. Brouwer (SenterNovem), P. Debal (VITO, Belgium): *Global prospects of plug-in hybrids*, EVS-22, International Electric Vehicle Symposium, Yokohama, 2006

- [20] UE Extern-E Project: Final report, DG 12, "Extern E Costs of Transport", 1997.
- [21] CEC - COST 302: *Technical and economic conditions for the use of electric road vehicles in Europe – Final Report*, EUR 11115, 1987
- [22] C. Pertot, G. Pirovan, G.M. Riva (CESI – Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano, BU Studi Territoriali ed Ambientali): *Inventari delle emissioni in atmosfera nelle aree urbane, anno 2004*
- [23] Michail Rantik, KFB, *Life Cycle Assessment of Five Batteries for Electric Vehicles under Different Charging Regimes*, 1999.
- [24] Autorità per l'Energia: *Quadro economico ed energetico nazionale – Domanda e offerta di energia nel 2004, Capitolo 2*, 2005
- [25] EU-EUROSTAT: *Energy, transport and environmental indicators - 1991-2001*, ISBN 92-894-7529-3, 2004
- [26] OECD Environmental Policy Committee WG on Transport – ECMT Group on Transport and the Environment: *Reducing NOx Emissions on the Road*, European Conference of Ministers of Transport, 2006
- [27] <http://www.dieseln.net/standards/eu/ld.html>: *EURO Emission Standards, Background*, 2004
- [28] P. Debal (VITO, Belgium): *On-Road Real Life Emission Behaviour of Low Emitting Vehicles*, JRC Euro-5 Conference, 2003
- [29] L. Pelkmans, G. Lenaers, P. Debal (VITO, Belgium), T. Hood (MIRA, UK), G. Hauser (CLE, Germany), M.R. Delgado (IDIADA, Spain): *Comparison of Fuel Consumption and Emissions of Modern Light Duty Vehicles in the EU vs Real World Driving*, FISITA World Automotive Congress, 2004
- [30] G. Lenaers (VITO, Belgium): *An On-board Emission Measuring System for Euro 4 and Beyond*, JRC Euro-5 Conference, 2003
- [31] H. Johansson (Swedish National Road Administration): *Test Approval Based on Real World Driving*, JRC Euro-5 Conference, 2003
- [32] I. Guerin (AEGPL Automotive Commission, France): *Autogas, the Environmental Bridge to the Future*, JRC Euro-5 Conference, 2003
- [33] E.K. Nam, A. Christine, A.Gierczak, J.W. Butler (Ford Scientific Research Laboratory): *A comparison of Real-World and Modeled Emissions under Conditions of Variable Driver Aggressiveness*, TRB Annual Meeting, 2003
- [34] Y. Kudoh (AIST, Japan), K. Matsushashi, Y. Kondo, S. Kobayashi, Y. Moriguchi (NIES, Japan), H. Yagita (Nippon Institute of Technology): *Statistical analysis of fuel consumption of hybrid electric vehicles in Japan*, EVS-22, International Electric Vehicle Symposium, Yokohama, 2006

- [35] L. Ntziachristos, P.M. Turlou, Z.Samaras, S. Geivanidis, A. Andrias (European Environmental Agency, Topic Centre on Air and Climate Change): *National and central estimates for air emissions from road transport*, 2002, ISBN 92-9167-416-8
- [36] CORINAIR, Group 7 Road Transport: *Emission Inventory Guidebook*, 2002
- [37] P. Ahlvik (MTC), S. Eggleston (AEA), N. Gorissen, K.H.Zierock (UBA), D. Hassel (TUV), L. Ntziachristos, Z. Samaras (LAT), R. Rijkeboer (TNO): *COPERT II Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport – Methodology and Emission Factors*, European Environmental Agency 1997
- [38] G. Martini, A. Krasenbrink, U. Manfredi, M. Sculati, R. Colombo, G. De Santi (IES, DG-JRC, Ispra): *Analysis of emission data of diesel vehicles*, JRC Euro-5 Conference, 2003,
- [39] D. Bauner (AVL MTC, Sweden): *Validation of test methods for light-duty hybrids electric vehicles*, JRC Euro-5 Conference, 2003
- [40] EU - DG TREN, Project ELCIDIS – Electric Vehicle City Distribution: *ELCIDIS Final Report*, report TR-0048/97, 2002
- [41] H.H. Braess: *Fahrzeugtechnik der Elektro-Pkws - Problembereich und Lösungsansätze*, VDI Bericht 985, 1992
- [42] Jet P.H. Shu (Industrial Technology Research Institute, Taiwan): *The hybrid vehicle fuel efficiency study on the city drive test*, EVS-22, International Electric Vehicle Symposium, Yokohama, 2006
- [43] Roberto Ragona, Antonino Genovese (ENEA, SIRE/TRAMO), *Experimentation of Hybrid Buses*, 10th International Symposium “Transport and Air Pollution”, September 17-19, 2001 – Boulder, Colorado USA
- [44] Centro Ricerche FIAT: *Single Shaft Parallel Hybrid CNG Engine based – FIAT Multipla Gasdriver*, 2003
- [45] J. Gonder, A. Simpson (National Renewable Energy Laboratory, USA): *Measuring and Reporting Fuel Economy of Plug-in HEV*, EVS-22, International Electric Vehicle Symposium, Yokohama, 2006
- [46] M.P. O’Keefe, T. Markel (National Renewable Energy Laboratory, USA): *Dynamic Programming Applied to Investigate Energy Management Strategy for Plug-In HEV*, EVS-22, International Electric Vehicle Symposium, Yokohama, 2006
- [47] Statistic Norway: *Utslipp til luft av partikler i Norge*, Rapporten 2003/15
- [48] B. Larsen (IES, DG - JRC Ispra): *Toxic organic compounds and ozone precursors VOCs – Issues for Euro Vin Engine Exhaust*, JRC Euro-5 Conference, 2003

- [49] W.J. Slodowske (International Truck and Engine Corporation): *School Bus Emission Study*, 9th Diesel Engine Emission Reducing Conference, SAE Paper 2003-01-1381, 2003
- [50] P. Menga (CIVES), M. Ceraolo (Pisa University): *An evaluation of global environmental and energy value of vehicle technologies*, Geneva, EET Conference 2008
- [51] A. Buonarota, P. Menga (ENEL), R. Bucciante, A. Manara (CESI): *Electromagnetic Impact of the Electric Vehicle*, IEC TC69 WG4, 1995
- [52] P. Menga (ENEL), R. Bucciante, U. Colombo, A. Manara (CESI): *Il veicolo elettrico e l'ambiente elettromagnetico*, IEC TC69 WG4, 1995
- [53] JRC- CONCAWE - EUCAR: *Well-to-wheels assessment of alternative fuels in the European context*, 2007
- [54] P. Menga (CEI-CIVES): *Behind the words "Sustainable vehicle"*, Brussels, 26-28 May 2009, Conference Sustainable Development – A challenge for European Research.
- [55] M. André: *The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions*. Science of The Total Environment 334-335, 73-84. ISSN 0048-9697, 2004.

Parte II
Tecnologie e componenti

CAPITOLO 5

I MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA NEI VEICOLI IBRIDI

Leone Martellucci, Enrico Sciubba

Università di Roma "La Sapienza"

5.1 Introduzione

Per quanto innovativa, l'efficienza e l'affidabilità della tecnologia dei sistemi di propulsione ibridi termico-elettrici si basa sempre in buona parte sulla bontà del motore a combustione interna (c.i.) impiegato, di cui estende peraltro le potenzialità come nel caso del turbogas. La tecnica motoristica "classica" quindi, lungi dal ritenersi sminuita dallo sviluppo di questa nuova tematica, deve al contrario considerare come le problematiche specifiche dei sistemi di propulsione ibridi per autoveicoli offrano ampio spazio alla ricerca ed all'innovazione, come di seguito cercheremo di illustrare.

5.2 Generalità sul funzionamento del motore a combustione interna nelle diverse tipologie di ibridi

In un sistema di propulsione tradizionale il motore a c.i. è l'unico convertitore di energia a bordo dedicato alla trazione e di conseguenza dal suo dimensionamento conseguono le prestazioni del veicolo; tipicamente un dimensionamento di massima della potenza di un motore per autotrazione e del cambio di velocità viene effettuato sulla base della velocità e dell'accelerazione massime desiderate, nonché della massima pendenza superabile.

L'ampiezza del campo di funzionamento del motore a c.i. sia in termini di regime di rotazione che di carico impone scelte progettuali e di ottimizzazione particolarmente impegnative; si aggiunga inoltre che i cicli di guida standard previsti dalle procedure di omologazione (ciclo NEDC per l'omologazione europea) in relazione al rispetto dei limiti per le emissioni inquinanti risultano pesantemente vincolanti e condizionano direttamente la messa a punto del motore stesso e dei relativi piani quotati.

Buona parte di questi condizionamenti, tradizionalmente presenti in qualunque sistema di trazione automobilistico, cessano di sussistere nel caso l'architettura del propulsore sia di tipo ibrido; qui nel seguito si considereranno gli schemi ibridi di tipo termico-elettrico.

I flussi di energia in un sistema di propulsione tradizionale sono caratterizzati da un passaggio diretto, per via interamente meccanica, della potenza generata dal motore a combustione interna alle ruote di trazione; solo una minima parte della potenza generata dal motore a combustione interessa il sistema elettrico di bordo, costituito dagli ausiliari e dall'accumulatore elettrochimico.

I sistemi di propulsione ibridi modificano notevolmente, sia che essi siano tipo serie, tipo parallelo o serie-parallelo, l'andamento dei flussi energetici a bordo, liberando il motore a c.i., in tutto o in parte, dal vincolo della missione affrontata.

5.2.1 *Sistemi di propulsione ibridi serie*

Come già visto nei capitoli precedenti, il sistema ibrido tipo "serie" nasce storicamente (e concettualmente) dalla volontà di risolvere il problema della bassa autonomia in un veicolo totalmente elettrico mediante l'aggiunta a bordo di un gruppo elettrogeno con motore endotermico (o con cella a combustibile); la trazione è quindi totalmente elettrica. Il motore termico è svincolato da qualsiasi funzione di trazione ed opera praticamente "a punto fisso" (salvo possibili lievi variazioni del regime di rotazione e del carico in relazione allo stato di carica del sistema di accumulo elettrochimico).

La condizione preferenziale è ovviamente quella di far funzionare il motore a c.i. nel punto di consumo specifico minimo; il gruppo elettrogeno è dimensionato generalmente per la potenza media richiesta. Occorre però precisare che in un'applicazione automobilistica non è certo agevole quantificare la potenza media impiegata, data la grande variabilità tipica delle missioni di guida reali; è proprio questa difficoltà di quantificazione che porta a prevedere una certa possibilità di regolazione della potenza erogata dal gruppo elettrogeno al fine di non sfruttare (e stressare) eccessivamente il pacco di accumulo. Conseguenza di ciò è che non si potrà parlare a rigore di punto di funzionamento, ma piuttosto di area. Tale area è naturalmente molto più circoscritta di quella utilizzata tipicamente in un sistema di propulsione tradizionale (o anche di un ibrido parallelo) e ciò apre quindi la strada ad una più mirata ottimizzazione dei principali parametri motoristici per ridurre ulteriormente il consumo specifico e le emissioni inquinanti.

I flussi energetici in un ibrido serie sono caratterizzati dalla totale conversione dell'energia meccanica prodotta dal motore termico in energia elettrica; quest'ultima viene quindi indirizzata verso i potenziali utilizzatori, cioè il sistema di accumulo, l'azionamento elettrico di trazione e gli organi ausiliari. Scompare quindi la trasmissione meccanica fra motore a c.i. e ruote di trazione, ed assume dimensioni rilevanti il sistema di accumulo. Tale configurazione consente l'implementazione della frenatura a recupero.

5.2.2 *Sistemi di propulsione ibridi paralleli*

Il sistema ibrido parallelo è generalmente dotato di un motore termico ed un motore elettrico collegati allo stesso albero mediante trasmissione meccanica; la coppia di trazione può essere fornita alternativamente dal solo motore termico o da quello elettrico, oppure da entrambi contemporaneamente; a tale

scopo sono adottati schemi di trasmissione che prevedono frizioni elettromeccaniche e/o ingranaggi epicicloidali.

Il motore termico non opera “*a punto fisso*” come nel sistema serie, ma ha un comportamento dinamico analogo a quello di un comune propulsore termico per trazione automobilistica. La presenza della macchina elettrica consente comunque di adottare, rispetto ai tradizionali propulsori termici per autotrazione, un motore a c.i. con potenza massima più contenuta e di limitare il suo campo di velocità e di carico; ciò consente di ottenere interessanti economie di combustibile e di contenere le emissioni inquinanti.

I criteri di dimensionamento dell'ibrido parallelo variano notevolmente in base alle caratteristiche che si intendono conferire al veicolo; si può quindi scegliere una configurazione in cui la parte termica risulta preponderante o viceversa si può preferire una soluzione più vicina dal punto di vista funzionale al veicolo puramente elettrico (ma ciò nella pratica avviene più raramente).

La strategia di controllo generalmente adottata prevede che il motore termico rappresenti la fonte primaria di trazione ed il motore elettrico collabori operando nei seguenti modi:

- il solo motore elettrico può essere utilizzato per garantire tutta la potenza richiesta al di sotto di una certa velocità e/o di un certo carico, garantendo al veicolo un funzionamento puramente elettrico;
- il motore elettrico può essere utilizzato come “booster” quando, ad una certa velocità, la coppia richiesta dalla trazione supera la massima coppia fornita dal motore termico;
- il motore elettrico può essere utilizzato per ricaricare le batterie attraverso la frenata rigenerativa;
- se lo stato di carica della batteria scende al di sotto di un certo valore minimo, il motore termico fornirà una potenza aggiuntiva che verrà utilizzata dal motore elettrico per ricaricare le batterie.

La collaborazione fra motore termico e motore elettrico comporta una contrazione dell'area di lavoro del motore a c.i. sia in termini di regime di rotazione che di carico; in particolare si possono definire due curve di coppia, una superiore ed una inferiore, che delimitano l'area in termini di carico.

Al di sotto della curva di coppia inferiore, la trazione sarà esclusivamente elettrica, mentre al di sopra della curva superiore il motore elettrico fornirà una coppia motrice supplementare. La presenza dell'azionamento elettrico consente inoltre di ridurre la dinamica del carico richiesto al motore termico, riducendo l'esigenza di ricorrere all'arricchimento della miscela per le brusche richieste di variazioni del carico (misurato con il cosiddetto ΔTPS , Delta Throttle Position Sensor, la variazione della posizione della farfalla).

Tutte queste opportunità consentono quindi di aumentare l'efficienza media del motore a c.i. rispetto ad un sistema di propulsione classico.

Una gestione ottimale del sistema di propulsione ibrido parallelo permette, inoltre, un contenimento dei consumi maggiore rispetto al veicolo ibrido serie, pur funzionando il motore termico con un rendimento inferiore, a conferma del fatto che il veicolo ibrido parallelo, avendo un numero inferiore di macchine, presenta una catena di conversioni energetiche più breve e quindi un rendimento energetico maggiore.

Lo schema descrittivo dei flussi di energia di un ibrido parallelo, concettualmente più vicino al sistema di propulsione tradizionale rispetto all'ibrido serie, prevede la presenza di una trasmissione meccanica fra motore termico e ruote di trazione (non consentendo quindi di liberare totalmente il motore stesso dal legame con la missione affrontata, virtualmente possibile invece nell'ibrido serie), ma la contemporanea presenza di un azionamento elettrico di trazione di dimensioni non trascurabili (che nella maggior parte dei casi sostituisce anche motorino d'avviamento ed alternatore) e di un sistema di accumulo anch'esso di un certo rilievo.

L'azionamento elettrico, associato al sistema di accumulo, è in grado di fornire potenza aggiuntiva al motore nelle fasi di massima richiesta di potenza, di effettuare la frenata a recupero e di consentire il funzionamento start/stop del motore permettendo una ulteriore riduzione dei consumi. Svolge quindi delle funzioni di supporto o sostitutive (in certe fasi) al motore a c.i., il quale quindi viene fatto lavorare prevalentemente nelle zone di maggior efficienza.

5.3 Possibilità di ottimizzazione dei motori ad accensione comandata e spontanea

La grande prospettiva che si apre con la tecnologia dei sistemi di propulsione ibridi riguarda la possibilità di gestire il profilo della potenza generata dal motore a combustione interna indipendentemente (o quasi) dalla missione affrontata dal veicolo, ottenendo così un andamento medio della potenza più favorevole ai consumi. La favorevole circostanza che nei sistemi ibridi la variabilità del carico e del numero di giri del motore termico sia limitata, al punto che talvolta vengono utilizzate delle strategie di gestione del tipo "on-off", lascia ai progettisti, almeno a livello teorico, un certo margine di libertà per quanto riguarda la possibilità di ottimizzare il funzionamento del motore.

Tuttavia è bene mettere in evidenza, fin d'ora, che l'obiettivo di far lavorare il propulsore minimizzando i consumi di combustibile e le emissioni inquinanti è compito piuttosto arduo; è infatti tipico dei motori a c.i. che le condizioni di massima efficienza non coincidano con le condizioni di minime emissioni ed anzi, queste ultime, nelle varie specie chimiche che le compongono (HC, CO, NOx, particolato ecc.) sono spesso antitetiche rispetto al consumo specifico, complicando notevolmente il processo di ottimizzazione del funzionamento del motore a c.i..

Per l'individuazione delle condizioni di funzionamento di un motore occorre definire due parametri, il regime di rotazione ed il carico (quest'ultimo esprimibile in termini di pressione media effettiva o di coppia), e disporre dei piani quotati del consumo specifico, e delle emissioni inquinanti (HC, CO ed NO_x) in funzione, appunto, della velocità di rotazione e della coppia, nonché delle curve di isolivello (piani quotati) relativi alle grandezze di interesse.

Solitamente nei piani quotati è possibile individuare una zona di minimo consumo specifico, in corrispondenza di un carico piuttosto elevato, pari tipicamente a circa il 90% del carico massimo, e per regimi di rotazione prossimi a quelli di coppia massima. Ovviamente, dal momento che in un sistema di propulsione ibrido il motore opera, come già detto, quasi a punto fisso (ibrido serie) o comunque in una zona ristretta del piano quotato, appare quasi scontato far osservare la convenienza che si avrebbe, in termini di consumi di combustibile, nel far lavorare il propulsore in corrispondenza della zona di cui sopra.

Considerando inoltre che i motori termici utilizzati nei sistemi di propulsione ibrida non sono in genere progettati per tale specifica applicazione, con l'eccezione dei cosiddetti "full hybrids", si intuisce come sia consigliabile che il motorista, preliminarmente, sondi la possibilità di apportare al motore delle eventuali modifiche, per tentare di ridurre il consumo. Per descrivere sinteticamente i parametri che influenzano il funzionamento di un motore a c. i. possiamo riferirci alla formula fondamentale della potenza utile:

$$P_u = \eta_C \cdot \eta_{AC} \cdot \eta_{id} \cdot \eta_l \cdot \eta_{IP} \cdot \eta_P \cdot \eta_o \cdot \eta_T \cdot \eta_{VT} \cdot \rho_0 \cdot z \cdot V \cdot \frac{H_i}{\alpha} \cdot \frac{2\pi n}{60\varepsilon}$$

| | | |
|-----|---------------|--|
| con | η_C | rendimento di combustione |
| | η_{AC} | rendimento di adiabaticità della camera di combustione |
| | η_{id} | rendimento ideale |
| | η_l | rendimento limite |
| | η_{IP} | rendimento indicato positivo |
| | η_P | rendimento di pompaggio |
| | η_o | rendimento organico |
| | η_T | rendimento di intrappolamento |
| | η_{VT} | rendimento volumetrico totale |
| | ρ_0 | densità dell'aria in condizioni standard |
| | z | numero dei cilindri |
| | V | cilindrata unitaria |
| | H_i | potere calorifico inferiore |
| | α | rapporto aria/combustibile |
| | n | numero di giri al minuto |
| | ε | $\varepsilon = 1$ per motori a 2 tempi, $\varepsilon = 2$ per motori a 4 tempi |

Tale formula deriva dal bilancio energetico del motore, cioè dal principio di conservazione dell'energia. I primi nove termini rappresentano il rendimento totale del motore, e quindi forniscono informazioni su tutti i parametri che influenzano il consumo specifico del motore stesso. Tale formula suddivide i termini "potenza" e "consumo specifico" in una serie di fattori caratteristici di fenomeni sostanzialmente omogenei (combustione, scambi termici, pompaggio, attriti....) ciascuno dei quali può essere enucleato ed analizzato separatamente.

Nell'ottica di adattare un motore a c.i. esistente alla particolare applicazione per un sistema di propulsione ibrida, da detta formula si possono ottenere utili indicazioni circa i termini sui quali è possibile intervenire in fase di messa a punto separandoli dai termini che invece richiederebbero una riprogettazione globale del motore. Certo, nel caso fosse possibile una riprogettazione totale del motore, si potrebbero raggiungere i risultati ottimali, ma anche una semplice messa a punto mirata consente notevoli risultati migliorativi soprattutto del consumo specifico del motore. Ecco quindi alcune considerazioni sui termini che compongono il rendimento totale di un motore a c.i.:

$\eta_C, \eta_{AC}, \eta_{id}, \eta_{IP}$: non è possibile intervenire su questi termini senza riprogettare completamente la camera di combustione e gli altri sistemi meccanici;

η_l : dipende fortemente dal rapporto di compressione, un aumento del quale ha effetti positivi sul rendimento limite e quindi sul consumo specifico. Un intervento di modifica del rapporto di compressione è sicuramente realizzabile con una certa facilità; va considerato che su motori ad accensione comandata un aumento del rapporto di compressione avvicina il rischio dell'insorgere del fenomeno della detonazione, fenomeno che si presenta soprattutto nel caso di repentini aumenti del carico richiesto. Tali evenienze, frequenti in un motore per autotrazione tradizionale, possono essere evitate in un sistema di propulsione ibrido, sia che esso sia serie che parallelo;

η_o : organico ha importanza in relazione a tutti i fenomeni di attrito dei componenti meccanici, quindi un miglioramento della meccanica determina una diminuzione di consumo specifico;

$\eta_P, \eta_T, \eta_{VT}$: tali rendimenti sono quelli più interessati nel lavoro di "soft tuning", perché con questi si possono rappresentare gli effetti delle fasi di aspirazione, scarico e riempimento che sono fondamentali per l'ottimizzazione del motore a combustione interna in relazione al campo di funzionamento previsto in velocità.

Vediamo ora dal punto di vista prettamente motoristico quali fenomeni e quali scelte progettuali influenzano le prestazioni di un motore a c.i..

5.3.1 *Il rapporto aria/combustibile*

L'impiego di sistemi di propulsione ibrida apre nuove possibilità per la progettazione e la messa a punto dei motori a c.i.; uno degli aspetti che può essere più profondamente toccato da queste possibilità è il rapporto aria/combustibile, che ha grande influenza sul consumo specifico soprattutto nei motori ad accensione comandata.

Il processo di formazione della carica e la definizione del rapporto aria/combustibile è uno degli aspetti fondamentali nei motori a c.i. per definire la qualità della fase di combustione; in particolare, mentre nei motori ad accensione spontanea esso è addirittura il metodo principe per la regolazione della potenza, nei motori ad accensione comandata il rapporto aria/combustibile (in letteratura solitamente indicato con A/F - Air-Fuel) determina la bontà della combustione.

Come noto, nei motori ad accensione comandata è possibile ottenere grandi vantaggi in termini di prestazioni (in particolare di coppia) mediante il ricorso ad un'alimentazione del motore con miscela ricca, mentre l'adozione di miscele magre consentono di minimizzare i consumi.

Nel primo caso, però, il motore manifesta una combustione incompleta, a causa dell'insufficienza di ossigeno e, conseguentemente, aumentano in maniera cospicua le concentrazioni di idrocarburi incombusti e di monossido di carbonio allo scarico.

Contemporaneamente, tuttavia, il non completo sviluppo del calore potenzialmente disponibile nel combustibile limita la temperatura massima raggiunta durante il ciclo e quindi calano le quantità di NO_x emesse.

Nel secondo caso, l'eccesso di ossigeno permette il completamento del processo di ossidazione del combustibile, con conseguente incremento della produzione di ossidi di azoto e forte riduzione del quantitativo di CO emesso. Anche in questo caso, però, allo scarico, si ritrovano gli idrocarburi incombusti come conseguenza della difficoltà di accensione e di propagazione del fronte di fiamma tipica delle miscele magre.

Consistenti riduzioni dei consumi di combustibile e delle emissioni di HC e di CO si possono ottenere facendo funzionare un motore ad accensione comandata con rapporti aria-combustibile (A/F) superiori a quello stechiometrico, ed infatti non a caso i progettisti, da diverso tempo, stanno cercando di sviluppare e perfezionare tecniche che consentano di incrementare il limite di magrezza della miscela, su un arco di utilizzo del propulsore il più esteso possibile.

Nel corso di questi ultimi anni, sono state percorse diverse strade nel tentativo di realizzare motori a combustione magra (lean burn engine), ovviando ai tipici problemi che essa comporta, quali: eccessiva dispersione ciclica, diminuzione della velocità di combustione e conseguente aumento della durata della relativa fase, accensioni anomale della miscela aria-combustibile, fluttuazioni di coppia.

Molti di questi problemi sono decisamente ridotti se l'applicazione cui il motore è destinato non preveda brusche variazioni del carico, che richiederebbero, per dar luogo ad un funzionamento regolare, miscele arricchite. Si capisce quindi come un propulsore ibrido parallelo, e ancor più, un ibrido serie, creino le condizioni adatte ad un motore alimentato con miscele magre.

Occorre comunque sottolineare ancora che l'impiego di miscele magre ha effetti contrastanti su consumo specifico ed emissioni inquinanti; come si evince dalle Fig. 5.1 e 5.2, si nota che il minimo consumo specifico, a numero di giri costante, si ottiene con un rapporto aria/combustibile leggermente maggiore del rapporto stechiometrico, che indica miscele leggermente magre.

A questo punto utilizzando lo stesso rapporto aria/combustibile si nota che le emissioni di NOx, aumentano in corrispondenza di miscele magre, viceversa vi è miglioramento per miscele fortemente magre, a cui però corrisponde un aumento di consumo specifico. Da questa osservazione si conclude che, per perseguire tutti e due gli obiettivi bisogna lavorare ad un compromesso, e che viceversa, per perseguirne uno solo bisogna accettare peggioramenti dei valori dell'altra variabile.

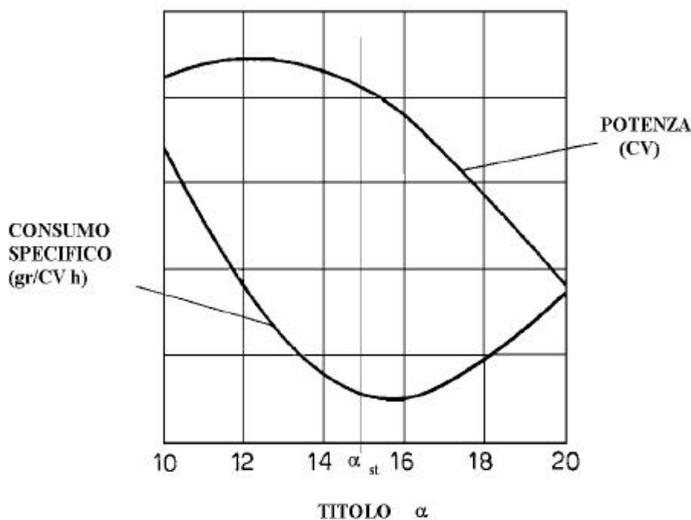


Fig. 5.1 - Consumo specifico e potenza al variare del titolo, per un dato regime di rotazione

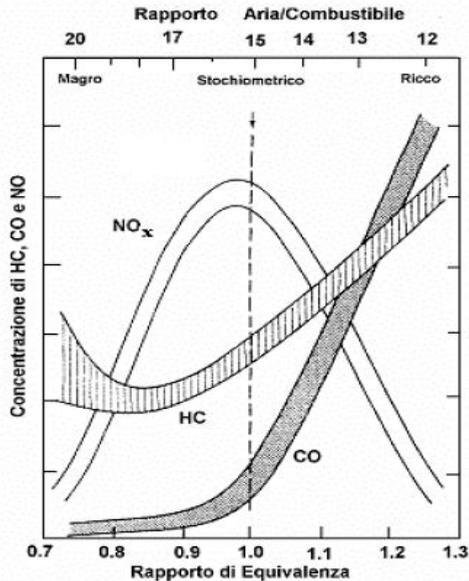


Fig. 5.2 - Andamento qualitativo delle emissioni inquinanti al variare del titolo

5.3.2 I dispositivi EGR

Il ricircolo dei gas di scarico è una tecnica mediante la quale una certa frazione di gas esausti, provenienti dalla camera di combustione, viene mescolata al flusso in aspirazione principalmente al fine di ridurre il quantitativo di ossidi di azoto emessi. Recentemente inoltre i dispositivi EGR sono oggetto di grande interesse, in quanto rappresentano una possibile strada per ridurre le perdite per strozzamento ed i consumi di combustibile.

Dal punto di vista degli ossidi di azoto, è noto come lo smagrimiento della miscela porti ad un aumento della loro concentrazione nei gas di scarico.

La concentrazione degli NO_x dipende da due fattori fondamentali:

- la temperatura massima raggiunta durante la combustione
- il contenuto di ossigeno della miscela.

Il diluire la carica fresca con parte dei gas combusti, i quali sostanzialmente costituiscono una miscela inerte, consente di diminuire la temperatura massima di combustione in quanto il calore rilasciato dal combustibile si ripartisce su una massa maggiore di fluido, caratterizzata quindi da una maggiore capacità termica, a parità di combustibile bruciato.

In definitiva, questo, che è anche noto come effetto termico del ricircolo dei gas di scarico, consente di ridurre il quantitativo di ossidi di azoto emessi allo scarico.

La percentuale di gas combusti ricircolata è dell'ordine 5÷15%, essendo i valori più elevati adottati nel funzionamento con elevati gradi di parzializzazione del motore.

Il ricircolo viene comunque annullato in tutti quei casi in cui non risulta essere efficace nell'abbattimento degli NO_x ; ad esempio durante le partenze a freddo, quando la temperatura della carica è già sufficientemente bassa, o nel funzionamento a piena ammissione, in corrispondenza del quale la pratica in questione andrebbe a penalizzare eccessivamente le prestazioni.

I dispositivi EGR negli ultimi anni hanno subito un importante sviluppo in conseguenza soprattutto dell'avvento dei moderni sistemi di iniezione diretta, sia ad accensione spontanea che comandata.

Come accennato all'inizio del presente paragrafo, la possibilità di ridurre le emissioni di ossidi di azoto non è l'unico motivo per cui la tecnica del ricircolo dei gas combusti è sempre più oggetto di interesse da parte dei progettisti.

Il riempire parzialmente la camera di combustione con i gas di scarico, quando le condizioni operative imposte dal carico lo consentono, produce lo stesso effetto di ridurre la effettiva cilindrata del motore con la diretta conseguenza di diminuire anche i consumi di combustibile.

Come detto i gas di scarico sono inerti, cioè non partecipano al processo di combustione, e pertanto il sistema di iniezione può effettivamente iniettare una minore quantità di combustibile. Ovviamente in questo modo si riduce contemporaneamente anche la potenza prodotta. Questo ultimo aspetto merita una particolare attenzione, giacché c'è chi sta cercando di sfruttare proprio i dispositivi EGR per riprodurre la funzione di regolazione della potenza erogata, la quale nei tradizionali motori ad accensione comandata è assolta dal corpo farfallato.

Il potenziale vantaggio di una simile soluzione è che ricircolando i gas esausti si riduce la potenza generata, parzializzando di fatto il funzionamento del motore, riducendo o al limite eliminando però la necessità di strozzare il motore all'aspirazione.

I dispositivi EGR possono pertanto concorrere a ridurre le perdite di pompaggio. L'aggiungere gas dotati di elevata velocità e ad alta pressione nel flusso in ingresso alla camera di combustione riduce la potenza sprecata nel pompare nuova aria fresca, in quanto aumenta la pressione nei collettori di aspirazione.

Il sistemi di propulsione ibridi, nei quali le necessità di regolazione del carico sono comunque ridotte rispetto ad un propulsore tradizionale, possono rendere ancor più praticabile questa soluzione portando, di fatto, nei motori ad accensione comandata alla totale eliminazione del corpo farfallato (con grande beneficio per il rendimento volumetrico) mediante l'impiego della valvola EGR, che avrebbe inoltre l'effetto benefico di ridurre gli NO_x , magari in motori a miscela magra.

5.3.3 *La fasatura*

Gli organi della distribuzione, regolando il processo di sostituzione della carica, giocano un ruolo essenziale dal punto di vista delle prestazioni di un motore a c.i.. L'efficacia con cui, ad ogni ciclo, il motore riesce ad aspirare il fluido di lavoro e ad espellere i prodotti della combustione può influenzare profondamente la potenza che lo stesso è in grado di erogare.

Come è noto, è pratica comune profilare l'asse a camme in modo tale che:

- l'apertura della valvola di aspirazione sia anticipata rispetto al punto morto superiore;
- l'apertura della valvola di scarico sia anticipata rispetto al punto morto inferiore;
- la chiusura della valvola di aspirazione sia ritardata rispetto al punto morto inferiore;
- la chiusura della valvola di scarico sia ritardata rispetto al punto morto superiore.

Solitamente, nei motori tradizionali, il comando delle valvole non permette di variare la fasatura in funzione del regime di rotazione e del carico, cosicché la stessa risulta essere il frutto di scelte progettuali di compromesso, legate alla necessità di mediare tra esigenze contrastanti.

Ad esempio, alti valori del ritardo della chiusura della valvola di aspirazione migliorano il riempimento alle alte velocità, ma comportano anche maggiori reflussi della carica fresca, dal cilindro verso il condotto, ai bassi regimi di rotazione. Fasature con estesi periodi di incrocio risultano assolutamente sconsigliabili alle basse velocità; mentre alle alte producono importanti vantaggi ancora in termini di coefficiente di riempimento.

In generale, con l'aumento della velocità di rotazione, la durata della fase di aspirazione e della fase di scarico si riduce, cosicché ci si può trovare nella situazione in cui la velocità della carica fresca, entrante nella camera di combustione, e la velocità dei gas esausti, uscenti della stessa, non sono sufficientemente elevate per garantire un efficiente ricambio del fluido di lavoro. L'adozione di estesi angoli di incrocio permette di ovviare ad eventualità di tal tipo.

Gli effetti prodotti da un impiego di ampie fasi di ammissione e di scarico sono simili a quelli indotti da un aumento delle dimensioni dei condotti e delle valvole (incremento della potenza agli alti). Fasature strette invece precludono la possibilità di massimizzare le prestazioni del motore alle alte velocità, permettendo di incrementare la coppia ai bassi e medi regimi, a tutto vantaggio della guida nel traffico urbano.

Si ricorda inoltre che il quantitativo di fluido che attraversa la luce durante l'intera fase di ricambio, è proporzionale alla "permeabilità della luce".

Figurando a denominatore di quest'ultima quantità la velocità di rotazione, appare evidente come sia opportuno, all'aumentare del regime di rotazione, arginare la diminuzione di "m" incrementando le fasature corrispondenti.

Da quanto detto si evince quindi che l'applicazione di un motore a c.i. per auto-trazione ad un sistema di propulsione ibrido deve necessariamente prevedere una verifica ed una riformulazione della legge di distribuzione, al fine di ottimizzare il funzionamento del motore al campo di utilizzo previsto, che sarà probabilmente diverso, e più contenuto, rispetto all'applicazione "tradizionale".

5.3.4 *Il sistema di aspirazione e di scarico*

Nel precedente paragrafo, parlando della fasatura della distribuzione, è stata riconosciuta l'importanza del processo di sostituzione della carica sulle prestazioni di un motore. L'efficacia con cui un propulsore aspira l'aria ed elimina i prodotti della combustione è profondamente influenzata, ovviamente, anche dalla conformazione del sistema di aspirazione e di scarico.

In virtù del funzionamento ciclico, tipico dei motori volumetrici, il flusso in entrata ed in uscita dal propulsore risulta essere pulsante. A tale pulsazione rimane associata energia e conseguentemente un corretto dimensionamento del sistema di scarico e di aspirazione può contribuire a ridurre il lavoro necessario per mantenere detto flusso, così come un errato proporzionamento di tali sistemi può portare l' "energia pulsante" ad agire in contrasto con il riempimento dei cilindri, penalizzando le prestazioni (potenza, consumi).

È bene fin d'ora premettere che il processo di sostituzione della carica è talmente complesso che un po' tutti i parametri che definiscono le condizioni di funzionamento del motore e le sue caratteristiche geometriche, in qualche maniera, finiscono per influenzarlo. In particolare i fenomeni che influenzano il processo di sostituzione della carica possono essere suddivisi in:

- quasi stazionari
- dinamici.

I primi possono essere descritti in termini di velocità media del fluido e sono rappresentati, ad esempio, dalle perdite di pressione dovute alle resistenze fluidodinamiche dei diversi componenti attraversati dai gas (quali condotti, volumi, luci), dagli scambi di calore del fluido con le pareti ecc.

I secondi, legati alla variabilità del flusso istante per istante, cioè all'instazionarietà dello stesso, si manifestano, in seno al motore, attraverso i fenomeni inerziali che tipicamente interessano le masse di fluido in moto, attraverso le onde di pressione che si propagano nel gas ecc.

Nel processo di sostituzione della carica il peso relativo delle forze in gioco (forze di pressione, d'inerzia, di attrito) dipende da:

- le caratteristiche del fluido
- dalle condizioni di moto del fluido
- dalla geometria del sistema.

Nel sistema di aspirazione (ma anche all'interno del cilindro durante la fase di aspirazione e compressione) la carica in moto viene a contatto con pareti generalmente più calde e di conseguenza si riscalda. Il corrispondente incremento ΔT di temperatura che essa subisce dipende da:

- velocità della carica
- durata del processo di aspirazione
- differenza di temperatura tra pareti (TW) e carica.

Poiché tale riscaldamento diminuisce la densità della carica, esso ha un effetto negativo sul riempimento ed è pertanto conveniente renderlo il più piccolo possibile.

La perdita di riempimento dovuto all'effetto di riscaldamento della carica fresca può essere diminuita limitando la lunghezza L dei condotti, in quanto si riducono i tempi di percorrenza e la superficie di scambio, ed aumentando il diametro d , giacché diminuisce la superficie di contatto per unità di massa di fluido.

Tanto all'aspirazione che allo scarico il contributo più importante, in termini di caduta di pressione, è quello dovuto alle rispettive valvole, in quanto queste, insieme alle loro sedi, costituiscono solitamente le sezioni di passaggio più ristrette del fluido. Si ricorda che l'aria di passaggio del fluido attraverso le valvole dipende dalle caratteristiche geometriche delle stesse (in particolare dai relativi diametri) oltre che dal valore istantaneo dell'alzata (h). Il flusso del gas, attraverso tali aree, è determinato, istante per istante, dal salto di pressione esistente tra cilindro e la sezione terminale del condotto, in prossimità della valvola.

Dal momento che tale salto di pressione varia anch'esso istante per istante, risulta difficile fare delle misure od elaborare modelli che permettano di studiare in maniera approfondita le condizioni di moto del fluido in corrispondenza di queste sezioni. Per poter effettuare, in maniera semplice, dei confronti con quello che accade in motori simili, od anche per poter ricavare informazioni di base sull'andamento del processo, è conveniente studiare il problema del "flussaggio" delle valvole in modo da sganciarlo il più possibile dalle caratteristiche del caso specifico.

A tal fine è possibile calcolare in tali sezioni un "coefficiente di efflusso", il quale, tenendo conto che le effettive aree di passaggio cambiano continuamente con legge solitamente complessa, varia esso stesso istante per istante.

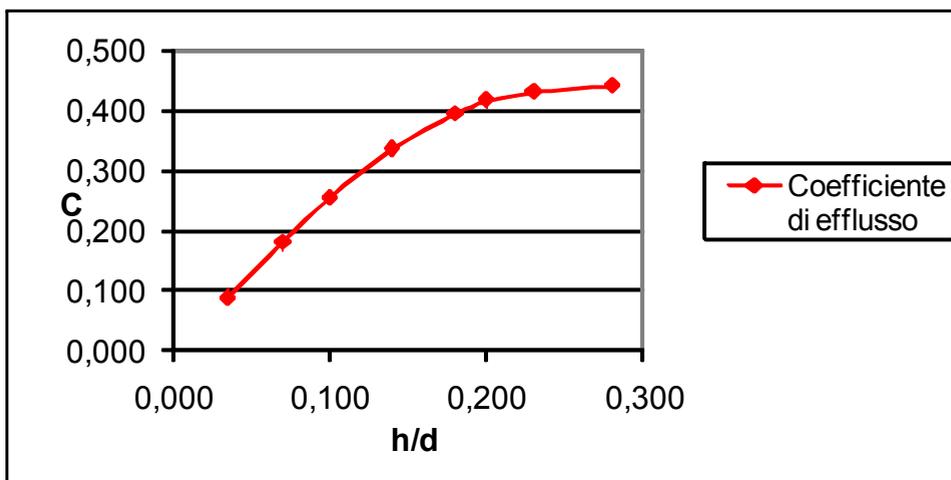


Fig. 5.3 - Andamento tipico del coefficiente di efflusso (C) di una valvola di aspirazione di un motore quattro tempi, in funzione del rapporto diametro (valvola) alzata

Il coefficiente di efflusso, essendo un parametro di comodo, può essere definito in maniera arbitraria. Ad esempio, in alcuni testi, esso rappresenta il rapporto tra la portata di aria misurata attraverso la valvola e la portata teorica che passerebbe, in condizioni di flusso ideale, attraverso la sezione trasversale della sede della valvola stessa.

La Fig. 5.3 è un esempio di come i dati relativi al flussaggio di una valvola possano essere elaborati al fine di ricavare importanti indicazioni progettuali. Il grafico rappresenta l'andamento tipico del coefficiente di efflusso (C) di una valvola di aspirazione di un motore a quattro tempi, in funzione del rapporto diametro (valvola) alzata.

Come precedentemente detto, è buona norma realizzare diametri delle valvole e dei condotti i più grandi possibile. In tal senso un vincolo progettuale è rappresentato dallo spazio a disposizione sulla testa del cilindro.

Sempre per contenere le perdite fluidodinamiche, è bene inoltre che i raggi di curvatura dei condotti siano sufficientemente ampi, specie nelle zone in cui il flusso cambia direzione, ed è anche conveniente aumentare la sezione di passaggio in corrispondenza del supporto della guida della valvola, al fine di ridurre la velocità del flusso in corrispondenza dell'ostruzione.

Come precedentemente accennato, compito del sistema di aspirazione e di scarico è anche quello di favorire, con il loro comportamento dinamico, il processo di sostituzione del fluido di lavoro alla fine di ogni ciclo, e la successiva introduzione della nuova carica fresca, all'interno del cilindro.

La frequenza propria del gas contenuto nei condotti, in rapporto alla frequenza con cui si succedono le aspirazioni, può favorire la conversione dell'energia cinetica associata al moto del gas stesso (e generata dal pistone nella prima fase della sua corsa) in energia di pressione, in corrispondenza della parte finale della fase di aspirazione.

Per ridurre il regime del motore in corrispondenza del quale l'effetto inerziale favorisce il riempimento, si può adottare una delle seguenti strategie:

- diminuire la sezione del condotto a parità di lunghezza
- aumentare la lunghezza del condotto a parità di sezione
- ridurre il rapporto sezione/lunghezza intervenendo su entrambi i parametri.

Le considerazioni svolte relativamente agli effetti dinamici sono state fatte con riferimento al sistema di aspirazione. Analoghe considerazioni valgono per il sistema di scarico.

Si fa osservare, a proposito, che quanto detto circa la modalità con cui un'onda di pressione, propagantesi in un condotto, si riflette in corrispondenza di un'estremità (comunicante con un volume molto maggiore rispetto quello del condotto stesso), generando un'onda che si muove in senso inverso rispetto l'onda incidente, hanno carattere generale e pertanto valgono anche nel caso in cui il condotto in questione sia quello di scarico.

In generale, condotti (sia all'aspirazione che allo scarico) stretti e lunghi promuovono l'insorgere di fenomeni che migliorano la "respirazione" del motore ai bassi e medi regimi, mentre condotti corti e di dimensioni generose vanno a favore delle prestazioni alle alte velocità di rotazione.

Ecco quindi che la modifica della geometria dei condotti di aspirazione e scarico per un motore destinato ad un sistema di propulsione ibrido consente di "deformare" favorevolmente i piani quotati, soprattutto quello relativo al consumo specifico, consentendo di ottenere le migliori efficienze proprio nel campo di funzionamento caratteristico dell'applicazione "ibrida" e trascurando senza danno le altre zone di funzionamento.

5.3.5 Il rapporto volumetrico di compressione e la possibilità di variarlo

Il rapporto volumetrico di compressione r è uno dei più importanti fattori da cui dipende quanto efficacemente un motore riesce ad utilizzare l'energia associata al quantitativo di combustibile introdotto in ogni ciclo.

Nei motori ad accensione comandata il valore assunto dal rapporto volumetrico di compressione deve essere limitato onde evitare, agli alti carichi e agli elevati regimi di rotazione, l'insorgere di fenomeni di combustione anomala, ed in particolare della detonazione.

Nei motori ad accensione spontanea esso è invece assai più elevato proprio in virtù della richiesta accensione per compressione; questo è uno dei fattori che rende i motori ad accensione spontanea mediamente più efficienti dei motori ad accensione comandata.

La necessaria limitazione del rapporto di compressione è quindi fortemente limitante per i motori ad accensione comandata, in quanto preclude la possibilità di avvantaggiarsi del fatto che ai bassi carichi ed alle basse velocità il motore potrebbe funzionare regolarmente con dei valori di r ben più elevati di quelli che nella realtà si è costretti a praticare. In tali condizioni, infatti, il minore cimento meccanico e termico, cui il motore è soggetto, scongiura il manifestarsi della detonazione.

La limitazione del rapporto volumetrico di compressione è ancora più penalizzante se si considera che, abitualmente, i motori, per la maggior parte del tempo, sono chiamati ad operare con carichi e velocità di rotazione modesti.

Ciò risulta ancor più vero proprio per i motori a combustione interna destinati a sistemi ibridi sia serie che paralleli; i fenomeni di combustione anomala ed in particolare la detonazione si manifestano in particolare nelle fasi di “ripresa” di un veicolo, quando si ha un brusco passaggio da condizione di motore fortemente parzializzato a condizione di pieno carico. Tale circostanza è invero assai rara nel caso anche dei sistemi di propulsione ibrido parallelo (e da escludere completamente per gli ibridi serie) in quanto solitamente le brusche variazioni di carico sono delegate all’azionamento elettrico.

Ecco quindi che l’innalzamento del rapporto di compressione diviene possibile ed anzi auspicabile nel caso di sistemi ibridi con motori ad accensione comandata.

5.3.6 Il caso “Prius”

La Toyota Prius è stata la prima autovettura prodotta e immessa sul listino in grado di guadagnare una discreta fascia di mercato nelle vendite. Il motore a benzina nella Prius II è un 1,5 L da 78 CV (58 kW) dotato di tecnologia VVT-i (Variable Valve Timing - intelligent) e caratterizzato da un ciclo Atkinson anziché, come nelle “normali” autovetture, dal ciclo Beau de Rochas. Questo ciclo permette di avere un rendimento più elevato a discapito di una riduzione della potenza massima in relazione alla cilindrata.

Il ciclo Atkinson comporta il raggiungimento di regimi di rotazione più bassi rispetto a quelli caratteristici dei motori tradizionali, con una considerevole perdita di potenza specifica nei confronti di motori di pari cilindrata. La particolarità della scelta ricade però nella minore perdita per pompaggio, a tutto vantaggio del rendimento generale; la velocità di rotazione più bassa permette inoltre di avere minori sollecitazioni, minore inerzia e quindi di poter utilizzare materiali e componenti più leggeri e più piccoli e di avere delle leggi di alzata delle valvole meno esasperate.

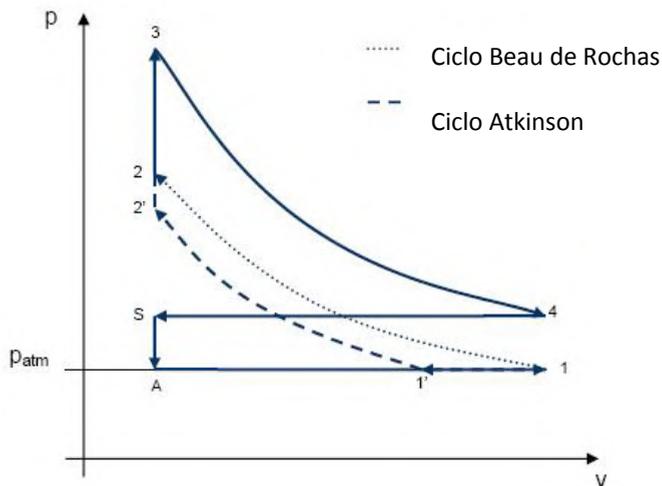


Fig. 5.4 - Ciclo Beau de Rochas e Ciclo Atkinson

Non ultimo, si riduce così il rumore di funzionamento, che è un'altra componente dell'inquinamento da traffico.

Il concetto più importante impiegato nel motore a c.i. della Prius risulta l'adozione di un ciclo ad elevato rapporto di espansione (Fig. 5.4) che ricorre al sistema di fasatura variabile per contenere invece a valori bassi il rapporto di compressione termodinamico (variabile fra 4,8:1 e 9,3:1), a fronte di un rapporto di compressione meccanico di 13,5:1. Si ottengono così gli effetti positivi sul rendimento dovuti all'elevato rapporto di espansione (Fig. 5.7) senza i rischi di detonazione tipici degli elevati rapporti di compressione.

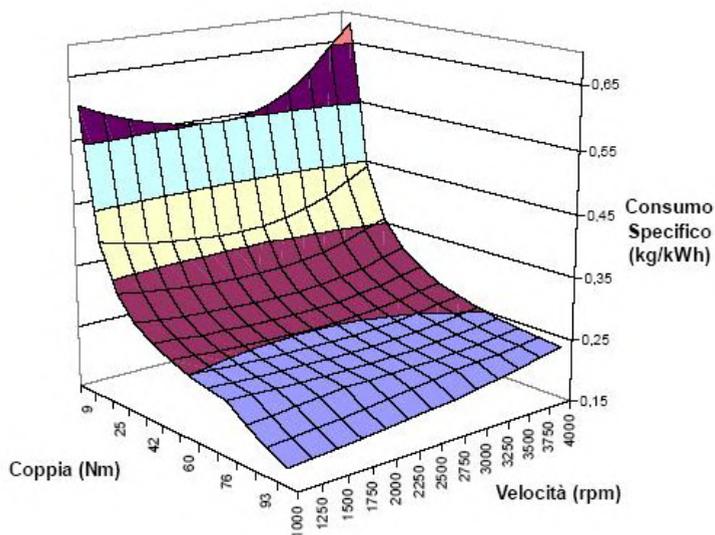


Fig. 5.5 - Consumo specifico in funzione dei valori di coppia e numero di giri

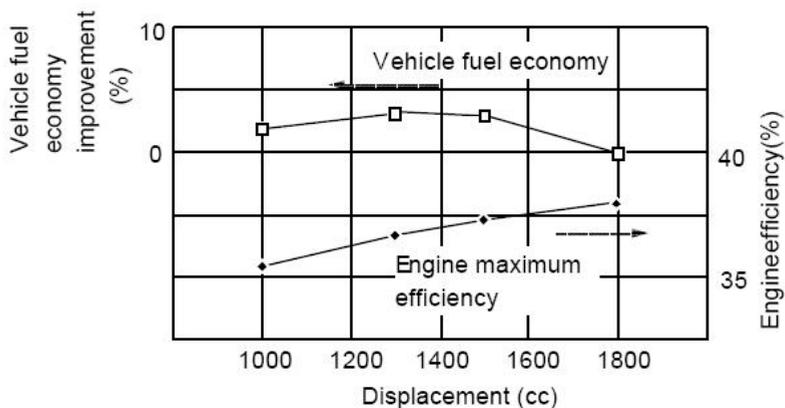


Fig. 5.6 - Consumo di combustibile ed efficienza in base alla cilindrata

La scelta del motore di 1,5 L di cilindrata trova giustificazione nel grafico di Fig. 5.6 dove è rappresentata l'efficienza del motore in base alla cilindrata e il relativo consumo di combustibile. Si può notare l'aumento di efficienza con la cilindrata, ma anche la diversa variazione di consumo di combustibile: il tutto porta alla scelta di "media" della cilindrata di 1500 cc per conciliare l'efficienza e il consumo.¹

Importanti sono i valori di rapporto di compressione, di espansione, le leggi di alzata e di apertura e chiusura delle valvole di aspirazione e scarico, secondo i quali si può pensare di ottenere una migliore configurazione per migliorare l'efficienza e di conseguenza i consumi. Un esempio è portato dai grafici delle Figg. 5.7, 5.8 e 5.9.

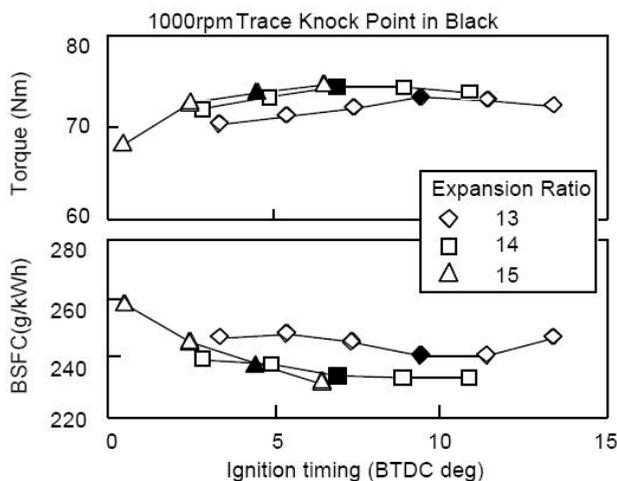


Fig. 5.7 - Variazione della coppia e del consumo in relazione al rapporto di espansione

¹ Nella Prius III la cilindrata è stata portata a 1800 cc, nella linea di un incremento generale delle prestazioni della vettura (vedi anche il paragrafo dedicato alla Toyota nel Cap. 17).

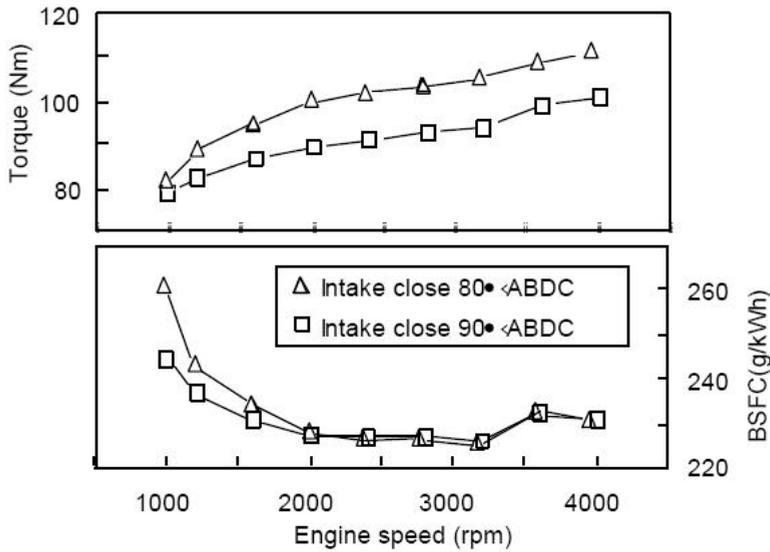


Fig. 5.8 - Coppia in base alla legge di apertura del VVT-i

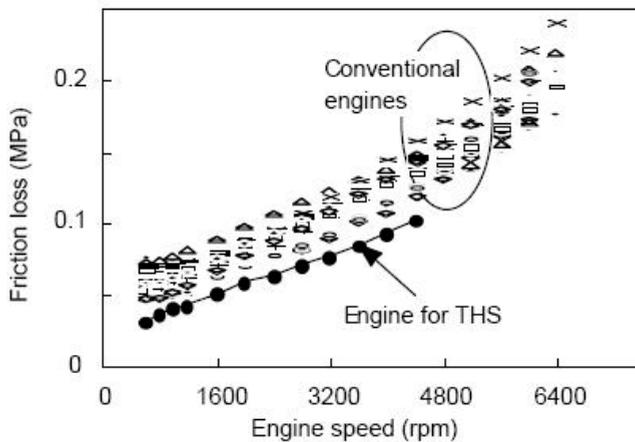


Fig. 5.9 - Perdita di attrito in base al numero di giri per motori convenzionali e ibridi

Passiamo adesso al principale concorrente della Toyota, la Honda, che ha scelto una diversa via per l'introduzione dell'ibrido, quella cosiddetta dell'ibrido "minimo", prima con la Insight, un piccolo coupé di recente completamente rinnovato e ingrandito, poi con la Civic e recentemente con la Accord. In tutti i casi, il sistema impiegato è il cosiddetto IMA (Integrated Motor Assist), di cui vedremo di seguito l'applicazione nella Civic.

5.3.8 Honda Civic IMA

Questa autovettura è la versione ibrida del modello di maggior successo della Honda. È una berlina di classe media, dello stesso livello della già citata Toyota Prius, dotata, nella sua prima versione, di un motore a combustione interna di 1,4 litri con tecnologia V-TEC, con una potenza di 85 CV (63 kW) erogati a circa 5700 giri/min. È poi presente un motore elettrico da 10 kW che può produrre una coppia nominale di circa 62 Nm, ma che allo spunto può diventare di oltre 100 Nm. Tale sistema, ideato e brevettato dalla Honda, consente di alloggiare l'unità elettrica nel vano motore senza problemi; è infatti una unità leggera e dalle dimensioni molto compatte. Il motore elettrico assolve le funzioni di volano e di motorino di avviamento, con la possibilità di integrare il motore a combustione interna nella fase di trazione e comportandosi da generatore in rilascio o in frenata.

Il motore termico che assiste la Civic è come detto un motore dotato di una particolare tecnologia; infatti non è caratterizzato solamente dalla distribuzione V-TEC, ma anche da una iniezione diretta multi-point con doppia accensione sequenziale intelligente, definita come IDS. Inoltre i tecnici giapponesi hanno messo a punto un particolare disegno dei condotti di aspirazione che favoriscono il moto di swirl della carica fresca² con la quale è possibile avere una combustione con miscela magra molto regolare (il tutto per abbassare ulteriormente i consumi).

Tra le tante innovazioni tecnologiche anche quella del Cut-Off System con il quale avviene il blocco delle valvole per favorire la diminuzione del lavoro di pompaggio (la Toyota diminuiva tale lavoro con l'utilizzo del ciclo Atkinson) e allo stesso consentire un recupero energetico più ampio nelle fasi di frenata (minor freno motore).

Come nella Insight, a coordinare il lavoro dei due motori interviene una centralina di controllo e di gestione denominata IPU³, che è un sistema formato dal pacco batterie e dalla PCU⁴, la quale tiene in costante relazione i due propulsori gestendone la logica e l'attività.

Una particolarità del sistema è quella di rendere il motore più fruibile controllando la variazione di coppia motrice. Infatti in un motore quattro cilindri solitamente la coppia positiva è fornita ogni volta durante il ciclo alternativamente da un solo cilindro, mentre gli altri tre forniscono una coppia negativa.

² Moto dell'aria nel cilindro che identifica la rotazione della carica stessa attorno all'asse del cilindro.

³ Intelligent Power Unit.

⁴ Power Control Unit.



Fig. 5.10 - Motore Honda Civic IMA

Per ridurre queste grandi variazioni di coppia di torsione, il motore/generatore viene in aiuto per offrire una coppia nella fase opposta a quella erogata nel momento. In questo modo mentre il motore/generatore si alterna tra alimentazione e modi di rigenerazione, le grandi variazioni di coppia possono essere annullate al costo di una piccola quantità di energia elettrica spesa.

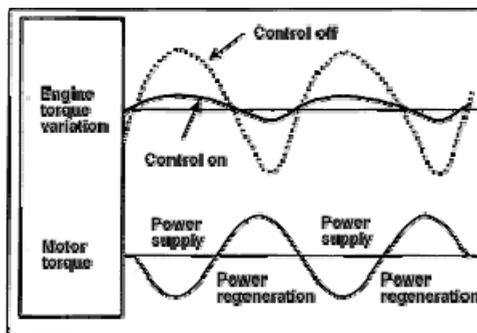


Fig. 5.11 - Controllo di variazione di coppia di torsione

5.4 Generalità sul funzionamento dei turbogas nei sistemi di trasporto terrestri

I primi tentativi di usare il turbogas come motore diretto di trazione terrestre furono presto abbandonati, almeno per fini commerciali, perché in queste macchine uno scostamento, anche modesto, dalle condizioni operative di progetto penalizza fortemente il rendimento e le prestazioni. Il grafico di Fig. 5.12 illustra chiaramente questa caratteristica del turbogas mono-asse (in cui cioè turbina, compressore e generatore sono montati su di un solo albero “motore”): le caratteristiche di coppia, a linea tratteggiata, e di potenza disponibile all'albero, a linea continua, sono tracciate al variare della portata e della velocità angolare dell'albero di potenza, per differenti valori della temperatura di ingresso turbina (Turbine Inlet Temperature, TIT). Si nota che, per una data macchina:

- per ogni TIT esiste un valore di n/n_{design} per cui la potenza erogata è massima;
- tale massimo decresce con la TIT
- le variazioni sono tanto più sensibili quanto più il punto di funzionamento (n/n_p) si allontana dal nominale.

Le curve di iso-rendimento, riportate a tratto leggero sul grafico (Fig. 5.12), indicano chiaramente che i consumi aumentano fortemente al discostarsi dal punto di progetto.

Un turbogas ad un solo asse è perciò un sistema assai inefficiente per produrre potenza motrice variabile [4], e risulta quindi inapplicabile alla trazione diretta.

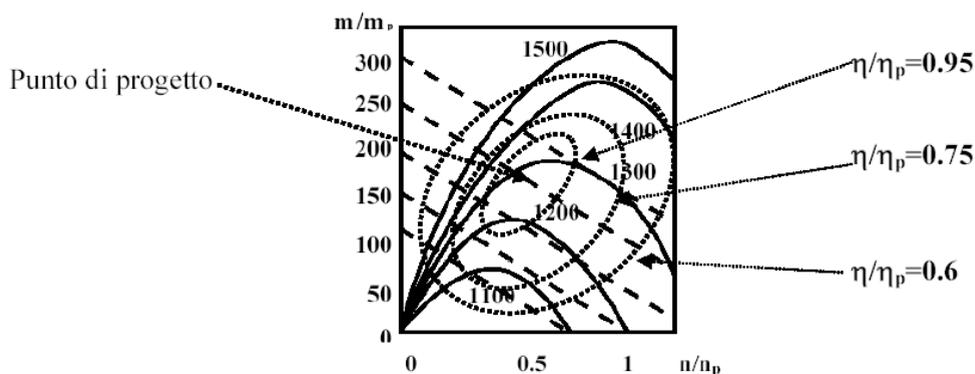


Fig. 5.12 - Curve di potenza (linea continua) e di coppia di una turbina a gas al variare delle temperatura di ingresso in turbina, in K, per condizioni diverse da quelle di progetto in termini di portata m e velocità di rotazione n dell'albero di potenza

Per ottenere una curva di coppia crescente al diminuire della velocità, si può:

- utilizzare un ruotismo epicicloidale che, a velocità della turbina costante, aumenti la velocità del compressore al diminuire della velocità dell'albero motore: in tal modo cresce la potenza della turbina, e quindi la sua coppia;
- utilizzare una turbina a doppio asse, con sviluppo separato della potenza necessaria a trascinare il compressore e della potenza utile alla trazione: in tal modo si svincolano le velocità angolari dei due assi, costante per il gruppo turbocompressore funzionante come generatore di gas caldi, e variabile per la turbina di potenza, che può inseguire la variazione del momento resistente.

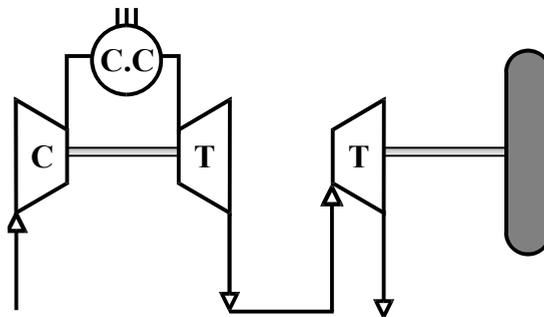


Fig. 5.13 - Turbina a doppio albero

Tralasciando la prima soluzione, che porta a notevoli complicazioni costruttive ed operative, possiamo invece notare come un turbogas a doppio albero abbia caratteristiche funzionali che lo rendono conveniente come *motore di trazione*:

- struttura semplice e compatta, con pesi e dimensioni fortemente ridotti, a parità di potenza, rispetto ai motori alternativi;
- moto puramente rotatorio, con annullamento dei fenomeni vibratorii a bassa frequenza tipici dei moti alternativi;
- rendimento (a punto nominale) relativamente elevato;
- transitori di avviamento solo di poco più lunghi di quelli dei motori alternativi;
- assenza del sistema di raffreddamento a liquido;
- lubrificazione necessaria solo per i cuscinetti;
- combustione stazionaria, con conseguente basso livello di inquinamento: rispetto al motore alternativo le emissioni di CO, HC e di particolato sono bassissime, ed inferiori sono anche le emissioni di NO_x, date le minori temperature di picco raggiunte nella combustione;

- facile adattamento al funzionamento policombustibile: l'iniettore è l'unico componente da adeguare alla situazione;
- curva di coppia ideale per la trazione, con valore massimo a bassa velocità: per velocità nulla della turbina di trazione si ha una coppia circa doppia rispetto a quella di regime.

Accanto a tali vantaggi si hanno però non trascurabili *problemi di fattibilità*, che il doppio albero eredita dal monoalbero:

- forte abbassamento del rendimento per condizioni operative lontane da quelle di progetto, anche nel caso di compressore e turbina a geometria variabile;
- relativa lentezza di risposta a variazioni di velocità;
- capacità di freno-motore praticamente nulla;
- problemi di sicurezza dovuti agli alti regimi rotazionali e termici del generatore di gas;
- costo elevato, dovuto alla produzione limitata, alla progettazione specialistica, e all'impiego inevitabile di materiali speciali, necessari per le alte temperature permanenti e per la impossibilità pratica di raffreddare palette di piccole dimensioni.

I limiti sopra esposti hanno scoraggiato l'evoluzione del turbogas come mezzo di propulsione terrestre: oggi si comincia a riconsiderare la concreta utilità di questo motore, anche se con una struttura concettuale diversa, come vedremo tra breve, da quella prospettata agli inizi dei primi esperimenti, verso la fine degli anni 50. Lo schema di un gruppo turbogas adottato nei prototipi di auto a trazione diretta si componeva in generale di:

- un compressore con rapporto di compressione β piuttosto limitato (tipicamente, 2-3);
- una camera di combustione, in cui viene iniettato combustibile con elevatissimo eccesso d'aria, vista la stazionarietà del fenomeno e l'elevata temperatura raggiunta, che deve essere sopportabile con continuità dai materiali utilizzati: proprio questo elevato rapporto di diluizione (tipicamente, per un turbogas funzionante a metano, con $TIT=1300^\circ$ e $\beta=2$, $m_{CH_4}/m_{aria} \sim 0,01-0,015$) rende molto bassa la quantità degli idrocarburi incombusti e degli altri prodotti di combustione, per cui la turbina a gas è un motore intrinsecamente molto più pulito rispetto al motore alternativo alimentato a gasolio, benzina o GPL. A differenza dei motori ad accensione comandata, la combustione è a pressione costante, ed anzi si ha un leggero abbassamento della pressione dovuto alle perdite di carico nella camera tubolare; i tempi di permanenza in camera di combustione sono minori di circa 10 volte di quelli del motore a combustione interna, ma la stazionarietà del fenomeno permette una combustione più "completa" nel turbogas;

- una turbina a doppio asse in cui si espandono i gas caldi della combustione, producendo lavoro meccanico utilizzato sia per muovere il compressore (primo asse, “interno”) sia per compiere lavoro utile;
- un rigeneratore fisso, o più spesso di tipo Ljungström, rotante a 15÷30 giri/min, con il compito di recuperare parte del calore sensibile dei gas combusti in uscita dalla turbina e di preriscaldare l’aria compressa a monte della camera di combustione: questo artificio aumenta il rendimento del ciclo a parità di temperatura massima e riduce corrispondentemente il consumo specifico, perché riduce la quantità di calore “netta” da fornire in camera di combustione.

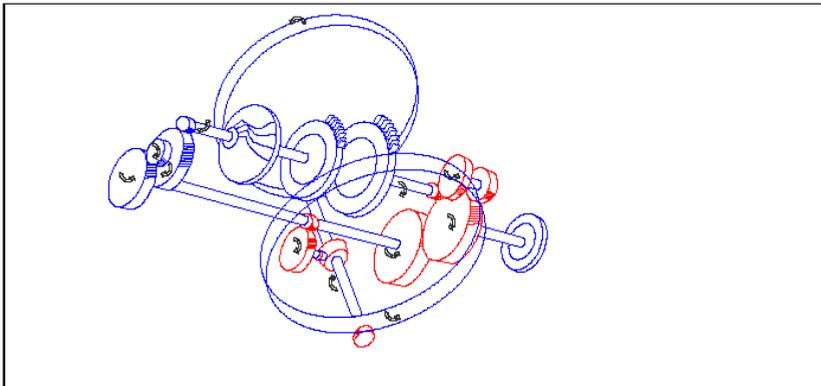


Fig. 5.14 - Motore per trazione con turbina a doppio albero e rigeneratore rotante

5.4.1 Applicazioni automobilistiche

Varie case automobilistiche, come Fiat, International Harvester, Mercedes, Volkswagen, Volvo, Rover, Renault, Lotus, Ford, Chrysler, General Motors, Nissan, Toyota, Mitsubishi si sono cimentate nel corso degli anni nella realizzazione di prototipi di vetture con turbina a gas per trazione diretta, sia nel campo delle automobili sia in quello dei mezzi pesanti .

La Rover realizzò nel 1949 la prima vettura a turbina, la Jet 1, un prototipo da 200 CV e 246 km/h: la configurazione a due alberi presentava un compressore rotante a 40.000 giri/min e turbina di potenza a 26.000 giri/min, senza rigeneratore, che comparve nel 1956 nella Rover T6. I consumi si aggiravano sui 20 litri/100 km, non troppo distanti dai consumi delle vetture convenzionali di quell’epoca. I successivi prototipi (T3, T6) mostrano chiaramente che l’idea della Rover era quella di realizzare una vettura GT da strada (Fig. 5.15 e 5.16).

La Fiat presentò nel 1954 la “8001” (Fig. 5.17), un prototipo coupé sportivo a due posti azionato da turbina a gas, con un peso totale di 1000 kg, che svolse delle prove di durata sulla pista del Lingotto, raggiungendo i 250 km/h. Il motore non rigenerativo con compressore e turbina a due stadi, turbina di potenza monostadio e relativo gruppo riduttore per la trasmissione alle ruote forniva una potenza di 200 CV a 22.000 giri/min.



Fig. 5.15 - La Rover Jet 1



Fig. 5.16 - La Rover Jet T3

Il telaio era a quattro ruote indipendenti, senza cambio di velocità, con funzionamento della turbina di potenza simile concettualmente a quello di un convertitore idraulico. La struttura del telaio era formata da elementi tubolari, e i due serbatoi carburante erano collocati ai lati del telaio, in posizione centrale. Il propulsore, completamente asportabile come nelle applicazioni aeronautiche, era impiantato nella parte posteriore.

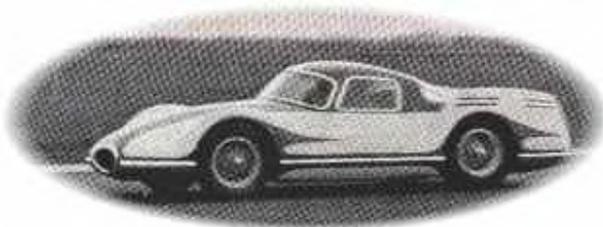
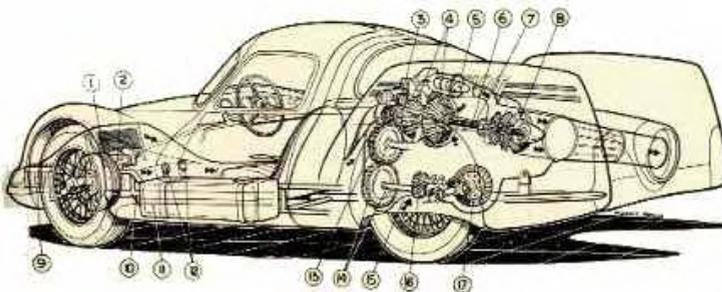


Fig. 5.17 - La Fiat 8001



- 1) Radiatore olio. 2) Sospensione anteriore derivata 8v. 3) Pignone avviamento elettrico.
- 4) Due compressori centrifughi in serie. 5) Camera di combustione. 6) Albero di trasmissione turbina-riduttore. 7) Albero trasmissione turbine primarie-compressori. 8) Turbina motrice. 9) Batterie. 10) Telaio tubolare. 11) Serbatoio laterale. 12) Due pedali: gas e freni.
- 13) Scatola riduttore. 14) Pignone riduzione 10:1. 15) Presa d'aspirazione dei compressori. 16) Ingranaggi riduzione. 17) Corona del ponte posteriore

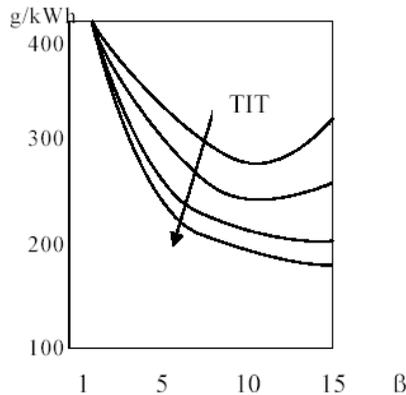


Fig. 5.18 - Curve del consumo specifico di un gruppo turbogas in funzione del rapporto di compressione e della temperatura di ingresso in turbina, TIT

Nel tempo si sono succedute realizzazioni di questo tipo da parte di altre case automobilistiche, ma l'idea è stata poi abbandonata nel campo della trazione leggera a causa delle problematiche che nascono dall'accoppiamento diretto tra turbina e albero di trasmissione.

È utile esaminare alcuni problemi di natura sia termodinamica sia tecnologica per sottolineare come il turbogas non possa risultare una soluzione conveniente per la trazione automobilistica. Come già accennato, i parametri caratterizzanti il funzionamento di un gruppo turbogas sono la temperatura massima, il rapporto di compressione e i rendimenti di compressore e turbina, i cui valori incidono fortemente sul consumo specifico di carburante.

Motori di elevate potenze (>100 kW e fino a centinaia di MW) e notevoli dimensioni, in cui è più facile raggiungere rendimenti elevati grazie alla possibilità di raffreddare le palette statoriche e rotoriche della prima turbina per ottenere temperature di combustione più elevate, presentano consumi inferiori, mentre per piccoli motori (<100 kW) destinati ad essere alloggiati nel cofano di un'automobile ciò è senz'altro più difficoltoso.

La temperatura massima può essere aumentata oltre gli usuali 1000-1100 °C con l'utilizzo di materiali ceramici (ormai in una fase di sviluppo vicina alla commercializzazione, ma ancora molto costosi) per le parti termicamente più sollecitate. Un serio problema che affligge tale soluzione è l'affidabilità in condizioni operative reali: la vita media di un rotore in ceramica non è sufficientemente lunga da permettere il suo uso in applicazioni stradali caratterizzate da frequenti start-up e shut-down.

Altra caratteristica comune dei gruppi turbogas usati in applicazioni automobilistiche è il distributore variabile della turbina di trazione: la variazione dell'inclinazione delle palette del distributore è essenziale ai fini della regolazione della potenza, effettuata calibrando la quantità di combustibile iniettato.

In fase di accelerazione occorrerebbe infatti un rapido aumento di velocità di rotazione del compressore in modo da aumentare la portata d'aria nel combustore e conseguentemente nella turbina di potenza, mantenendo costante la temperatura massima: tale operazione, a causa dell'inerzia del sistema, può richiedere alcuni secondi, con il risultato di una cattiva "guidabilità" che costituisce un serio inconveniente per applicazioni automobilistiche.

Il rimedio sta in un progetto che minimizzi l'inerzia del sistema, ma anche nell'uso del distributore mobile: un regolatore elettronico, in base ai segnali provenienti da sensori che rilevano temperature, pressioni, velocità e posizione dell'acceleratore, agisce rapidamente, oltre che sull'iniettore, sul distributore, in modo da riversare i gas, prima frazionati tra le due turbine, nella turbina del compressore, che in tal modo viene prontamente accelerato.

In caso di decelerazione, l'effetto dei freni è coadiuvato da un opportuno "miscambering" delle palette del distributore comandato dal regolatore, che vengono rotate di un angolo sufficiente a far sì che la turbina funzioni in "reverse flow", con effetto frenante del motore.

La curva di coppia precedentemente descritta per la turbina di trazione resta valida in un campo di velocità compreso tra il 50 e il 100% della velocità di regime, in cui la stessa turbina svolge la funzione di cambio automatico.

Tuttavia, i tentativi di abolire il cambio in un propulsore terrestre a turbogas sono vanificati dal fortissimo calo del rendimento della turbina di trazione al di sotto del 50-60% della velocità di regime, che rende illusorio l'accrescimento lineare della coppia al diminuire della velocità di rotazione. Si può inserire un riduttore meccanico tra turbina di potenza e assi ruote, in modo che la turbina possa mantenersi in un regime di rotazione opportuno, ma questo espediente porta ad una diminuzione del rendimento globale del sistema, a causa delle inevitabili perdite meccaniche aggiuntive.

5.4.2 Applicazioni ferroviarie

Anche nel campo ferroviario si sono avute applicazione dei turbogas, quando, nel secondo dopoguerra, gli sviluppi della propulsione a reazione avviano la sperimentazione su larga scala con numerose realizzazioni, che nascono, non a caso, nei paesi all'avanguardia in campo aeronautico, Stati Uniti, Russia, Francia ed Inghilterra.

La forte connotazione "aeronautica" di questa motorizzazione caratterizza alcune realizzazioni come ad esempio i turbo-treni della United Aircraft (costruiti dalla Sikorsky), che a partire dal 1968 furono utilizzati negli Stati Uniti ed in Canada, tra Boston e New York e tra Toronto e Montreal (Fig. 5.19).

Negli anni successivi assunsero a notorietà i turbotreni francesi RTG ed ETG, e successivamente il TGV 001, che conquistò il primato mondiale di velocità (310 km/h) per i treni non-elettrici.

Oggi il loro disegno è desueto da molti punti di vista, principalmente dal punto di vista della rumorosità e dell'alto consumo di combustibile; infatti, quando dopo la prima crisi energetica nel 1973 il prezzo del petrolio quadruplicò, anche in Francia fu deciso di usare la trazione elettrica per i treni ad alta velocità. Ciononostante i turbotreni francesi hanno dimostrato ampiamente, anche in condizioni ambientali molto dure ed estreme come il grande Nord americano, l'Egitto e l'Iran, le loro doti di affidabilità e disponibilità, come una vita media di più di 100.000 ore e lunghi intervalli di tempo tra due revisioni successive⁵. Gli sviluppi dell'elettificazione in Francia hanno poi portato nel 2005 al ritiro dal servizio di questi convogli.



Fig. 5.19 - Il Turbo-Train della Sikorsky

5.4.3 Applicazioni in tipologia ibrida

Lo sviluppo della tecnologia dei veicoli ibridi ha recentemente rinnovato l'interesse per la turbina a gas, stavolta però collegata ad un generatore elettrico ad elevata frequenza. Sono da citare due studi prototipali: quello della Volvo e quello della Renault.

La Volvo ha presentato nel 1992 un prototipo di TG-ibrido, la ECC, Environmental Concept Car, una vettura a tre volumi che risponde alle prescrizioni ZEV quando è in trazione elettrica, e ULEV quando è in funzione il turboalternatore (Fig. 5.20).

La ECC presenta un gruppo turbogeneratore di 237 kg da 38 kW che ruota a 90.000 giri/min, e il funzionamento contemporaneo del generatore e delle batterie fornisce una potenza massima di 80 kW disponibile per il motore elettrico, con cambio automatico a due marce.

⁵ Circa 9.000 ore per le MAKILA della Turbomeca.



Fig. 5.20 - La Volvo ECC [4]

© Arne Granfoss

Il sistema di controllo HSG, gestito dal VMU, Vehicle Management Unit, provvede ad allocare in modo ottimale la potenza erogata dal generatore e dalle batterie tramite la richiesta del pedale dell'acceleratore e gli impulsi di altri sensori presenti a bordo, come quelli che verificano lo stato di carica del gruppo batterie al nichel/cadmio di 315 kg.

La messa in moto del turbogas è realizzata in una decina di secondi dall'alternatore, alimentato da un inverter che accelera il motore fino a 42.000 giri/min. Si hanno a disposizione tre pulsanti per la selezione del tipo di marcia desiderato:

- *con batterie*: il motore elettrico è alimentato soltanto dal pacco batterie;
- *ibrida*: il VMU mette in funzione il turbogas quando lo stato di carica delle batterie è basso o quando c'è una richiesta di potenza maggiore di quella erogabile dalle batterie;
- *turbogas*: su percorso extraurbano regolare.

I picchi in accelerazione o in frenata si traducono in erogazione o in ritorno di corrente alle batterie attraverso il recupero in frenata, ottimizzato dalla presenza di un sistema ABS controllato dal VMU.

La velocità massima della ECC è di 175 km/h con l'utilizzo contemporaneo del turbogeneratore e delle batterie, con una autonomia elettrica di 85 km e di 670 km a gasolio, con un consumo urbano di 6 litri per 100 chilometri e una accelerazione da 0 a 100 km/h in circa 13 secondi.

Le emissioni della ECC sono:

| | |
|---------|-------------------------|
| - 0,006 | g/km di HC |
| - 0,08 | g/km di CO |
| - 0,45 | g/km di NO _x |

Il progetto Renault, denominato "Vert", realizzato nel 1996 sulla base di una Espace, presenta due motori elettrici, ognuno da 45 kW e pesante 38 kg, calettati sulle ruote anteriori e alimentati dal gruppo batterie o dal turboalternatore, oppure da entrambi. Tali motori sono del tipo sincrono a magneti permanenti, che attualmente coniugano le migliori prestazioni in termini di rendimento e di peso:

- elevata potenza specifica, con limitazione di peso e ingombro
- curva di coppia favorevole
- rendimento elevato.

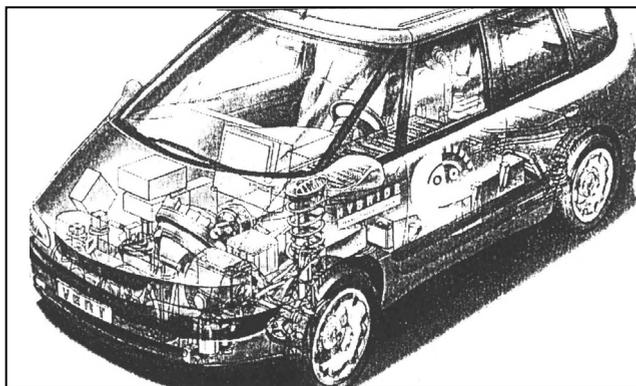


Fig. 5.21 - La Renault Vert [4]

L'installazione del cambio di velocità è resa inutile dalle curve caratteristiche di tali motori, raffreddati ad olio, che assicurano una trasmissione continua e una guida piacevole: inoltre la loro posizione di montaggio provvede alla funzione di differenziale elettronico, eliminando il classico differenziale meccanico.

Le 240 batterie al nichel/cadmio sono installate sotto il pianale, isolato rispetto all'abitacolo, e sono in grado di fornire, con un peso di 275 kg, una potenza massima di 63 kW per la tipica circolazione in ciclo urbano con una autonomia elettrica di circa 30 km. La loro ricarica (completata in 3 ore) si effettua durante la marcia attraverso il turboalternatore o, a veicolo fermo, mediante una comune presa di corrente.

Il turboalternatore, del peso di 125 kg, è costituito da un alternatore a magneti permanenti e da un turbogas, ruotanti coassialmente a 90.000 giri/min, senza bisogno di alcun tipo di riduttore: la turbina aziona direttamente l'alternatore, che fornisce energia elettrica alle batterie (tramite un convertitore di carica AC/DC), ed ai motori elettrici.

La turbina da 38 kW sfrutta uno scambiatore di calore per il preriscaldamento dell'aria e una camera di combustione a pre-miscelazione e prevaporizzazione povera, con emissioni ridotte di HC, CO e NO_x.

L'aria aspirata è compressa con rapporto 4:1 dal compressore azionato dall'albero della turbina.

Lo scambiatore di calore rigenerativo per il recupero del calore dei gas di scarico è del tipo Ljungström: è costituito da un corpo ceramico in rotazione a 20 giri/min, alternativamente in contatto con i gas caldi in uscita dalla turbina e l'aria compressa fredda.

Prima di raggiungere la zona di combustione, il carburante è vaporizzato e miscelato all'aria con swirl controllato, e dopo essere stata innescata da una candele di accensione, la combustione continua all'interno della camera a pressione costante: i gas combusti sono immessi ad una temperatura di circa 1025 °C in turbina, dalla quale escono a circa 700 °C, per poi venire raffreddati fino a 300 °C attraverso il passaggio nel rigeneratore.

La gestione del sistema, con l'ottimizzazione di prestazioni, consumi ed emissioni inquinanti, è effettuata da una centralina elettronica che controlla istantaneamente le richieste di potenza tenendo contemporaneamente conto delle posizioni dei pedali, freno e acceleratore, e del "tipo di missione" selezionato:

- *Città*: priorità data alla funzione "zero emissioni", sfruttando – finché possibile – esclusivamente le batterie come fonte energetica per il funzionamento dei motori elettrici;
- *Strada*: il modulo di controllo ricerca continuamente le migliori condizioni di compromesso tra l'utilizzo delle batterie e del turboalternatore per l'alimentazione dei motori elettrici.
- *Ricarica*: priorità data alla ricarica batterie tramite il turbo-alternatore.

La Vert, generando un bassissimo livello di emissioni inquinanti grazie alla qualità di combustione continua e con regimi transitori lenti, si pone nella categoria delle vetture ULEV (Ultra Low Emission Vehicles): il risultato è molto incoraggiante, specie perché è stato ottenuto senza uso di marmitta catalitica e con gasolio come combustibile, il che lascia ampio spazio per un ulteriore abbattimento del livello di emissioni.

Anche l'inquinamento acustico subisce un drastico decremento, con rumorosità esterna ed interna minore di quella di un veicolo tradizionale, e addirittura trascurabile in funzionamento urbano grazie alla trazione esclusivamente elettrica.

La velocità raggiunta con il solo gruppo turboalternatore è di 130 km/h, ma l'abbassamento ulteriore del pedale dell'acceleratore provoca l'entrata in funzione delle batterie, con potenza che si eleva a 90 kW: si raggiunge una velocità di 165 km/h e una ripresa da 80 a 120 km/h in meno di 20 secondi, il tutto senza azionare alcuna leva del cambio.

Il consumo di combustibile è di circa 300 g/kWh. Le emissioni della Vert sono:

- 0,06 g/kWh di HC
- 1,5 g/kWh di CO
- 0,45 g/kWh di NO_x
- 0,07 g/kWh di particolato

5.4.4 *Possibilità di ottimizzazione per i sistemi ibridi con turbogas*

Rimandando alla Parte III, dedicata al progetto di sistema, per l'ottimizzazione del dimensionamento del gruppo di generazione ibridizzato, si accenna per il momento alla necessità di una ottimizzazione della regolazione del gruppo turbogas.

L'obiettivo è di quello di mantenere sufficientemente alto il rendimento anche in condizioni di carico parziale, tramite controllo elettronico sulla portata di combustibile e sul grado di apertura delle palette a calettamento variabile del distributore della turbina, con pale IGV all'ingresso del compressore.

Tale soluzione sembra rendere accettabile la variazione di rendimento del turbogas per un campo operativo compreso tra il 70% ed il 110% della potenza nominale.

Se questo richiedesse poi un dimensionamento troppo oneroso per il sistema di accumulo elettrico, una soluzione interessante, almeno per sistemi di trasporto di potenze medio-elevate come una automotrice ferroviaria, è quella di frazionare la potenza richiesta al gruppo turbogas tra più macchine, con un intervento sequenziale delle stesse al crescere della potenza richiesta.

Nella Parte IV del volume, il tema delle applicazioni dei turbogas ai sistemi di trazione ibridi è ripreso ed approfondito attraverso l'esposizione di un progetto sviluppato presso la Università di Roma "La Sapienza" [2,3,4,5], denominato Low Emission Turbo-Hybrid Engine ("LETHE").

Bibliografia

- [1] E.A. Bashkarone, 2006: *Principles of Turbomachinery in air-breathing engines*, CUP
- [2] R. Capata, A. Coccia, M. Lora, E. Sciubba, 2005: *The Gas Turbine Hybrid Vehicle prototype of the University of Roma 1: status overview*, Proc. IMECE'05, Orlando, FL-USA
- [3] R. Capata, E. Cioffarelli, E. Sciubba, 2006: *The concept of the gas Turbine based Hybrid Vehicle: System, Design and configuration issues*, Int. J. En. Res., v.30
- [4] R. Capata, M. Lora, 2007: *The LETHE gas turbine hybrid prototype vehicle of the U. of Roma 1: Drive cycle analysis of model vehicle management unit*, ASME J.E.R.T., v. 129, n.2
- [5] E. Cioffarelli, 2004: *Modellazione di un Sistema di Propulsione Ibrida per Veicolo avente come Motore Primo Termico un Gruppo Turbogas*, Ph.D. Thesis, U. of Roma1
- [6] E. Cioffarelli, E. Sciubba, 2000: *A new type of gas-turbine based hybrid propulsion system: concept development, definition of mission parameters and preliminary sizing*, Proc. ASME-IMECE WAM, Orlando, Fla.
- [7] A. Di Napoli, G. Pede, 2002: *Hybrid storage system: an optimization case*, SAE paper 2002-01-1914
- [8] W.H. Hucho, G. Sovran, 1993: *Aerodynamics of road vehicles*, Ann. Rev. Fl. Mech.,
- [9] G. Pede, V. Sglavo, M.Conte, G.Mantovani, D. Gostoli, D.Macerata, 2003: *High power lead-acid battery for heavy-duty HEV, on the road and laboratory performance and reliability assessment*, SAE paper SP-1750
- [10] M. Rautenberg, M. Malobabic, 1985: *On Turbochargers with Variable Geometry*, ASME Paper 85-GT-149
- [11] G. Silva-Caveiro, 2006: *Feasibility analysis and preliminary design of a ultra-micro-turbogas, with a CFD analysis of the compressor*, M. Eng. Thesis, University of Roma 1
- [12] V. Lakshminarasimhan, M. S. Ramasamy, Y. R Badu, Four stroke gasoline engine performance optimization using statistical techniques, SAE 2001011800/4221.
- [13] D. R. Johnson, S. Diamond, Heavy Vehicle Propulsion Materials Program: Progress And Highlights, SAE 2000-01-2200.
- [14] Mitsubishi Motor Co. Modeling and Control of a Gasoline Direct Injection Engine,
- [15] L. Mianzo, H. Peng, Modeling and Control of a Variable Valve Timing Engine, Proceedings of the American Control Conference Chicago, Illinois June 2000.
- [16] J. J. Botti, C.E. Miller, SAE Powertrains of the future: Reducing the Impact of the Transportation on the Environment, 1999-01-0991.
- [17] A. G. Diaz, D. T. Phillips, Principles of experimental design and Analysis, Chapman & Hall.
- [18] P. J. Ross, Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw-Hill Book Company.
- [19] User's Guide AVL Boost, version 4.0, May 2002

CAPITOLO 6

MACCHINE ELETTRICHE NEI SISTEMI ELETTRICI DI PROPULSIONE

Giampiero Brusaglino *, Vittorio Ravello **

* ATA, ** Centro Ricerche Fiat

In questo capitolo verranno descritte ed analizzate le macchine elettriche impiegate per la propulsione e saranno considerate le tipologie più frequentemente adottate, richiamandone sia i principi costitutivi e funzionali di base che l'architettura specifica della macchina (essendo questa suscettibile di varianti legate alle esigenze di integrazione nella struttura del veicolo). Non si entrerà però nel merito della loro progettazione, essendo il tema ampiamente trattato nei corsi specifici.

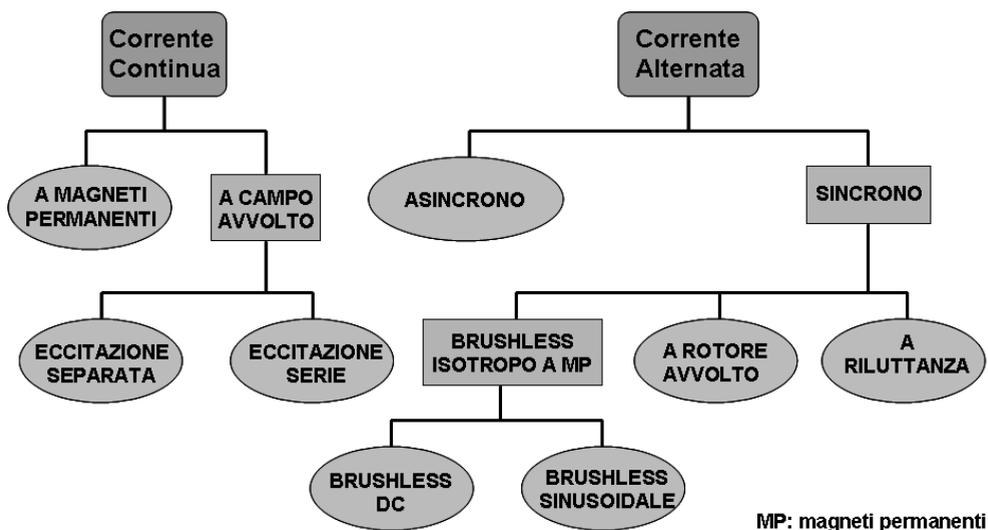


Fig. 6.1 - Macchine elettriche alimentate in corrente continua ed alternata: principali tipologie

6.1 Macchine alimentate in corrente continua

La soluzione "storica", oggi limitata ad applicazioni per veicoli ad alimentazione puro elettrica speciali con prestazioni limitate¹, è quella del motore a corrente continua (DC) con commutatore meccanico (collettore e spazzole). Esso presenta, a livello di controllo, alcune caratteristiche che lo rendono particolarmente adatto all'impiego per la trazione.

¹ Ad esempio: veicoli per aeroporti, stazioni ferroviarie, golf-car, carrelli elevatori.

Specialmente nella versione con eccitazione serie tale motore è caratterizzato da un ampio campo coppia-velocità e da una certa facilità di regolazione. Tuttavia tali doti, particolarmente apprezzabili quando non si disponeva di sistemi di regolazione e conversione evoluti, sono meno importanti oggi quando il motore è controllato da un moderno sistema elettronico. Al contrario, la presenza del collettore, lo sviluppo del calore soprattutto nel rotore, la complessità della struttura con il costo relativo rappresentano altrettanti fattori sfavorevoli per l'applicazione automobilistica.

6.1.1 *Macchine in corrente continua ad eccitazione serie*

Precedentemente all'avvento delle tecnologie elettroniche attualmente disponibili, era senza dubbio il sistema di propulsione maggiormente diffuso nella trazione elettrica. La sua caratteristica meccanica intrinseca ben si adatta alle esigenze della propulsione veicolare, grazie all'elevata coppia allo spunto.

La regolazione del motore avviene tramite la regolazione della tensione di alimentazione, in origine per via elettromeccanica², in seguito, con il progresso tecnologico dell'elettronica di potenza, tramite convertitore di potenza DC/DC (chopper) ad 1, 2 o 4 quadranti.

Dal punto di vista tecnico, tali motori presentano degli inconvenienti che li rendono meno concorrenziali rispetto ad altri tipi di motore. Sono infatti caratterizzati da un volume e un peso non indifferenti (che devono sempre essere tenuti in considerazione per applicazione su vetture), una scarsa efficienza soprattutto alle basse velocità e presentano inoltre delle peculiarità che li rendono poco adatti alla frenatura rigenerativa, che rappresenta invece un fattore molto importante per poter incrementare l'autonomia (veicoli a trazione puro elettrica a batterie o a celle a combustibile e batterie) o contribuire alla riduzione dei consumi (veicoli ibridi termico elettrici).

I costi d'esercizio sono più elevati rispetto ad altre motorizzazioni a causa soprattutto delle spazzole e dei commutatori; la cui presenza è probabilmente il fattore che maggiormente pesa in modo negativo sull'utilizzo di tali motori. Il commutatore infatti richiede maggior manutenzione ed è sede di perdite.

A causa delle velocità massime non troppo elevate che questi motori possono raggiungere, sono spesso forniti di un cambio meccanico per potersi meglio adattare alle esigenze automobilistiche, sostituendo in un certo senso l'effetto, in termini di velocità, dell'indebolimento di campo (deflussaggio) che caratterizza ad esempio i motori DC ad eccitazione separata descritti poco più avanti, introducendo così un ulteriore fattore di perdita e di complessità.

² Ad esempio con sistemi ad inserzione/disinserzione di resistori.

6.1.2 Macchine in corrente continua ad eccitazione separata

Un sistema di propulsione con motore DC ad eccitazione separata fornisce alcuni miglioramenti alle prestazioni del sistema stesso, conservando allo stesso tempo i vantaggi del motore DC con eccitazione serie.

La velocità del motore può essere almeno doppia rispetto alla velocità di base tramite il controllo del campo di deflussaggio.

In questo caso vi è la possibilità di una doppia regolazione: nella pratica usuale, infatti, l'eccitazione e quindi il flusso sono mantenuti costanti sino alla velocità nominale del motore, agendo sulla tensione di armatura per la regolazione della velocità (zona a coppia costante), mentre, per aumentare quest'ultima al di sopra di quella nominale, la tensione di armatura è mantenuta costante e il campo viene indebolito (zona a potenza costante) agendo sull'alimentazione dell'avvolgimento statorico di eccitazione.

In Fig. 6.2 è riportata la tipica caratteristica coppia-velocità. Si possono distinguere quattro regioni: nella 1 e 2 il motore svolge la sua normale funzione di trazione, mentre nelle 3 e 4, caratterizzate da una coppia negativa, si comporta da generatore, in quella particolare fase che è stata anche precedentemente definita di "frenatura rigenerativa". Quando il motore opera nelle regioni 1 e 4, ovvero fino a velocità base, viene mantenuta costante la corrente di campo, e quindi il flusso, e il controllo della velocità è normalmente attuato tramite un chopper che agisce sull'alimentazione di armatura.

Nelle regioni 2 e 3, ovvero da velocità base a velocità massima, la tensione di armatura è mantenuta al suo valore massimo e la velocità è regolata attraverso l'indebolimento del campo riducendo la corrente di eccitazione.

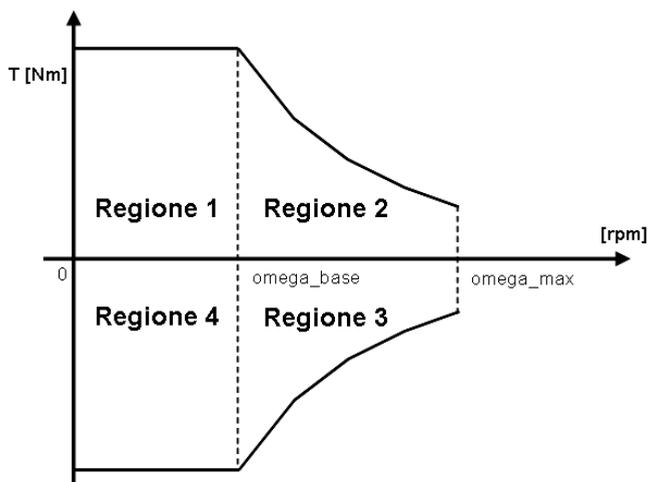


Fig. 6.2 - Caratteristica coppia-velocità di un motore DC ad eccitazione separata

È da notare come la regolazione di campo agisca, fino ad un certo limite, come un cambio meccanico dalla velocità di base a quella massima. Tuttavia l'uso di un cambio meccanico può essere vantaggiosamente integrato anche con i motori DC ad eccitazione separata (come ad esempio sulla Volkswagen Golf Cytstromer) per accrescere le prestazioni del veicolo essendo comunque la velocità massima limitata per la presenza del sistema di commutazione elettromeccanico.

Per quanto riguarda gli svantaggi, sono in pratica gli stessi riscontrati nel motore serie, quindi la presenza di spazzole e commutatori con conseguenti perdite e necessità di manutenzione, il peso, l'ingombro, la limitata velocità massima...

6.1.3 *Macchine in corrente continua a magneti permanenti*

In queste macchine, diversamente dalle precedenti, il flusso principale è ottenuto disponendo in modo opportuno sullo statore dei magneti permanenti in luogo dell'avvolgimenti di eccitazione. Per effetto la realizzazione della macchina risulta più compatta, semplice ed efficiente (non presentando perdite Joule sullo statore) e non richiede un'alimentazione elettrica dello statore. Per converso la sostanziale non regolabilità del flusso impone di fatto la necessità di un convertitore elettronico di tipo DC/DC tra sorgente e macchina elettrica che provveda a realizzare "elettronicamente" il deflussaggio o in alternativa-combinazione l'uso di un cambio di velocità a più marce per avere alle ruote un comportamento a potenza circa costante.

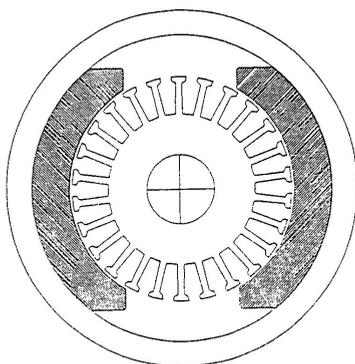


Fig. 6.3 - Macchina a corrente continua con eccitazione a magneti permanenti

6.2 **Macchine alimentate in corrente alternata**

Contrapposte alle macchine DC vi sono tutte le macchine classificate come "a corrente alternata" (AC) per l'assenza del collettore e l'esigenza di una alimentazione dello statore con tensioni alternate (di norma, ma non sempre, almeno a livello di prima armonica, sinusoidali).

Esse di conseguenza richiedono un generatore di tensione-corrente alternata a frequenza variabile, l'inverter, la cui assenza in passato ha determinato l'impossibilità all'adozione di questi motori in applicazioni di trazione. Con l'introduzione di componenti elettronici di potenza efficienti ed affidabili, capaci di accensione e spegnimento controllato (switch di potenza), l'uso dell'inverter non è più un problema rilevante come in passato. Nella tecnica degli azionamenti la prevalenza delle soluzioni con motori AC è ormai consolidata. Nella stessa trazione ferroviaria e tramviaria si va ormai verso una adozione pressoché generalizzata degli azionamenti in corrente alternata.

I vari tipi di motori a corrente alternata presentano ognuno qualche caratteristica favorevole. In generale, l'assenza del collettore aumenta l'affidabilità e consente l'adozione di velocità di rotazione più elevate, con conseguente riduzione a parità di potenza della coppia richiesta e quindi del volume e peso della macchina.

Il motore asincrono presenta una costruzione del rotore assai solida ed economica, che costituisce un notevole vantaggio, soprattutto per impieghi di larga serie come quello automobilistico.

I motori sincroni a magneti permanenti ("brushless"), oltre a non avere dissipazione di potenza nel rotore, facilitano il raggiungimento di un elevato rendimento, particolarmente importante in un veicolo alimentato a batteria o Fuel Cell. Tuttavia, la difficoltà di ridurre il valore del flusso alle alte velocità costituisce in tal caso un fattore sfavorevole soprattutto in termini di rendimento a carico parzializzato.

6.2.1 Macchina asincrona o ad induzione

È un motore molto diffuso a livello industriale, robusto, caratterizzato da buona efficienza e affidabilità, costruttivamente semplice e quindi poco costoso.

Ha potenza e coppia specifica più elevate dei motori DC grazie all'assenza del collettore ed alla sua maggior velocità di rotazione che può risultare, con tecnologie convenzionali, dell'ordine di 15-20.000 rpm (giri/minuto) contro i 6-7.000 del motore DC; tuttavia ad alte velocità le perdite del rotore possono diventare consistenti e può essere necessario raffreddare il rotore.

Analogamente a quanto visto per i motori a commutazione elettronica, anche con l'adozione dell'asincrono (tipicamente trifase) al posto del motore DC si ha il vantaggio dell'eliminazione delle spazzole e di tutti i commutatori elettromeccanici, compreso il collettore a lamelle, ottenendo così un motore con meno perdite e che non richiede in pratica manutenzione, oltre ad essere più piccolo e leggero.

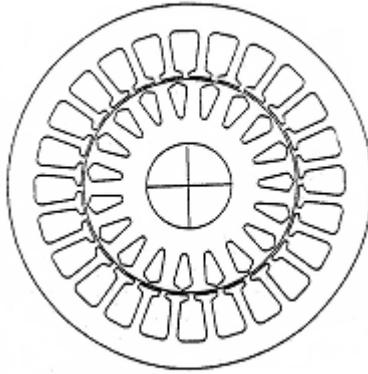


Fig. 6.4 - Macchina ad induzione con rotore a gabbia di scoiattolo

Il suo concetto funzionale è l'interazione tra un campo magnetico rotante³ (forza magnetomotrice pseudosinusoidale) statorico ed un campo di correnti indotte nel rotore. La frequenza di tali correnti è pari allo "scorrimento", cioè la differenza tra la rotazione meccanica e la rotazione del campo induttore⁴.

Per le applicazioni di trazione, l'interfaccia elettronica che condiziona la potenza (inverter), deve convertire l'alimentazione DC in una forma d'onda trifase o multi-fase con prima armonica sinusoidale a frequenza variabile.

Variando opportunamente ampiezza e frequenza della tensione di statore, è possibile ottenere la relazione coppia-velocità necessaria a soddisfare esigenze di guida del veicolo; in particolare:

- la velocità del motore viene regolata variando la frequenza della tensione trifase fornita dall'inverter
- la regolazione della coppia viene ottenuta variando la fase della tensione di alimentazione e quindi lo scorrimento del motore che si traduce in una variazione della corrente assorbita ovvero una componente del vettore corrente in un opportuno riferimento di assi bifasi fissi o rotanti (controllo vettoriale)

I motori ad induzione (IM) presentano delle caratteristiche che permettono di usufruire di una efficiente frenatura rigenerativa che può essere ottenuta facilmente agendo in modo opportuno sul sistema di potenza e di controllo (inverter) senza bisogno di ulteriori componenti aggiuntivi.

³ Derivante dall'interazione di una terna di alimentazione trifase opportunamente sfasata nel tempo applicata ad un sistema trifase di avvolgimenti opportunamente sfasati nello spazio.

⁴ Pertanto a scorrimento nullo (velocità sincrona) le correnti indotte e quindi la coppia sono nulle.

Esistono molti esempi di applicazione di macchine asincrone a veicoli elettrici e ibridi prodotti, ad esempio le vetture elettriche GM E1 e Fiat Seicento Elettra, gli autobus ibridi IVECO.

6.2.2 *Macchina sincrona a magneti permanenti*

In generale, i PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motors) sono molto simili alle macchine elettriche sincrone con avvolgimento di rotore in DC (le più comuni per la funzione di generazione dell'energia elettrica anche per applicazioni veicolari (alternatori) ma praticamente non utilizzate per trazione), con la differenza che l'eccitazione è fornita da magneti permanenti montati sulla superficie o all'interno del rotore anziché da avvolgimenti rotorici di campo. Dal momento che non c'è differenza tra la fem indotta negli avvolgimenti statorici da un rotore con magneti permanenti o con spire d'eccitazione percorse da corrente continua, anche il modello matematico dei PMSM è molto simile a quello delle macchine elettriche sincrone a rotore avvolto. Nel funzionamento da motore, l'inverter deve generare un campo rotante di statore con forme d'onda statoriche di frequenza tale da assicurare sincronismo del campo statorico con quello rotorico.

Le due classificazioni base dei PMSM sono il tipo "Surface-mounted" dove i magneti sono montati sulla superficie esterna del rotore, ed il tipo "Internal-mounted", dove i magneti sono montati nell'interno della struttura stessa del rotore.

I principali punti di merito di questa soluzione sono l'elevatissima coppia specifica e l'efficienza massima (nei punti di progetto anche 95%). Per converso permangono i problemi di deflussabilità (generazione a livello statorico di un opportuno controcampo magnetico di compensazione) e di basso rendimento a carico parzializzato ad elevata velocità già descritti per i motori DC con eccitazione a magneti permanenti.

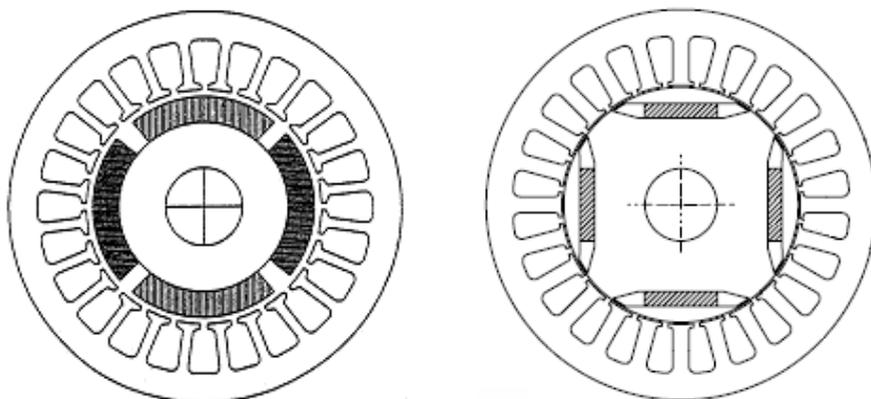


Fig. 6.5 - Macchine sincrone a MP Surface-mounted (a sinistra) ed Internal-mounted (a destra)

I DC Brushless a Magneti Permanenti superficiali si differenziano in base ad aspetti costruttivi e tipologia del controllo-alimentazione in:

- DC Brushless
- Brushless sincroni.

I DC Brushless, tipicamente trifase, grazie a correnti rettangolari e fem indotte trapezie, vengono controllati per sestanti dei 360 gradi elettrici come fossero motori DC a magneti permanenti (da cui il nome di DC Brushless). Tale comportamento è ottenuto con semplici e poco costosi sensori di posizione, un'opportuna realizzazione delle parti attive di macchina ed un controllo a due o tre fasi on.

La coppia specifica è la massima possibile (se i magneti sono in terre rare) ma il funzionamento, per effetto della brusca variazione della corrente durante la commutazione dei dispositivi di potenza dell'inverter, è affetto dalla presenza di una evidente pulsazione di coppia (ripple) che rende queste macchine poco adatte all'uso per trazione.

I Brushless Sinusoidali (o AC), anch'essi di norma di tipo trifase, si differenziano dai DC Brushless per la realizzazione e la diversa forma d'onda delle correnti statoriche che è di tipo sinusoidale anziché rettangolare. Per effetto la coppia è più dolce (grazie all'interazione di corrente sinusoidale e flusso sinusoidale), il ripple e le perdite sono minori. Per assicurare questo comportamento serve un sensore di posizione preciso (ad esempio un resolver a riluttanza) o un opportuno controllo sensorless.

Per quanto riguarda invece i motori sincroni a magneti permanenti Internal-mounted (macchine anisotrope) le realizzazioni risultano meccanicamente più robuste grazie alla loro caratteristica costruttiva che offre una naturale protezione fisica ai magneti permanenti (tenuta alla forza centrifuga) e la deflussabilità facilitata. La minore coppia specifica di tipo isotropo, effetto negativo dell'arretramento dei magneti nel rotore, può essere almeno in parte compensata combinando tramite un opportuno controllo la componente di coppia di anisotropia derivante dalla struttura magneticamente dissimmetrica.

Come per i motori DC a magneti permanenti e gli AC ad induzione, anche per i PMSM è stata sperimentata la configurazione a disco (usualmente, ma non sempre, a flusso assiale), che ne permette l'uso diretto nelle ruote eliminando i problemi connessi ai vari dispositivi meccanici usati con i motori convenzionali.

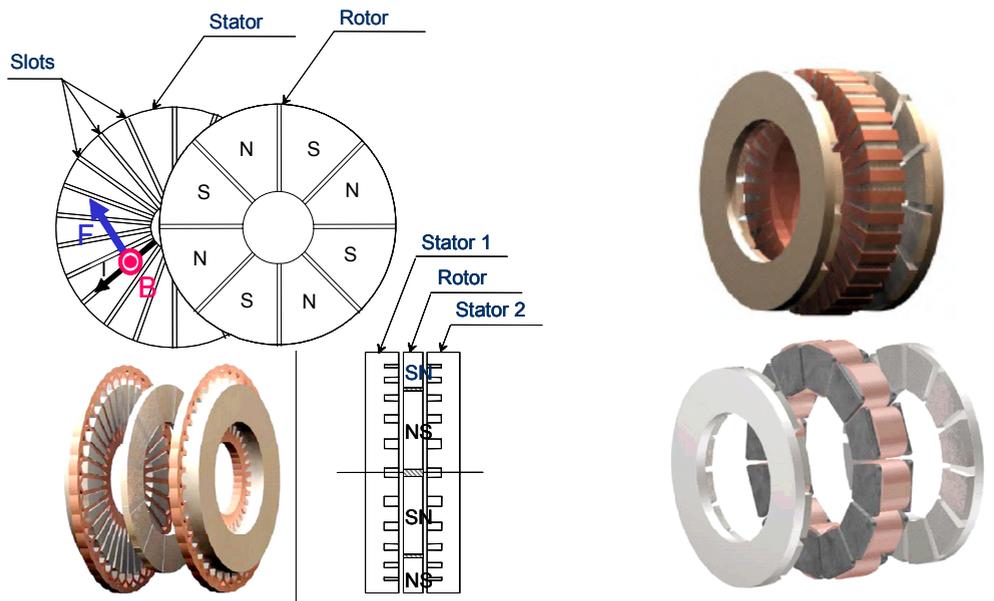


Fig. 6.6 - Soluzioni a flusso assiale con due statori ed un rotore e con uno statore e due rotori

6.2.3 *Macchina sincrona a riluttanza variabile, senza e con magneti di rifasamento*

La macchina sincrona a riluttanza è costituita da uno statore analogo a quello della macchina asincrona tri o polifase e da un rotore anisotropo in ferro, con guide di flusso in aria, ossia con canali di minima riluttanza.

La macchina presenta un rotore senza avvolgimenti e, di conseguenza, le perdite Joule sono sostanzialmente limitate agli avvolgimenti di statore facilitandone il raffreddamento.

Il rotore segue in sincronismo la rotazione del campo magnetico induttore, grazie all'incanalamento preferenziale del flusso nei canali di minima riluttanza.

Per effetto la macchina conserva i principali vantaggi di quella switched reluctance (di cui al paragrafo seguente) senza però le tipiche penalizzazioni a livello di ripple di coppia e rumorosità.

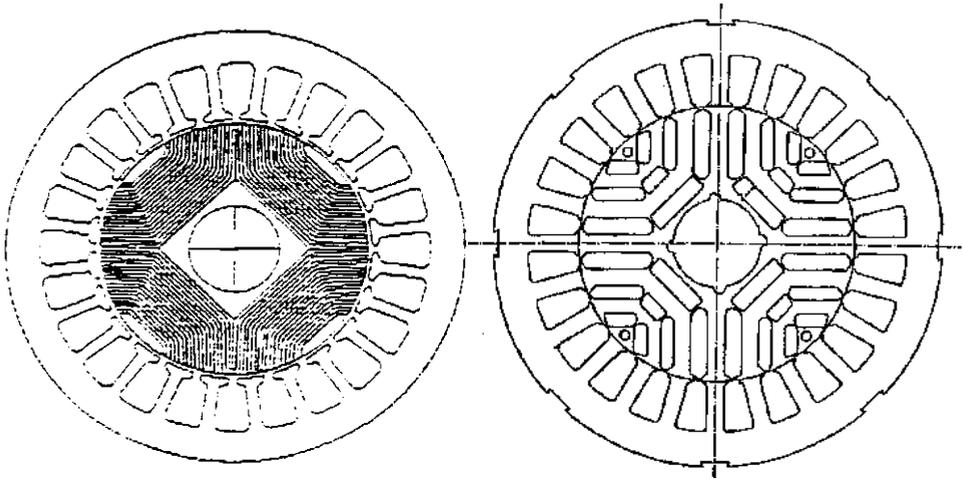


Fig. 6.7 - Soluzione con laminazione del rotore assiale e con laminazione trasversale

Aggiungendo delle limitate quantità di magneti permanenti nel rotore, è possibile migliorare significativamente il $\cos\phi$ (ottenendo di riflesso una diminuzione del dimensionamento dell'inverter ed un range di deflussabilità della macchina più esteso) ed inoltre incrementare la densità di coppia fino a valori confrontabili, nell'ipotesi di utilizzare magneti in terre rare, con i sincroni brushless isotropi con magneti permanenti in Sm-Co⁵.

È bene sottolineare che questi magneti vengono dimensionati per il rifasamento mentre la generazione del flusso principale, diversamente da quanto accade nelle macchine brushless a magneti permanenti, è sostanzialmente ottenuta, come nelle macchine asincrone, tramite la corrente statorica⁶.

La compensazione può essere ottenuta con magneti in ferrite o meglio con quantità più ridotte di magneti in terre rare.

⁵ I magneti vengono installati nelle zone a bassa permeabilità magnetica del rotore ed orientati in direzione dell'asse di minima permeabilità (di massima riluttanza) in verso opposto. Il loro dimensionamento può essere effettuato in modo da garantire la compensazione della componente del flusso in asse di massima riluttanza in funzionamento nominale oppure durante il deflussaggio per corrente in asse di massima permeabilità nulla. Nel primo caso si privilegia il valore del $\cos\phi$ nella regione intorno alla velocità base (tende all'unità) rispetto all'incremento del campo di deflussaggio, nel secondo caso il $\cos\phi$ risulta dell'ordine di 0,9 ma si ottiene il massimo range di deflussaggio possibile.

⁶ I magneti provvedono, spostando la posizione spaziale del vettore flusso, ad incrementare in deflussaggio l'angolo tra vettore flusso ed il vettore corrente. È però vero che l'interazione tra flusso rotorico di origine magnetica e correnti statoriche genera una pur ridotta componente di coppia elettromagnetica.

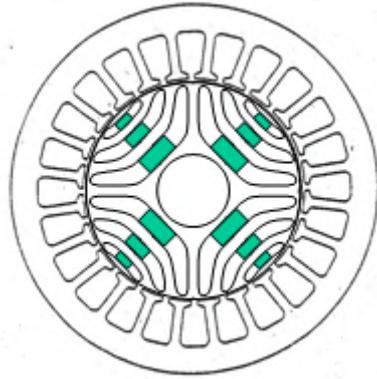


Fig. 6.8 - Soluzione con laminazione del rotore trasversale e magneti di rifasamento

Nella Fig. 6.9 sono mostrate due realizzazioni con magneti di rifasamento:

- il motore sviluppato negli anni novanta da Selin di Genova in collaborazione con CRF ed applicato sulle vetture elettriche a batterie prototipali Fiat Cinquecento e ZIC
- il motore progettato dal Politecnico di Torino e realizzato dall'ICPE per un'applicazione di propulsione ibrida parallela single shaft nell'ambito del Progetto Europeo ELMAS.

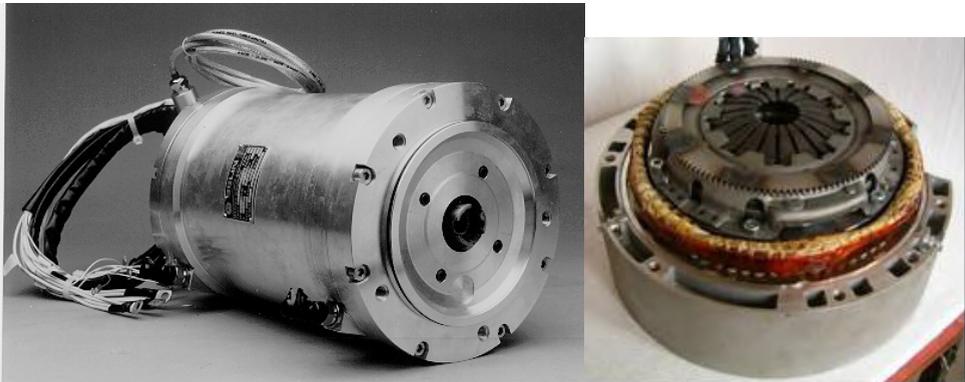


Fig. 6.9 - Esempi di macchine sincrone a riluttanza variabile con magneti di compensazione

6.3 Macchina a riluttanza commutata (switched reluctance)

La macchina è costituita da uno statore con poli salienti, concatenati singolarmente con avvolgimenti di eccitazione, e da un rotore a denti, in numero diverso da quello dei poli statorici privo di avvolgimenti e/o magneti permanenti.

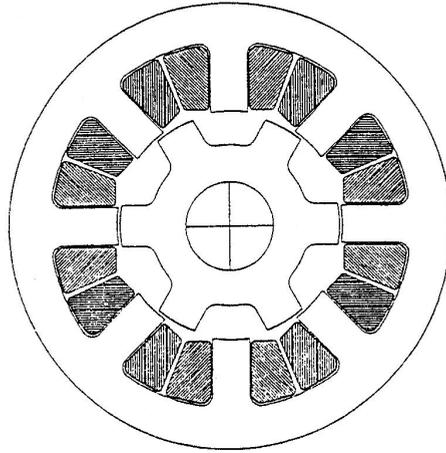


Fig. 6.10 - Schema della macchina a riluttanza commutata

La coppia è prodotta dalla tendenza dei denti rotorici ad allinearsi con i poli statorici, i cui avvolgimenti vengono alimentati ciclicamente a coppie diametrali dal convertitore elettronico (coppia di riluttanza prodotta attraverso il principio di minimizzazione della coenergia).

Il traferro minimo deve essere particolarmente ridotto per limitare, per quanto possibile, l'entità della corrente magnetizzante.

Il circuito del convertitore di potenza di alimentazione, diversamente da quelli delle macchine a riluttanza sincrona ed in generale di tutte le altre macchine in alternata e continua, richiede un unico interruttore per ogni polo di statore essendo il verso di percorrenza della corrente che attraversa gli avvolgimenti unidirezionale. Per effetto questo tipo di macchina non è in corrente alternata ma può comunque essere considerata una macchina ad alimentazione variabile essendo il profilo di alimentazione ciclico con frequenza crescente all'aumentare della velocità desiderata.

A fronte dell'evidente semplicità costruttiva, robustezza, elevati rendimento (rotore "freddo") e coppia a bassa velocità, si possono evidenziare i seguenti principali limiti:

- basso $\cos\phi \Rightarrow$ potenza apparente del convertitore elevata
- esigenza ad ogni commutazione di smagnetizzare e rimagnetizzare la macchina \Rightarrow sfavorevole dimensionamento dei componenti reattivi (condensatori) del convertitore di potenza
- uso parziale della macchina (solo due poli attivi per volta) \Rightarrow scarso sfruttamento delle parti attive
- discontinuità di alimentazione dei singoli poli \Rightarrow elevato ripple di coppia e rumorosità.

Per minimizzare il ripple di coppia ed il conseguente rumore si opera evitando forme d'onda quadre ed introducendo aree di commutazione da una coppia polare alla successiva con profili a rampa aventi corrente somma costante. Sono ovviamente possibili interventi anche più pesanti come ad esempio:

- profilo “smussato” dei denti (contro: limitazione della coppia specifica ottenibile)
- disaccoppiamento meccanico della parte attiva dello statore dal suo housing per evitare che le vibrazioni e la conseguente rumorosità si propaghino amplificandosi (contro: maggiore complessità costruttiva).

6.4 Considerazioni finali relative alle macchine per trazione elettrica ed ibrida

Si osservi che i motori ad alimentazione variabile considerati hanno strutture statoriche simili, ad eccezione dello switched reluctance quasi uguali tra loro, intese a generare un campo rotante al traferro di andamento sinusoidale (fatta di nuovo eccezione per lo switched reluctance).

Essi differiscono nel rotore (nell'ordine: gabbia di scoiattolo, magneti permanenti, struttura magneticamente isotropa/anisotropa e struttura geometricamente isotropa/anisotropa) come è schematicamente illustrato in Fig. 6.11, per macchine a 4 poli.

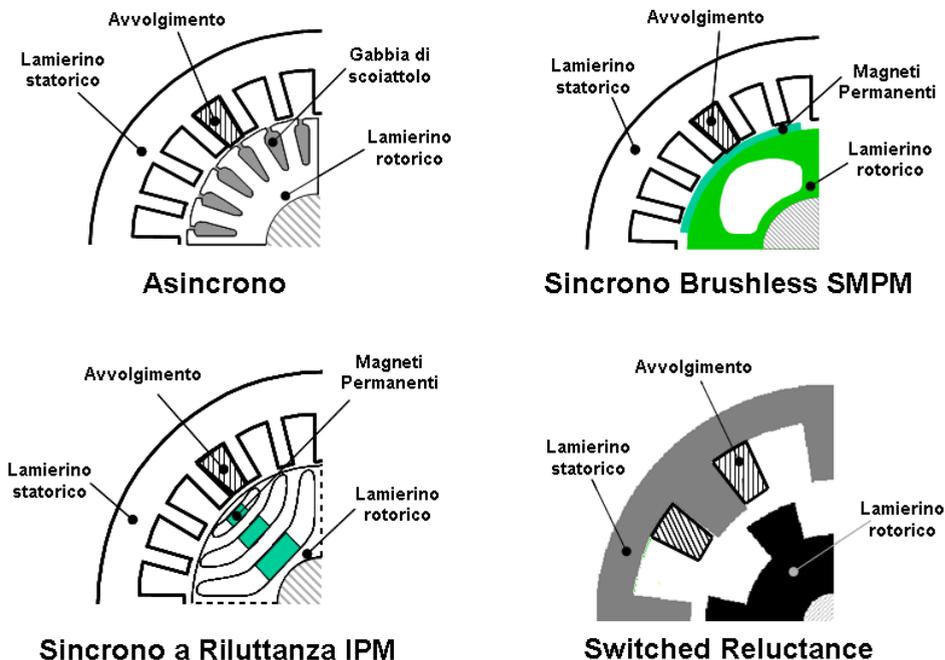


Fig. 6.11 - Strutture schematiche delle macchine con alimentazione variabile

Vale la pena di sottolineare che il motore a induzione si differenzia dagli altri motori per la potenza Joule dissipata nel rotore, che costituisce il principale svantaggio di questo motore.

Per il brushless invece, un fattore diversificante di rilievo è costituito dall'eccitazione tramite magneti permanenti. Essa produce, in generale, alta coppia specifica a scapito della deflussabilità e, conseguentemente, del dimensionamento del convertitore.

I motori anisotropi (a riluttanza sincrona e commutata) sono invece tra i più versatili, avendo buona coppia e buona deflussabilità. I limiti di ripple e rumorosità dello switched reluctance sono superati con la soluzione sincrona grazie alla generazione del campo magnetico rotante statorico ed alla struttura geometricamente simmetrica del rotore.

Volendo, almeno a livello quantitativo, confrontare tutte le diverse opzioni di macchina elettrica per la trazione puro elettrica e/o ibrida presentate, si possono riassumere le loro caratteristiche salienti nella Tab. 6.1.

Tab. 6.1 - Confronto qualitativo delle diverse tipologie di macchine elettriche per la trazione

| Tipologie \ Caratteristiche | DC | AC Asincrono | AC Sincrono Brushless PM | Switched Reluctance | AC Sincrono IPM e Sincrono a Riluttanza IPM |
|---|------|--------------|--------------------------|---------------------|---|
| Coppia Specifica [Nm/kg] | ♦ | ♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦ | ♦♦♦ |
| Potenza Specifica [kW/kg] | ♦ | ♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦ | ♦♦♦ |
| Sovraccaricabilità | ♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦♦ |
| Rendimento medio | ♦♦ | ♦♦♦ | ♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦♦ |
| Velocità massima | ♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦ | ♦♦♦ | ♦♦♦♦ |
| Campo di deflussaggio | ♦♦ | ♦♦ | ♦ | ♦♦ | ♦♦♦ |
| Basso ripple di coppia e NVH | ♦♦♦♦ | ♦♦♦ | ♦♦ | ♦ | ♦♦♦ |
| Robustezza meccanica | ♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦ |
| Raffreddabilità | ♦ | ♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦♦ |
| Costruibilità in volumi | ♦ | ♦♦♦ | ♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦ |
| Elettronica di potenza (semplicità e basso costo) | ♦♦♦♦ | ♦♦♦ | ♦♦ | ♦♦ | ♦♦♦ |
| Maturità della tecnologia | ♦♦♦♦ | ♦♦♦♦ | ♦♦♦ | ♦♦ | ♦♦♦♦ |

6.5 Macchine elettriche per ibridi e puro elettrici

L'integrazione delle macchine elettriche nei power-train richiede in ambo i casi una attenta selezione delle tecnologie più appropriate per soddisfare contemporaneamente i vincoli geometrico-prestazionali ed i target di costo [9].

6.5.1 Opzioni geometriche

in base al rapporto lunghezza/diametro del rotore (λ), sono distinguibili due macrofamiglie:

- macchine a ridotto λ^7 : questa soluzione è preferita nel caso di propulsori per veicoli ibridi ad elevata integrazione con il motore a combustione interna. Queste macchine possono essere sia a flusso radiale che assiale. In caso di integrazione di organi meccanici (es. frizioni) nel rotore, si prediligono realizzazioni a flusso radiale con elevato numero di paia poli (almeno 5 o 6)
- macchine ad elevato λ^8 : questa soluzione è preferita nel caso di propulsori per veicoli a trazione puro elettrica (ad esempio a batterie o a celle a combustibile). Queste macchine sono usualmente a flusso radiale, a basso numero di paia poli (non superiore a 3 per applicazioni da vetture) e con elevato range di deflussaggio. Tipiche richieste a livello di statore sono:
 - elevato rapporto rame/ferro (dell'ordine di 1,2÷1,3)
 - cave aperte
 - denti a profilo rettangolare
 - numero di cave per polo e fase elevato (almeno 3)
 - assenza di skewing.

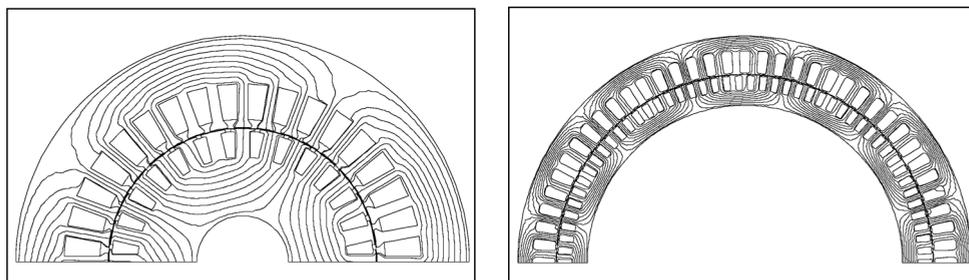


Fig. 6.12 - Esempio di macchine ad induzione a 2 e 6 paia poli

⁷ Di norma molto minore di 1 (macchine discoidali).

⁸ Di norma da circa 0,5 a 2.

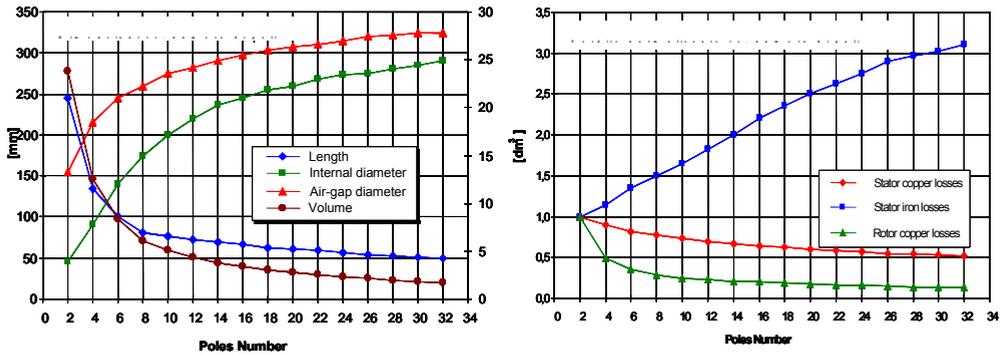


Fig. 6.13 - Effetti del numero di poli (p) sulla macchina elettrica (analisi a diametro esterno di statore fisso)

| Effetti positivi | Effetti negativi |
|---|--|
| Ad induzione fissa: ↓ gioghi ↓ peso e dimensioni A diametro esterno fisso: incremento del diametro di traferro ↑ coppia a corrente ed induzione al traferro costante | ↑ induttanza dispersa di statore e rotore ⇒ ↓ regione a potenza costante ↓ reattanza magnetizzante ⇒ ↑ corrente magnetizzante o dimensioni dei magneti rapporto lunghezza attiva/testate prossimo a 1 ⇒ ↑ impatto degli effetti di bordo e della resistenza di statore ↓ superficie di scambio termico ⇒ ↓ efficacia del raffreddamento; ↑ frequenza ⇒ ↑ perdite nel ferro |

Tab. 6.2 - Effetti dell'aumento del numero di poli (p) sulle prestazioni di macchina

6.5.2 Opzioni tecnologiche

Grazie ai significativi progressi fatti registrare nel campo della conversione di potenza e dei controlli, oggi giorno la transizione dalle macchine DC a quelle AC è da ritenersi completata anche nel campo della trazione veicolistica. Le soluzioni disponibili assicurano una regolazione precisa di coppia e velocità in tutto il campo di utilizzo.

Le macchine AC ad induzione e sincrone a magneti permanenti superficiali sono oramai soluzioni consolidate. Come già visto nei paragrafi precedenti:

- le macchine asincrone assicurano una consistente regione di deflusso e una buona efficienza a velocità elevate e carichi parziali. Inoltre sono caratterizzate da elevata robustezza con costi delle parti attive (ferro e rame) relativamente bassi;

- le macchine sincrone a magneti affacciati sono preferite in presenza di forti vincoli dimensionali per l'elevata coppia specifica. Ulteriore punto di forza è l'elevato rendimento a pieno carico (soprattutto a bassa velocità). Di converso tra i punti deboli permane il costo ancora elevato dei magneti e la difficoltà di assicurare in modo affidabile un ampio campo di deflussaggio.



Fig. 6.14 - Esempi di macchine sincrone a MP e ad induzione per applicazioni ibride parallele single shaft

Partendo da questo quadro, per conciliare obiettivi contrastanti come l'elevata efficienza anche a carico parzializzato e l'ampiezza del campo di deflussaggio da una parte e l'elevata coppia specifica dall'altra, la tecnologia sta evolvendo per combinare i contributi di coppia isotropa, realizzata attraverso il principio di induzione elettromagnetica, e di coppia anisotropa di riluttanza, realizzata per mezzo del principio di minimizzazione della coenergia.

Le soluzioni risultanti, di tipo sincrono a magnete arretrato a rotore magneticamente anisotropo anche dette "miste" (vedi ad esempio Fig. 6.15), possono essere viste come un compromesso tra macchine sincrone a magneti affacciati e a riluttanza sincrona.

L'entità e la posizione dei magneti annegati nel rotore variano in base all'applicazione ed alle sue esigenze prestazionali (Fig. 6.16).

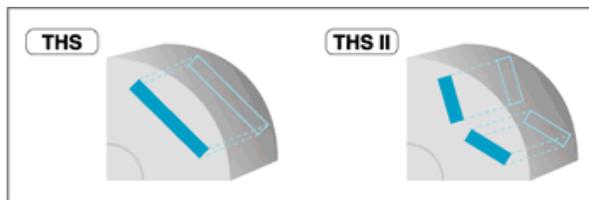
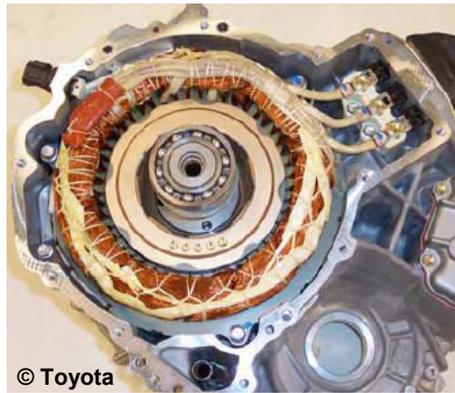


Fig. 6.15 - Esempio di macchina sincrona a magneti arretrati per ibrido split e posizionamento dei magneti nel rotore nelle soluzioni di prima (THS) e seconda (THS II) generazione

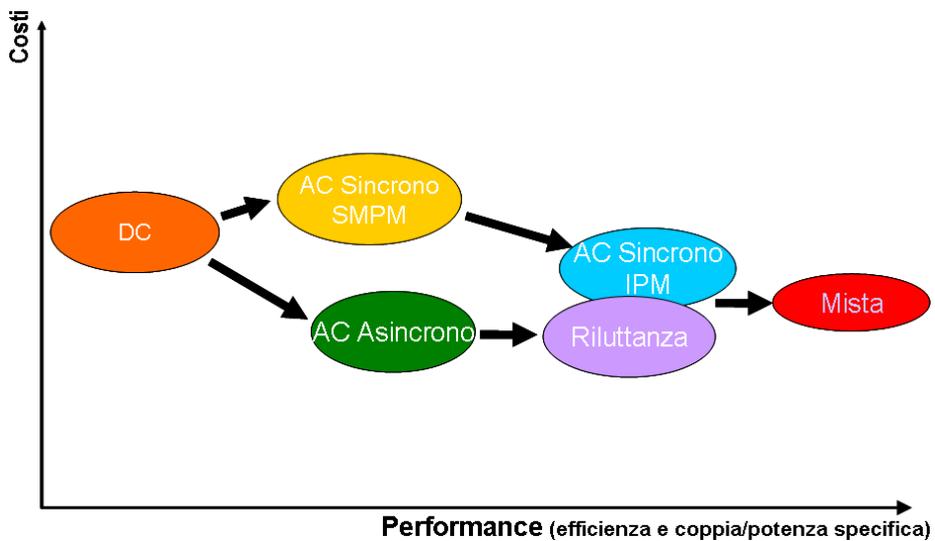


Fig. 6.16 - Road-map evolutiva delle macchine elettriche per trazione elettrica ed ibrida

6.5.3 Costruibilità in elevati volumi

La crescente diffusione dei veicoli ibridi, arrivati alle centinaia di migliaia di unità/anno, e la conseguente prospettiva di produzione di massa, sta spingendo i costruttori di macchine elettriche ad identificare approcci produttivi innovativi capaci di preservare pienamente le elevate prestazioni tipiche dei componenti per bassi volumi (con limitata automatizzazione del processo realizzativo).

Ad esempio sono state identificate e si iniziano ad applicare nuove tecniche, sia per avvolgimenti distribuiti che concentrati, per automatizzare il processo di realizzazione dello statore:

- avvolgimenti distribuiti: sostituzione dei classici processi semiautomatici per avvolgimenti embricati e concentrici, con soluzioni ad onda ad uno o due strati a barre saldate⁹, capaci di assicurare elevatissimi coefficienti di riempimento, notevoli riduzioni di lunghezza delle testate, minori induttanze disperse, migliore raffreddabilità ed anche un processo realizzativo di elevata qualità e ripetibilità;
- avvolgimenti concentrati: i processi già esistenti sono stati ulteriormente migliorati combinando la preformatura delle bobine a quella plug-in dei denti che vengono meccanicamente collegati al giogo dopo l'inserzione della bobina dell'avvolgimento [10].



Fig. 6.17 - Esempio di plug-in-tooth

Il grande spreco di ferro durante la tranciatura dei lamierini può essere drasticamente ridotta passando a processi di roll forming già in uso negli alternatori automobilistici a 14 V.

⁹ Questa tecnica (*segment bars winding*) è già applicata in volumi automobilistici sui nuovi alternatori Denso a 14 V per veicoli a propulsione convenzionale.

Parimenti le nuove tecniche di potting delle testate degli avvolgimenti permettono al contempo una migliore dissipazione termica, isolamento elettrico e tenuta meccanica.

6.6 Introduzione ai convertitori

Il prospetto di Fig. 6.18 fornisce un possibile inquadramento generale delle macchine elettriche precedentemente trattate, considerando questa volta come distinzione di partenza il sistema di commutazione.

Nel prospetto sono rappresentate indicativamente le appropriate forme d'onda della corrente di alimentazione, o della sua prima armonica, utilizzate per il funzionamento delle macchine a commutazione esterna.

Queste forme d'onda vengono generate dal convertitore elettronico (DC/AC o DC/DC, a seconda della tipologia della macchina) connesso con la sorgente di potenza in corrente continua (non necessariamente a potenza prevalente, ossia con tensione non costante al variare della corrente erogata o assorbita).

Il convertitore elettronico attua la doppia funzione di generazione della forma d'onda e della regolazione dei relativi parametri di alimentazione, secondo i comandi impressi dal sistema di gestione.

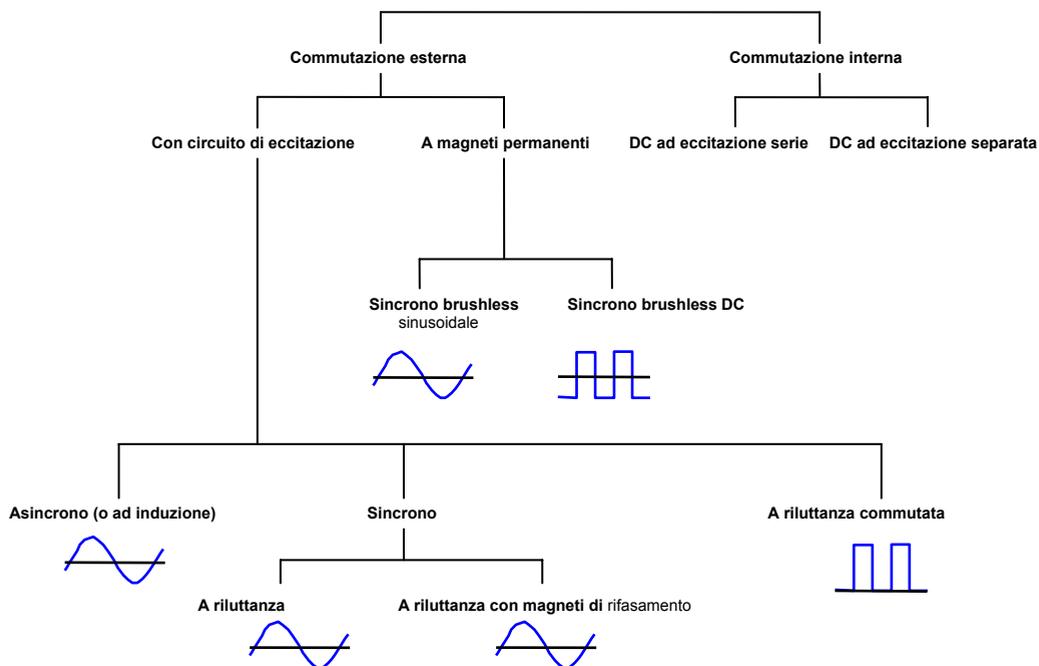


Fig. 6.18 - Tipologia delle macchine elettriche in base alla commutazione

Oltre che per il controllo delle macchine elettriche, i convertitori sono i componenti essenziali per la gestione dei flussi di potenza tra le sorgenti ed il carico nella propulsione ibrida. Il capitolo che segue è quindi interamente dedicato al tema della conversione elettronica di potenza, nelle sue diverse applicazioni ai sistemi di propulsione.

Bibliografia

- [1] Chan C.C.: The state of the art of electric and hybrid vehicles. IEEE Vol. 90, Nr. 2, Febbraio 2002
- [2] Brusaglino G.; Profumo F.; Ravello V.; Tenconi A.: Overview of recent developments of EVs and HEVs in Europe. IPEC'2000, Tokyo, Aprile 2000
- [3] Ravello V.: Alternative propulsion systems: advances in progress. IIR Conference FC Propulsion Systems: Innovations on the way to serial production, Dusseldorf, Aprile 2004
- [4] Tamburro A.; Schenk R.; Glauning J.; Mesiti D.; Pesch M.; Ravello V.: An integrated motor-generator development for an effective drivetrain re-engineering. Global Powertrain Congress, Stuttgart, Ottobre 1999
- [5] Del Gobbo A.; Ravello V.: Mild hybrids as a technology to improve fuel efficiency: electrical machines and architectures. 5th International Conference: High-Tech Engines and Cars, Modena, Giugno 1999
- [6] Yaegashi et al.: Toyota Hybrid System: its concept and technologies. FISITA, 1998
- [7] Brusaglino G.; Ravello V.; Tenconi A.: Azionamenti e convertitori per la gestione ottimizzata dell'energia di bordo nei veicoli elettrici stradali. Seminario Interattivo: Azionamenti Elettrici, Bressanone, Marzo 1997
- [8] Brusaglino G.; Howe D.; Ravello V.; Schofield N.: Advanced drives for electrically propelled vehicles. ISATA 2000, Dublin, Settembre 2000
- [9] Ravello V.; Rovera G.: Scenario and trends on hybrid propulsion technologies. ATA International Conference: Spark Ignition Engine: The CO₂ Challenge, Venezia, Novembre 2002
- [10] Bady R.; Renner C.; Rùthlein A.: Concept and realisation of the INMOVE parallel hybrid vehicle. EVS-17, Montreal, 2000
- [11] Ravello V.: Azionamenti elettrici di trazione: stato dell'arte e prospettive evolutive. Rivista ATA, Gennaio 2005
- [12] Sasaki S.; Satoh E.; Okamura M.: The motor control technologies for the hybrid electric vehicle. PCIM Conference, Nurnberg, Aprile 2004.

CAPITOLO 7

LA CONVERSIONE ELETTRONICA DI POTENZA NEI SISTEMI ELETTRICI DI PROPULSIONE

Fabio Crescimbin, Luca Solero

Università degli Studi Roma Tre – Power Electronics and Drives Laboratory

7.1 Generalità sulla conversione elettronica di potenza

I convertitori elettronici di potenza sono apparecchiature basate sull'impiego di dispositivi a semiconduttore (diodi, thyristor, GTO, BJT, MOSFET, IGBT ecc.) le quali, a partire da una sorgente elettrica avente caratteristiche prefissate e non regolabili, consentono di attuare una conversione controllata della potenza elettrica avente lo scopo di modificare opportunamente, generalmente sulla base di una determinata strategia di regolazione, i valori di una o più delle grandezze (i.e. frequenza, tensione, corrente) con le quali tale potenza è resa disponibile ai morsetti del carico, ad esempio i terminali di un motore elettrico.

Fatti salvi i diodi di potenza, che per loro costituzione hanno un funzionamento esclusivamente determinato dalla polarità della tensione ad essi applicata da un circuito esterno, tutti gli altri dispositivi a semiconduttore impiegati nei convertitori elettronici di potenza sono utilizzati a guisa di interruttori statici: l'inizio della conduzione di corrente (detta accensione) è comandata mediante un idoneo segnale di tensione o di corrente applicato ad uno dei terminali del dispositivo detto "gate", mentre l'interruzione della corrente nel dispositivo (detta spegnimento) può essere lasciata alla naturale azione del circuito esterno (è questo il caso solo dei thyristor), oppure può essere determinata dall'applicazione di un nuovo segnale di gate avente, in genere, polarità opposta a quella del segnale di accensione.

Una classificazione di uso comune per i convertitori elettronici di potenza si basa sulla natura della potenza elettrica, in corrente continua (DC) o in corrente alternata (AC), utilizzata dai circuiti d'ingresso e/o di uscita del convertitore, per cui si distinguono convertitori AC/DC, detti anche raddrizzatori, convertitori DC/AC, detti anche invertitori o più comunemente, dall'inglese, "inverter", convertitori DC/DC, spesso indicati come "chopper", e convertitori AC/AC.

Questa ultima configurazione di convertitore è in genere ottenuta dal collegamento in cascata di un raddrizzatore con un inverter (la disposizione che ne risulta è detta convertitore AC/AC con circuito intermedio in corrente continua), sebbene essa possa essere realizzata anche direttamente con apparecchiature, di norma aventi configurazione trifase, denominate rispettivamente

“cicloconvertitore” – di uso limitato solo ad applicazioni nel campo di potenza dei MW – e “convertitore a matrice”, tuttora scarsamente impiegato a causa dell’elevata complessità circuitale e del maggior costo rispetto alla soluzione con circuito intermedio in corrente continua.

Una diversa classificazione dei convertitori elettronici di potenza distingue tra i convertitori a commutazione naturale ed i convertitori a commutazione forzata. I convertitori a commutazione naturale, che sono quelli realizzati con diodi o con thyristor, non hanno oramai alcun interesse applicativo nel campo dei sistemi elettrici di propulsione. Tra i convertitori a commutazione forzata, detti anche convertitori “switching”, sono comprese tutte quelle strutture di conversione attualmente utilizzate per l’alimentazione di motori in corrente continua o di motori trifase in corrente alternata; essi trovano pertanto largo impiego in tutti gli azionamenti elettrici di trazione cui è richiesto di attuare una regolazione di coppia con elevate prestazioni dinamiche e/o un controllo di velocità entro un esteso campo di regolazione.

I convertitori a commutazione forzata sono basati sull’impiego di interruttori statici, o “switch”, di potenza le cui commutazioni di accensione e di spegnimento sono comandate applicando, per mezzo di un circuito di pilotaggio, un idoneo segnale di tensione o di corrente al gate del dispositivo stesso. È questo il caso dei MOSFET di potenza, che trovano applicazione nel campo degli azionamenti alimentati in bassa tensione e aventi potenza non superiore a poche decine di kW, degli IGBT, oramai largamente impiegati in tutti gli azionamenti con motori in corrente alternata fino a potenze dell’ordine di diverse centinaia di kW, e dei GTO, questi ultimi utilizzati nei convertitori aventi potenze superiori al MW, tipici della trazione ferroviaria, ma oggi soppiantati, anche in questo settore, dall’evoluzione tecnologica degli IGBT.

7.1.1 Richiami sugli interruttori statici a semiconduttore

I principali interruttori statici a semiconduttore oggi utilizzati nei convertitori elettronici di potenza sono dispositivi resisi commercialmente disponibili a partire dagli anni 70 e concettualmente tutti appartenenti alla famiglia dei transistor di potenza. Rispetto ai transistor utilizzati nell’elettronica analogica o nell’elettronica digitale, i transistor di potenza si differenziano sostanzialmente per una configurazione costruttiva che li rende adatti all’impiego on/off tipico degli interruttori, operando con valori elevati sia di tensione (nello stato di interdizione) che di corrente (nello stato di conduzione). Questi dispositivi possono essere del tipo a giunzione, ed in questo caso sono indicati nella pratica come BJT di potenza, oppure del tipo ad effetto di campo, tra i quali, di larghissimo impiego nelle applicazioni, sono i MOSFET di potenza e, dalla seconda metà degli anni Ottanta, gli IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

Poiché nelle applicazioni dei convertitori elettronici di potenza sono di normale uso valori di corrente nel campo da qualche A fino ad alcune migliaia di A, i

transistor di potenza non sono di regola utilizzati nella zona attiva della loro caratteristica di collettore, in quanto l'elevata dissipazione di potenza termica associata a tale funzionamento comporterebbe, all'interno del dispositivo, un aumento della temperatura non tollerabile dalla piastrina di materiale semiconduttore (detta chip); pertanto i transistor di potenza sono generalmente impiegati solo come elementi di commutazione, essendo utilizzati per la conduzione (detta stato di on) nella regione della caratteristica di uscita ove, per valori normali della corrente di collettore, la tensione tra collettore e emettitore è limitata a pochi V, oppure funzionando in condizione di interdizione (stato di off), dove, con corrente di collettore nulla, il transistor è chiamato a sopportare tra il collettore e l'emettitore una tensione di polarizzazione diretta che, dipendendo dal tipo di transistor di potenza, può raggiungere valori massimi nel campo da qualche decina fino a alcune migliaia di V. Sia la commutazione dallo stato di off a quello di on (detta accensione), sia la commutazione inversa (detta spegnimento), non avvengono istantaneamente, per cui sono importanti parametri caratteristici il tempo di accensione e il tempo di spegnimento. Questi tempi di commutazione, pur essendo intrinsecamente legati al tipo di transistor (ad esempio, i transistor a effetto di campo di regola hanno tempi di commutazione più bassi di quelli del tipo a giunzione), dipendono in una certa misura dai valori massimi della corrente e della tensione per i quali il dispositivo è stato costruito, essendo inoltre significativamente influenzati sia dalle caratteristiche del circuito di carico, sia dalle modalità di funzionamento del circuito di pilotaggio: in conseguenza di ciò, i tempi di accensione e di spegnimento sono normalmente specificati dal costruttore facendo riferimento a modalità di prova che emulano specifiche condizioni d'impiego del dispositivo.

Il funzionamento di un interruttore statico, con periodiche commutazioni dallo stato di off a quello di on e viceversa, è caratterizzato da una frequenza di commutazione (detta anche frequenza di "switching"), definita come l'inverso del periodo di tempo intercorrente tra due successive commutazioni di accensione del dispositivo. A causa di tale funzionamento, nei dispositivi ha luogo una significativa dissipazione di potenza, detta potenza perduta in commutazione, che si aggiunge a quella prodotta dal passaggio di corrente nel dispositivo durante il funzionamento in conduzione (detta potenza perduta in conduzione).

La potenza perduta in commutazione, oltre a dipendere dai valori massimi di tensione e di corrente che sollecitano il dispositivo durante il transitorio di accensione o di spegnimento, è, in prima approssimazione, proporzionale ai tempi di accensione e di spegnimento, crescendo inoltre linearmente con la frequenza di commutazione. Sebbene in termini generali si possa affermare che la frequenza di commutazione di un interruttore statico può essere tanto più elevata quanto più sono bassi i tempi di accensione e spegnimento del dispositivo, nella pratica, tuttavia, ciò non è completamente vero.

La scelta della frequenza di commutazione è infatti fortemente condizionata anche dalla necessità di mantenere entro un limite prefissato il valore massimo della temperatura raggiunta dal chip durante il funzionamento e pertanto deve essere effettuata tenendo conto sia della disposizione costruttiva dell'interruttore statico, sia del sistema utilizzato per il raffreddamento del dispositivo, caratteristiche, queste ultime, che sono entrambe strettamente correlate al campo di potenza per il quale il dispositivo è impiegato.

Nei dispositivi di bassa potenza (cioè costruiti per correnti di alcuni A e tensioni fino a qualche centinaio di V) il chip è generalmente inglobato in un contenitore (detto "case") di materiale plastico dal quale fuoriescono i tre terminali; per potenze di poco più elevate sono invece spesso utilizzati dispositivi con "case" metallico, il quale favorisce il raffreddamento del chip.

Infine, nel campo di potenza da alcuni kVA a qualche centinaia di kVA la forma costruttiva oggi più diffusa è quella propria dei moduli di potenza in cui uno o più interruttori statici (tra essi opportunamente collegati e aventi ciascuno un diodo posto in antiparallelo tra il collettore e l'emettitore) sono assemblati in un "case" ermetico di resina epossidica il cui fondo, costituito da una piastra di rame, è normalmente posto a contatto di un dissipatore di calore (detto "heat sink") che, opportunamente raffreddato con aria naturale o forzata, oppure con liquido per le potenze termiche più elevate, consente lo smaltimento verso l'ambiente esterno del calore prodotto all'interno del dispositivo. Importanti parametri legati alla disposizione costruttiva di un interruttore statico di potenza sono pertanto sia la resistenza termica tra il chip e il contenitore (generalmente indicata come "junction-to-case thermal resistance"), sia la resistenza termica di contatto tra il contenitore e il dissipatore di calore (detta "case-to-sink thermal resistance"), le quali devono essere le più piccole possibili allo scopo di minimizzare - per valori fissati sia della potenza termica da smaltire, sia del salto di temperatura tra il chip e l'ambiente esterno - le dimensioni ed il costo del sistema impiegato per il raffreddamento del dispositivo.

Tenuto conto delle diverse disposizioni costruttive e di raffreddamento, e prescindendo dal caso particolare dei MOSFET di bassa potenza i quali possono essere utilizzati anche con frequenze di commutazione dell'ordine delle centinaia di kHz, gli interruttori statici di potenza sono di norma utilizzati con frequenze di commutazione nel campo tra alcuni kHz e alcune decine di kHz.

In talune applicazioni, tuttavia, soprattutto per potenze inferiori a poche decine di kVA, un significativo aumento della frequenza di commutazione può essere ottenuto impiegando tecniche dette di "soft switching", le quali consentono di minimizzare la potenza perduta in commutazione attraverso una drastica riduzione dei valori massimi di tensione e/o di corrente che sollecitano il dispositivo durante i transitori di accensione e di spegnimento; per contro, le tecniche di soft switching generalmente comportano un aumento della sollecitazione in tensione nello stato di interdizione e/o in corrente nello stato di conduzione, per cui l'adozione di tali tecniche spesso costringe ad un sostan-

ziale sovradimensionamento del dispositivo, tenuto conto dei requisiti altrimenti posti solo dal tipo di applicazione.

Tra i primi interruttori a semiconduttore resisi disponibili per la realizzazione dei convertitori statici a commutazione forzata vi sono i transistor bipolari di potenza (BJT) le cui commutazioni di accensione e di spegnimento sono comandate alimentando la base con una corrente di opportuno valore.

I tempi di commutazione sono in genere compresi tra molte centinaia di ns e alcune decine di μ s, variando grandemente in base al livello di potenza per il quale il dispositivo è costruito. Lo spegnimento di un BJT è attuato mediante una corrente di base negativa la quale può essere rimossa non appena il dispositivo ha raggiunto lo stato di off. Il funzionamento nello stato di on è invece soggetto al mantenimento, lungo tutto l'intervallo di tempo in cui si ha la conduzione, di una corrente di base di valore positivo: ciò costituisce un importante svantaggio di questi dispositivi, in quanto, tenuto conto che correnti di base dell'ordine di qualche A sono di normale impiego, il consumo di potenza del circuito di pilotaggio risulta essere, in genere, non trascurabile.

Nonostante questo svantaggio, i BJT hanno trovato, soprattutto nel periodo tra gli anni Settanta e la fine degli anni Ottanta, larga applicazione nei convertitori elettronici di potenza essendo vantaggiosi per alcune caratteristiche quali il valore relativamente elevato della tensione sopportabile nello stato di off (tipicamente dell'ordine di un migliaio di V), nonché per la ridottissima caduta di tensione tra collettore e emettitore nello stato di on (generalmente non superiore a 2V) che si traduce, anche con correnti di collettore fino a molte centinaia di A, in valori relativamente piccoli della potenza perduta in conduzione.

Per contro nei BJT assume particolare rilevanza il fenomeno detto *breakdown* secondario, la cui natura è strettamente correlata al fatto che nei dispositivi a semiconduttore basati sulla conduzione di portatori di carica minoritari la resistività è decrescente con l'aumentare della temperatura. C'è quindi una naturale tendenza del fenomeno ad amplificarsi attraverso un meccanismo spesso indicato come "fuga termica" la quale, se non è opportunamente contrastata mediante azioni esterne, si traduce rapidamente nella distruzione della piastrina di silicio per effetto dell'incontrollato aumento della temperatura.

La necessità di adottare soluzioni costruttive dei convertitori che consentissero di prevenire il pericolo di fuga termica dei dispositivi, unita allo svantaggio di una significativa potenza richiesta dai circuiti di pilotaggio, hanno portato ad abbandonare rapidamente l'impiego dei BJT nei convertitori statici non appena altri interruttori statici a semiconduttore, quali i MOSFET e gli IGBT, si sono resi disponibili per le applicazioni di potenza.

Per i convertitori utilizzati nel campo da poche centinaia di VA fino a qualche decina di kVA sono largamente impiegati MOSFET di potenza, i cui principali vantaggi, rispetto ai BJT, sono il bassissimo consumo di potenza del circuito pilotaggio (derivante dalla possibilità di controllare le commutazioni di accen-

sione e di spegnimento mediante un semplice segnale di tensione applicato tra gate e source), nonché i ridottissimi tempi di commutazione generalmente compresi tra qualche decina e alcune centinaia di ns.

La parte attiva di un MOSFET di potenza è realizzata integrando su un'unica piastrina di silicio un numero elevato di celle elementari (tipicamente alcune migliaia) le quali, nei riguardi della conduzione della corrente di drain, risultano essere tra loro connesse in parallelo. La struttura di ciascuna delle celle è quella propria dei MOSFET a riempimento (generalmente del tipo a canale n) ed è spesso indicata con la sigla VDMOS (dall'inglese Vertical Diffused MOS) per ricordare la sequenza di fabbricazione che prevede la realizzazione per diffusione di singoli strati sovrapposti partendo da un substrato di tipo n^+ costituente il drain del dispositivo.

Come per tutti i transistor di potenza, anche la struttura del MOSFET è caratterizzata dalla presenza di una regione di drift, n^- , il cui spessore, analogamente a quanto accade per i BJT, è stabilito sulla base di un compromesso tra l'esigenza di ottenere un elevato valore della tensione di breakdown BV_{DS} e la necessità di ridurre il più possibile la resistenza ohmica $r_{DS(on)}$ con lo scopo di minimizzare la potenza perduta in conduzione.

Per i MOSFET, tuttavia, la scelta di compromesso di cui sopra è fortemente condizionata dal fatto che $r_{DS(on)}$ è proporzionale a $(BV_{DS})^\alpha$, con α generalmente compreso tra 2,5 e 2,7: ne consegue che dispositivi aventi correnti di drain oltre il centinaio di A possono essere realizzati solo accettando un valore della tensione di breakdown non superiore a poche centinaia di V, essendo questo il limite entro il quale i valori della tensione drain-source in stato di on, e quindi della potenza perduta in conduzione, risultano essere confrontabili con quelli di un BJT avente uguale corrente di dimensionamento; al contrario, tenuto conto che la temperatura massima del chip deve comunque essere mantenuta entro un valore limite prefissato, MOSFET con valori elevati di BV_{DS} (tipicamente dell'ordine di 400÷600V) possono essere costruiti solo per correnti di drain dell'ordine delle decine di A.

La caratteristica di drain di un MOSFET di potenza è del tutto identica a quella dei dispositivi utilizzati nell'elettronica di segnale; fintanto che la tensione di uscita del circuito di pilotaggio, cioè la tensione applicata tra gate e source, è minore di un valore di soglia $V_{GS(th)}$ (generalmente dell'ordine di pochi V), il MOSFET si trova nello stato di off e può sopportare tensioni di polarizzazione diretta tra drain e source inferiori alla tensione di breakdown della giunzione formata dagli strati p e n^- .

Lo stato di on con funzionamento nella zona a resistenza costante della caratteristica di drain è ottenuto applicando tra gate e source una tensione maggiore di $V_{GS(th)}$ (ma comunque, in genere, non superiore a un valore massimo di 20÷30V per limitare il campo elettrico che sollecita il sottilissimo strato di SiO_2 sottostante l'elettrodo di gate).

I transistori di accensione e di spegnimento sono governati rispettivamente dalla carica e dalla scarica delle capacità parassite che in un MOSFET sono presenti tra gate e source e tra gate e drain, essendo questa ultima capacità variabile tra un valore massimo e un valore minimo durante i transistori di commutazione: per limitare la corrente di carica e di scarica di tali capacità, senza tuttavia rallentare eccessivamente i transistori di accensione e di spegnimento del dispositivo, nel circuito di pilotaggio dei MOSFET di potenza è di regola utilizzata una resistenza di valore opportuno (tipicamente dell'ordine di qualche Ω) posta in serie al terminale di gate. A differenza dei BJT, i MOSFET di potenza non sono affetti dal breakdown secondario e quindi i fattori che concorrono a definire il dimensionamento del dispositivo sono solo la massima corrente di drain, la tensione di breakdown e la massima dissipazione di potenza corrispondente a un valore prefissato della temperatura del chip.

Da quanto sopra si evince che i BJT e i MOSFET di potenza hanno tra loro caratteristiche complementari: infatti, mentre i MOSFET hanno tempi di commutazione di gran lunga minori di quelli dei BJT, questi ultimi, per contro, risultano essere più vantaggiosi per le minori perdite di conduzione e per la più elevata tensione di breakdown. Il tentativo di compendiare in un unico dispositivo di potenza a semiconduttore i pregi del transistor bipolare e quelli del MOSFET ha portato negli anni Ottanta allo sviluppo degli IGBT, il cui impiego si è oramai esteso alla quasi totalità dei convertitori elettronici di potenza utilizzati, con frequenze di commutazione non superiori a poche decine di kHz, nel campo di potenza da qualche kVA a diverse centinaia di kVA.

La struttura del chip di un IGBT è del tutto simile a quella di un MOSFET di potenza fatta eccezione per l'aggiunta di uno strato p^+ (costituente il drain del dispositivo) la cui funzione è quella di iniettare portatori di carica minoritari nella regione di drift n^- di una struttura VDMOS del tutto analoga, a parte un minore livello di drogaggio della zona p , a quella dei MOSFET a riempimento. Da tale disposizione costruttiva ne consegue che negli IGBT si ottiene una sostanziale riduzione, rispetto ai MOSFET di potenza, della resistenza in stato di on, e quindi della potenza perduta in conduzione, la quale, soprattutto per dispositivi con tensione di breakdown superiore ad alcune centinaia di V, risulta essere comparabile con quella dei BJT.

A fronte di tale beneficio, tuttavia, gli IGBT hanno un tempo di spegnimento che, confrontato con quello di un MOSFET di potenza, è di norma più elevato, essendo tipicamente dell'ordine delle centinaia di ns; questo svantaggio è legato al fatto che durante il transitorio di spegnimento i portatori di carica minoritari presenti nella regione di drift possono essere rimossi solo per ricombinazione, per cui l'eccesso di cariche elettriche dovuto all'azione dello strato p^+ comporta inevitabilmente un più lento decadimento della corrente di drain.

Tale problema è solo in parte mitigato dalla presenza di una zona n^+ (detta strato di buffer) compresa tra il drain p^+ e la regione di drift n^- , la quale, peraltro, svolge un ruolo secondario nel meccanismo di funzionamento del IGBT; per questo motivo, e con l'obiettivo di migliorare talune caratteristiche del dispositivo, alcuni costruttori preferiscono eliminare lo strato di buffer, così realizzando IGBT caratterizzati dalla sigla NPT (dall'inglese Non-Punch-Through) allo scopo di differenziarli da quelli aventi la struttura precedentemente descritta, i quali sono anche detti IGBT di tipo PT (dall'inglese Punch-Through).

A differenza dei MOSFET e dei BJT, gli IGBT hanno la capacità di sopportare tensioni di polarizzazione inversa fino al valore V_{RM} che corrisponde alla tensione di breakdown della giunzione pn formata dal drain e dalla regione di drift; negli IGBT di tipo PT la presenza dello strato di buffer avente un elevato drogaggio porta ad ottenere valori della V_{RM} che, essendo dell'ordine delle poche decine di V, sono di molto più piccoli di quelli della tensione di breakdown di polarizzazione diretta BV_{DSS} (tipicamente compresi tra alcune centinaia e poche migliaia di V); negli IGBT di tipo NPT, invece, il valore della V_{RM} risulta in genere confrontabile con quello della BV_{DSS} e tale caratteristica può essere utilmente sfruttata per l'impiego degli IGBT in alcune tipologie di convertitore elettronico di potenza ove il normale funzionamento richiede l'applicazione di tensioni alternate tra i terminali di drain e di source del dispositivo.

Per quanto riguarda molti degli aspetti inerenti l'impiego di un IGBT come interruttore a semiconduttore valgono le considerazioni già indicate per i MOSFET di potenza. Essendo gli IGBT soprattutto utilizzati nel campo delle medie ed elevate potenze, la loro disposizione costruttiva è in genere quella propria dei moduli di potenza; IGBT per correnti di drain fino ad alcune migliaia di A e per tensioni comprese tra 250V e 1700V sono già da tempo largamente diffusi nelle applicazioni di trazione ed i rapidissimi progressi della tecnologia hanno portato a realizzare, negli ultimi anni, IGBT con correnti dell'ordine di diverse migliaia di A e con tensioni dell'ordine di alcuni kV, che hanno rapidamente soppiantato i GTO negli azionamenti di elevata potenza. Gli IGBT sono facilmente utilizzati anche in applicazioni in cui è richiesto il collegamento di più dispositivi tra loro in parallelo (tale semplicità deriva sia dalla possibilità di costruire facilmente dispositivi tra loro gemelli, sia dalla trascurabile variazione della resistività della regione di drift con la temperatura di funzionamento) e tale tecnica è attualmente impiegata per realizzare moduli di IGBT destinati all'impiego negli azionamenti ferroviari dei treni ad alta velocità.

Se da un lato la tecnologia costruttiva degli IGBT ha permesso un significativo aumento della potenza di dimensionamento dei convertitori elettronici di potenza, dall'altra parte gli enormi sviluppi della microelettronica, cui si è assistito negli ultimi due decenni, hanno portato alla realizzazione di moduli di potenza in cui in un unico "case" sono integrati un certo numero di IGBT (tipicamente due o sette), ciascuno con il proprio circuito di pilotaggio e con circuiti

di protezione dalle sovracorrenti e/o dalle sovratemperature: dispositivi di potenza di questo tipo sono oggi disponibili per correnti fino ad alcune centinaia di A e per tensioni fino a 1700V, ed essi in qualche modo costituiscono un significativo esempio dello sviluppo tecnologico dei prossimi anni che mira alla realizzazione di circuiti integrati di potenza di struttura sempre più complessa.

7.1.2 La conversione elettronica di potenza nei sistemi elettrici di propulsione

Un sistema elettrico di propulsione è di norma costituito da vari sottosistemi che, attraverso la loro interazione funzionale, concorrono a determinare le modalità operative con le quali la potenza meccanica necessaria al moto del veicolo è resa disponibile in modo totalmente controllato ed idoneo ad ottenere le prestazioni desiderate in termini di valori istantanei della accelerazione e della velocità. In termini di modalità operative, e con un approccio del tutto generale che prescinde dall'effettiva architettura utilizzata per realizzare il sistema di propulsione, i principali sottosistemi di un propulsore elettrico comprendono una unità di generazione, destinata a produrre potenza elettrica a partire da una sorgente energetica primaria immagazzinata a bordo, un sistema di accumulo dell'energia, destinato a compensare gli scarti istantanei di potenza elettrica che si determinano tra la richiesta del sistema di trazione e la disponibilità offerta dal sistema di generazione a bordo, ed il sistema di trazione vero e proprio (costituito da uno o più azionamenti elettrici), che rende disponibile potenza meccanica all'elemento funzionale responsabile dell'effettivo moto del veicolo.

Lo scambio di potenza elettrica tra i vari sottosistemi deve essere attuata secondo un idoneo algoritmo di regolazione e controllo dei flussi di potenza che consenta di ottenere nelle varie condizioni di marcia sia le desiderate prestazioni del veicolo, sia la più efficiente utilizzazione della risorsa energetica primaria disponibile a bordo. L'interconnessione tra i diversi sottosistemi presenti in un propulsore elettrico è sempre realizzato attraverso convertitori elettronici di potenza che pertanto svolgono un ruolo fondamentale sia in termini di adattamento tra le grandezze elettriche di ingresso e/o di uscita scelte in sede di dimensionamento per ottenere il funzionamento ottimo dei diversi sottosistemi, sia con riferimento alla regolazione dei flussi di potenza scambiati tra gli stessi sottosistemi in relazione alle variabili condizioni di marcia del veicolo.

A mero titolo di esempio, nella Fig. 7.1 è mostrata l'architettura di un sistema elettrico di propulsione nel quale sono immediatamente riconoscibili i sottosistemi sopra evidenziati. Il sistema di trazione è costituito da quattro azionamenti gemelli, ciascuno realizzato con motore a magneti permanenti integrato nel cerchio della ruota e alimentato da un convertitore DC/AC a

partire da un DC bus comune a tutti gli azionamenti. Il convertitore DC/AC provvede a regolare opportunamente le grandezze elettriche di alimentazione del motore (i.e. corrente e frequenza di alimentazione nel caso specifico) allo scopo di ottenere le condizioni operative desiderate in termini di valori istantanei della coppia e della velocità all'asse della ruota. Poiché è opportuno sfruttare la possibilità di attuare la frenatura rigenerativa, il convertitore DC/AC deve consentire l'inversione del flusso di potenza e con la configurazione circuitale oggi universalmente utilizzata ciò, come si vedrà più avanti, può essere ottenuto semplicemente agendo sulle grandezze di regolazione dello stesso convertitore che passa, senza soluzione di continuità, dalle condizioni di funzionamento da inverter a quelle di raddrizzatore switching.

Nel propulsore elettrico mostrato in Fig. 7.1, l'accumulo – realizzato combinando tra loro una batteria di accumulatori elettrochimici (BU) ed un banco di supercondensatori (UC) – e l'unità di generazione (GU) sono chiamati a far fronte alla richiesta di potenza imposta dalle condizioni operative del sistema di trazione (vedi anche il prototipo Host in Fig. 17.10, pag. 457).

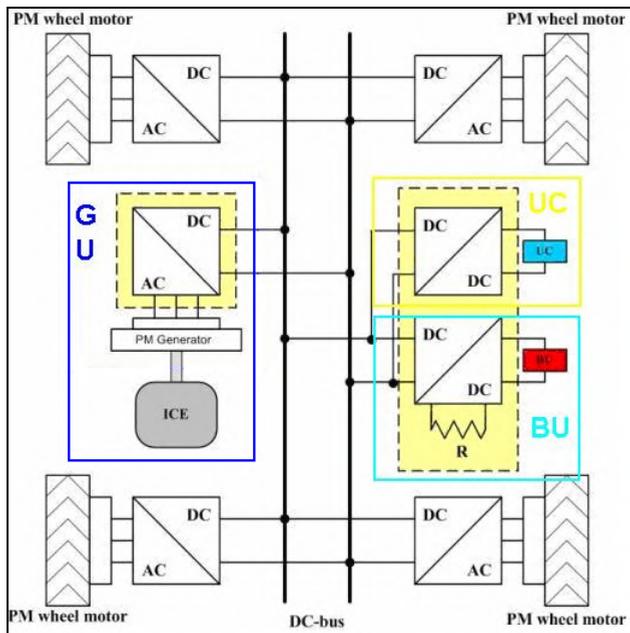


Fig. 7.1 - Architettura di un sistema elettrico di propulsione costituito da una unità di generazione (GU), un sistema di accumulo combinato comprendente accumulatori elettrochimici (BU) e supercondensatori (UC), un sistema di trazione comprendente azionamenti elettrici gemelli (uno per ciascuna ruota del veicolo) con motore di trazione integrato nel cerchio della ruota (i.e. motoruote)

Anche per l'interfacciamento di tali due sottosistemi al DC bus del propulsore è necessario l'impiego di convertitori che provvedono ad attuare la conversione controllata della potenza in relazione all'algoritmo di regolazione predisposto per il miglior sfruttamento delle risorse energetiche disponibili a bordo. Poiché i sistemi di accumulo oggi più utilizzati sono di tipo elettrochimico, per tali sistemi la conversione di potenza è attuata con convertitori DC/DC bidirezionali che consentono cicli di carica/scarica dell'accumulo in relazione alle condizioni operative del propulsore; meno frequenti sono invece i casi di sistemi di accumulo utilizzando dispositivi elettromeccanici (e.g. un volano azionato a velocità variabile da una macchina elettrica) per i quali sono invece utilizzati convertitori DC/AC bidirezionali del tutto identici, fatta salva la taglia di dimensionamento, a quelli utilizzati negli azionamenti di trazione. Per l'unità di generazione la tipologia di convertitore di potenza è dettata dalla sorgente elettrica primaria utilizzata.

Nel caso, oggi più frequente, di generatore azionato da un motore a combustione interna è d'uso impiegare un convertitore AC/DC che, non avendo necessità di una bidirezionalità del flusso di potenza, può anche essere realizzato con un ponte trifase di diodi, sebbene l'impiego di raddrizzatori switching, come nel caso del propulsore di Fig. 7.1, si va sempre più affermando, in quanto consente il controllo vettoriale della corrente del generatore, ottenendo correnti di forma d'onda quasi sinusoidale, piuttosto che correnti ad onda quadra, tipiche di un raddrizzatore a diodi. Nel caso, invece, di una sorgente primaria costituita da uno stack di celle a combustibile, il convertitore utilizzato può essere di tipo DC/DC unidirezionale e, in genere, di tipo "Boost", essendo necessario ottenere all'uscita del convertitore un valore di tensione più elevato di quello idoneo al funzionamento di uno stack di celle a combustibile.

Da quanto sopra esposto si evince che un sistema elettrico di propulsione di norma comprende una pluralità di convertitori elettronici di potenza che consentono di interfacciare tra loro diversi sottosistemi le cui caratteristiche elettriche di uscita (i.e. tensione e corrente) possono essere scelte con l'obiettivo di conseguire un dimensionamento ottimo del sottosistema stesso piuttosto che essere imposte dalla necessità di assiemare direttamente tra loro i diversi dispositivi. Oltre ciò, l'impiego di convertitori elettronici di potenza introduce i gradi di libertà necessari alla gestione dei flussi di potenza scambiati tra i diversi sottosistemi di un propulsore elettrico, permettendo di implementare algoritmi di regolazione atti a conseguire sia il più idoneo impiego dei vari dispositivi, sia una efficace strategia nell'utilizzazione delle risorse energetiche disponibili a bordo.

In termini di modalità di impiego, i convertitori di potenza utilizzati in un propulsore elettrico, che sono di norma di tipo bidirezionale, possono quindi essere classificati come segue:

- convertitori DC/AC alimentati da un DC bus a tensione pressoché costante (e.g. nel campo 300÷600V per propulsori aventi potenza dell'ordine delle decine o delle centinaia di kW) e finalizzati alla regolazione della coppia e della velocità dei motori di trazione;
- convertitori DC/DC utilizzati come interfaccia tra un sistema di accumulo a bassa tensione (tipicamente dimensionato con tensione nominale nel campo 100÷250V) e il DC bus di alimentazione del sistema di trazione;
- convertitori AC/DC per la regolazione delle condizioni operative di una unità di generazione costituita da un generatore azionato da motore termico oppure convertitori DC/DC nel caso di unità di generazione realizzata con uno stack di celle a combustibile.

Nel seguito sono richiamate le caratteristiche di funzionamento dei convertitori di potenza, sia di tipo DC/AC sia di tipo DC/DC; tali caratteristiche sono ampiamente trattate nella letteratura tecnica, ed in particolare nel riferimento [1], cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

7.2 Convertitori di potenza DC/AC bidirezionali

Come già evidenziato, negli azionamenti elettrici di trazione che impiegano motori trifase in corrente alternata, quali motori asincroni, motori sincroni a magneti permanenti o motori sincroni a riluttanza, è sempre presente un convertitore di potenza DC/AC che, a partire da un circuito a tensione continua alimentato da una sorgente elettrica disponibile a bordo (e.g. un accumulatore elettrochimico, uno stack di celle a combustibile ecc.), è chiamato a generare le tensioni alternate, di ampiezza e frequenza opportunamente variabili, richieste per l'alimentazione del motore di trazione.

Tali convertitori DC/AC sono pertanto utilizzati per regolare il flusso di potenza tra un circuito in corrente continua ed il motore in corrente alternata, ed in relazione a tale modalità di funzionamento essi sono indicati nella pratica con il nome di "inverter".

È tuttavia necessario precisare da subito che la stessa struttura di conversione comunemente associata al funzionamento da "inverter" può essere anche utilizzata per attuare la conversione AC/DC, cioè per regolare la potenza ricevuta in ingresso da una sorgente in corrente alternata (e.g. un motore di trazione che, durante la fase di frenatura elettrica rigenerativa, si comporta da generatore a spese dell'energia cinetica del veicolo) rendendola disponibile ai terminali del circuito in corrente continua del convertitore. In quest'ultimo caso il convertitore opera da "boost rectifier" ed il passaggio dal funzionamento da "inverter" a quello da "boost rectifier" è attuato senza soluzione di continuità, semplicemente agendo opportunamente sulla sequenza di commutazione degli switch del convertitore.

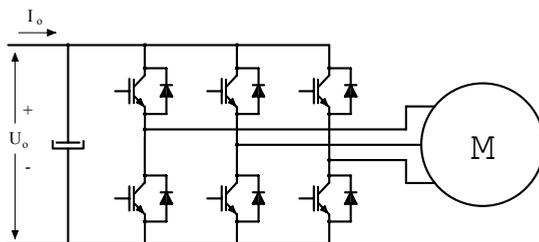


Fig. 7.2 - Configurazione circuitale di un convertitore elettronico di potenza DC/AC a tensione impressa

Per la realizzazione dei convertitori di potenza DC/AC impiegati nel campo della propulsione elettrica è oggi universalmente utilizzata la struttura a ponte trifase mostrata in Fig. 7.2.

In letteratura tale configurazione è denominata “inverter a tensione impressa” (oppure VSI, “Voltage Source Inverter”) in relazione alla presenza, sul lato in corrente continua, di un sistema di immagazzinamento dell’energia e di filtraggio, costituito da condensatori, che deve essere dimensionato per minimizzare le variazioni di tensione ai terminali DC del convertitore durante i transitori di carico. Il sistema trifase di tensioni alternate variabili in ampiezza, frequenza e fase in uscita dal convertitore dipende dalla tensione DC di ingresso e può essere eventualmente regolato attraverso tecniche di modulazione basate sulla regolazione della durata temporale degli impulsi di tensione (i.e. PWM, “Pulse Width Modulation”, vedi oltre).

Nelle forme d’onda della tensione di uscita sono presenti componenti armoniche le cui frequenze caratteristiche sono un multiplo della frequenza di commutazione degli switch e sono quindi facilmente filtrabili, soprattutto se lo spettro in frequenza del contenuto armonico si colloca nel campo delle frequenze più elevate.

Con gli attuali dispositivi a semiconduttore l’adozione di una modulazione PWM a frequenza elevata di commutazione non presenta particolari difficoltà. All’aumentare della frequenza di commutazione diminuisce l’ondulazione della corrente di uscita del convertitore, con riduzione del suo valore efficace (a parità di componente fondamentale) e delle perdite corrispondenti nel carico, ma crescono le perdite di commutazione negli interruttori statici. Nel caso di convertitori utilizzati per l’alimentazione di motori elettrici l’elevata velocità di commutazione degli switch, che rende possibile il funzionamento PWM ad elevata frequenza, provoca ulteriori effetti collaterali indesiderati, quali l’aumento delle sollecitazioni sull’isolamento dell’avvolgimento del motore, dovute ai fronti ripidi di tensione e alle conseguenti sovratensioni ai morsetti del motore, nonché la possibilità di circolazione di correnti nei cuscinetti, indotte per fenomeni di accoppiamento capacitivo tra l’avvolgimento e i lamierini del circuito magnetico.

Tali effetti devono essere talvolta adeguatamente fronteggiati per evitare prematuri danneggiamenti del motore. Tuttavia, l'impiego di una modulazione PWM in tutto il campo di funzionamento, comprese le alte velocità, assicura un più preciso controllo della corrente del motore; se associata a tecniche di controllo a catena chiusa della corrente e/o della coppia elettromagnetica, essa garantisce una migliore risposta dinamica, utile ad esempio nel passaggio dalle condizioni di trazione a quelle di frenatura.

7.2.1 Principio di funzionamento della conversione DC/AC

Con riferimento allo schema di inverter a tensione impressa mostrato in Fig. 7.3 (nel quale gli switch sono rappresentati nella forma propria degli switch "ideali", cioè privi di perdite di potenza ed aventi tempi nulli di commutazione), un sistema trifase di tensioni alternate, variabili in frequenza, può essere generato ai terminali di uscita A, B e C, a partire da una tensione continua V_d applicata ai morsetti d'ingresso, regolando opportunamente la sequenza di accensione degli switch costituenti le tre fasi, dette anche "rami", del convertitore (in figura gli switch sono indicati come T_{A+} e T_{A-} per il ramo A, ed in modo analogo per le altre due fasi). In un angolo elettrico di 360° , corrispondente alla frequenza di uscita desiderata $f_1 = \omega_1/2\pi$, le fasi di accensione e di spegnimento degli switch di uno stesso ramo si alternano tra loro con periodi di uguale durata, dando luogo, rispetto al terminale N di riferimento, a tensioni "ad onda quadra" del tipo mostrato in Fig. 7.3 (b) (i.e. v_{AN} , v_{BN} e v_{CN}) la cui ampiezza è pari alla tensione d'ingresso V_d . La sequenza di accensione e di spegnimento di ciascun ramo è sfasata, rispetto a quella degli altri due rami, di un angolo elettrico pari a $2\pi/3$ così da determinare tra ciascuna coppia dei morsetti di uscita dell'inverter tensioni alternate concatenate del tipo (i.e. v_{AB}) mostrato in Fig. 7.2 (b). In tali tensioni concatenate la componente fondamentale ha valore efficace V_{LL} espresso dalla relazione $V_{LL} = \sqrt{6}V_d/\pi$ e sono presenti armoniche, di frequenza pari ad un multiplo intero dispari h della frequenza fondamentale f_1 e di ampiezza decrescente con il crescere dell'ordine dell'armonica, come mostrato in Fig. 7.3 (c).

I convertitori DC/AC funzionanti con le modalità sopra esposte sono detti inverter a onda quadra e, sebbene consentano di alimentare il carico (e.g. un motore in c.a.) con una tensione alternata di frequenza variabile, essi hanno l'importante svantaggio di dar luogo ad intense componenti armoniche di corrente le quali producono solo un aumento della potenza dissipata per effetto Joule nei circuiti del carico stesso. Oltre ciò, la tensione di uscita dell'inverter è in questo caso unicamente determinata dalla tensione V_d , ed è quindi necessario regolare questa ultima grandezza per variare il valore efficace della tensione ai terminali di uscita del convertitore.

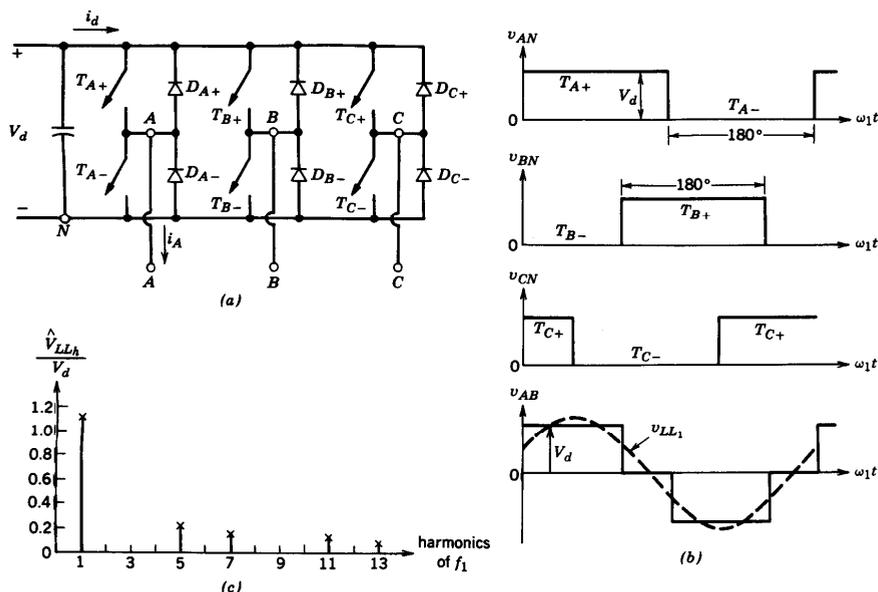


Figure 8-24 Square-wave inverter (three phase).

Fig. 7.3 - Generazione di un sistema trifase di tensioni alternate, variabili in frequenza, mediante un inverter ad onda quadra: a) circuito dell'inverter; b) sequenza di accensione degli switch; c) contenuto armonico della tensione concatenata di uscita [1]

Questi svantaggi possono essere ovviati utilizzando lo stesso schema circuitale ma adottando una sequenza di accensione/spengimento degli switch determinata sulla base della cosiddetta tecnica di modulazione PWM. Gli inverter che utilizzano tale tecnica di modulazione sono detti inverter PWM, e in essi ciascuna semionda della tensione alternata di uscita risulta essere costituita da un treno di impulsi, i quali hanno tutti ampiezza pari alla tensione d'ingresso e frequenza prefissata. Questa frequenza è detta frequenza di modulazione ed il suo valore è scelto, di norma nel campo da qualche kHz a poche decine di kHz, sulla base sia del tipo di dispositivo a semiconduttore utilizzato (tenuto anche conto delle perdite di commutazione tollerabili), sia del valore della frequenza fondamentale di uscita dell'inverter.

Agendo opportunamente sulla durata dei singoli impulsi di tensione è possibile sia regolare il valore efficace della componente fondamentale della tensione di uscita, sia rendere praticamente trascurabili le componenti armoniche di corrente aventi frequenza superiore a quella dell'armonica fondamentale. Indicando con m_a il parametro significativo della modulazione PWM (detto anche indice di modulazione), il valore efficace V_{LL} dell'armonica fondamentale della tensione tra due morsetti di uscita dell'inverter è determinato dalla relazione $V_{LL} = \sqrt{3}m_a V_{dc} / 2\sqrt{2}$ essendo $0 < m_a < 1$.

Tale relazione è valida nel campo della cosiddetta modulazione lineare (cui corrisponde una tensione di uscita che cresce linearmente al crescere dell'indice di modulazione), ma perde significato per valori di $m_a > 1$, nel qual caso si determina un funzionamento in "sovramodulazione" con valori efficaci della tensione di uscita non più proporzionali all'indice di modulazione e compresi tra $V_{LL} = \sqrt{3}V_{dc}/2\sqrt{2}$ e $V_{LL} = \sqrt{6}V_d/\pi$.

Per calcoli di prima approssimazione, riferiti a condizioni di funzionamento di regime permanente e limitati alla componente fondamentale delle grandezze elettriche di uscita, un inverter può essere rappresentato attraverso un generatore ideale di tensione che imprime al circuito di carico un sistema trifase simmetrico di tensioni sinusoidali regolabili in frequenza, ampiezza e fase.

Nel caso in cui, come schematicamente mostrato in Fig. 7.4, l'inverter sia utilizzato per alimentare motore in corrente alternata - rappresentato, per ciascuna fase (e.g. la fase A in Fig. 7.4), solo attraverso la f.e.m. interna $e_A(t)$ e l'induttanza di macchina L - la componente fondamentale della tensione di fase di uscita dell'inverter (e.g. vettore \mathbf{V}_{An1} in Fig. 7.4) può essere regolata opportunamente in frequenza, ampiezza e fase, rispetto al vettore \mathbf{E}_A rappresentativo della f.e.m. interna del motore, allo scopo di imprimere nelle fasi del motore, in termini vettoriali, la desiderata componente fondamentale di corrente (e.g. vettore \mathbf{I}_{A1} in Fig. 7.4). Stante lo stretto legame tra la velocità di rotazione del motore e la frequenza $f_1 = \omega_1/2\pi$ della componente fondamentale delle grandezze di uscita dell'inverter, la regolazione dell'ampiezza e della fase della tensione di uscita dell'inverter consente di regolare, in modo tra loro indipendente, sia il flusso al traferro che la coppia elettromagnetica nel motore.

Come mostrato schematicamente nella Fig. 7.5 per una delle fasi del motore, il vettore \mathbf{I}_A rappresentativo della corrente di uscita dell'inverter può essere scomposto in due componenti, una in fase $(\mathbf{I}_A)_p$ e l'altra in quadratura $(\mathbf{I}_A)_q$ rispetto al vettore \mathbf{E}_A rappresentativo della f.e.m. interna del motore, la posizione istantanea del quale è individuata attraverso il sistema di controllo (i.e. in realtà il sistema di controllo è chiamato ad individuare la posizione istantanea del flusso al traferro, rispetto al quale la f.e.m. interna del motore è in quadratura). È immediato verificare che la componente $(\mathbf{I}_A)_p$ determina la potenza meccanica - e quindi la coppia - del motore, mentre la componente $(\mathbf{I}_A)_q$ è strettamente correlata al flusso al traferro. Dal diagramma vettoriale di Fig. 7.5 (b) si evince che lo sfasamento δ con il quale la tensione di uscita dell'inverter è comandata rispetto alla f.e.m. interna del motore determina il valore efficace della componente $(\mathbf{I}_A)_p$ (i.e. si verifica che $(\mathbf{I}_A)_p=0$ solo se $\delta=0$) mentre il valore efficace della componente $(\mathbf{I}_A)_q$ è correlato alla differenza tra i moduli dei vettori \mathbf{V}_{An} ed \mathbf{E}_A . Con valori di $\delta > 0$ (i.e. anticipo di \mathbf{V}_{An} rispetto ad \mathbf{E}_A , come in Fig. 7.5 (b)) l'inverter trasferisce potenza verso l'albero del motore, mentre con valori $\delta < 0$ (i.e. come in Fig. 7.5 (c)) si ha un funzionamento da

boost rectifier nel quale la potenza elettrica erogata dalla macchina (e.g. nelle condizioni di frenatura rigenerativa di un motore o nel caso di un generatore azionato da un motore primo) è trasferita verso il DC bus. In sintesi, regolando sia l'ampiezza che la fase della tensione di uscita dell'inverter, come mostrato in Fig. 7.5 (d), è possibile determinare – per una qualsiasi frequenza della componente fondamentale delle grandezze elettriche lato corrente alternata del convertitore, cui è correlata la velocità di rotazione della macchina – un funzionamento nel quale potenza elettrica è trasferita dal DC bus al motore (funzionamento da “inverter”) oppure ottenere una conversione AC/DC della potenza (funzionamento da “boost rectifier”), essendo inoltre possibile, in entrambi i casi, effettuare una regolazione del campo magnetico interno alla macchina in base alla strategia di controllo dell’azionamento.

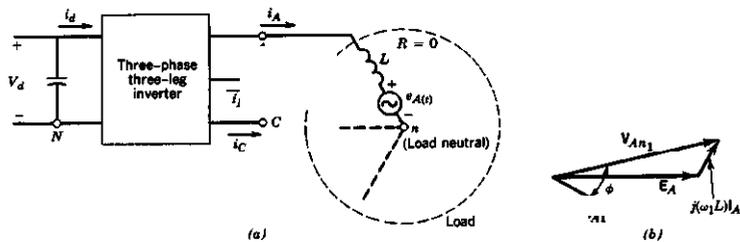


Fig. 7.4 - Scema circuitare (a) e diagramma vettoriale (b) riferiti alle componenti fondamentali delle grandezze elettriche di uscita di un inverter trifase a tensione impressa [1]

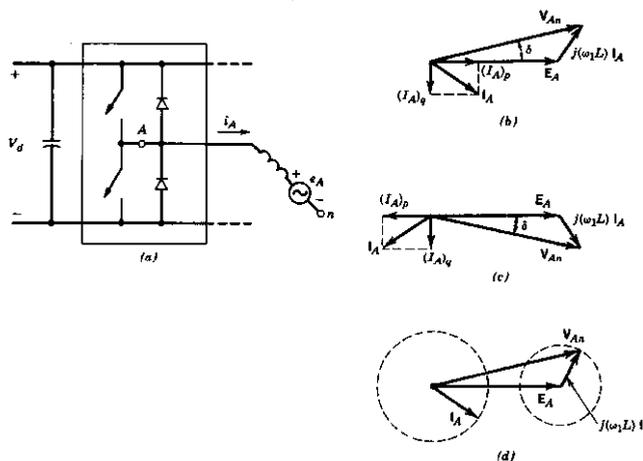


Figure 8
(d) const

Fig. 7.5 - Schema circuitare (a) e diagrammi vettoriali (b, c e d) riferiti alle componenti fondamentali delle grandezze elettriche di uscita nel caso di funzionamento da inverter (b) o da boost rectifier (c) [1]

7.2.2 Modulazione PWM sinusoidale

Come già in precedenza evidenziato, il valore efficace della componente fondamentale della tensione di uscita di un convertitore DC/AC può essere regolato attraverso tecniche di modulazione. La modulazione è sostanzialmente una logica di controllo della sequenza di accensioni e spegnimenti degli switch che compongono l'inverter, il cui scopo è quello di regolare il valore efficace della componente fondamentale di tensione, possibilmente minimizzando il residuo contenuto spettrale presente a frequenza più elevata. Diverse tecniche di modulazione sono possibili e utilizzate, essendo la scelta dettata anche dal tipo di supporto hardware usato per implementarle. Si distinguono in particolare le tecniche digitali da quelle analogiche più tradizionali, anche se le migliori prestazioni possono essere ottenute da entrambe.

Nel caso della modulazione per ampiezza di impulsi (i.e. Pulse-Width-Modulation), il controllo può essere realizzato mediante il confronto istantaneo di due segnali del tipo mostrato in Fig. 7.6. Un segnale, denominato "portante", di forma triangolare, generalmente di ampiezza costante e frequenza pari alla prescelta frequenza di switching f_s del convertitore, ed un segnale detto "modulante" la cui forma d'onda determina quella della componente fondamentale della tensione di uscita. Per i convertitori DC/DC il segnale modulante sarà pertanto una tensione continua, mentre nel caso di un convertitore DC/AC sarà utilizzata, per ciascun ramo del convertitore, una modulante costituita da un segnale sinusoidale regolabile in frequenza e ampiezza (i.e. PWM sinusoidale).

Nel caso di un inverter trifase, poiché il circuito di carico è a tre fili, le forme d'onda in uscita al convertitore possono essere generate sovrapponendo a tutte le modulanti un qualsiasi termine comune, detto quindi di "modo comune", che può variare e migliorare particolari prestazioni di modulazione. In tale ambito, l'impiego di una modulante sinusoidale per ciascuna fase rappresenta la condizione stazionaria di riferimento, rappresentativa delle proprietà fondamentali della modulazione, con il pregio di coinvolgere indipendentemente le singole fasi. Tuttavia, la migliore utilizzazione di un inverter trifase richiede la considerazione anche degli effetti delle correlazioni tra le modulazioni delle tre fasi, per massimizzare l'ampiezza e per minimizzare i residui di modulazione della tensione trifase che alimenta effettivamente il carico. In relazione a tale aspetto possono essere utilizzate altre varie tecniche di modulazione che si distinguono dalla modulazione sinusoidale vera e propria.

Al fine di produrre, a partire da un DC bus esercito a tensione V_d , una forma d'onda di tensione alternata avente componente fondamentale ad una desiderata frequenza si comanda la sequenza di conduzione e di interdizione degli switch costituenti un ramo dell'inverter (e.g. del ramo della fase A del convertitore mostrato nella precedente Fig. 7.3) comparando, come mostrato nella Fig. 7.6, la portante triangolare S_{tri} con un segnale modulante sinusoidale S_{modul}

avente la desiderata frequenza di uscita dell'inverter. Lo stato di conduzione degli switch è determinato utilizzando il seguente criterio: se $S_{\text{modul}} > S_{\text{tri}}$ si comanda la conduzione dello switch collegato alla sbarra positiva del DC bus di ingresso (i.e. T_{A+}) per cui risulta $v_{AN} = V_d$; non appena si determina la condizione $S_{\text{modul}} < S_{\text{tri}}$, è invece lo switch collegato alla sbarra negativa del DC bus (i.e. T_{A-}) ad essere posto in conduzione così che risulta $v_{AN} = 0$; ovviamente la conduzione di T_{A-} implica la preventiva apertura di T_{A+} e la transizione tra gli stati di conduzione dei due switch della stessa fase è attuata imponendo un breve tempo morto nel quale nessuno dei due switch è acceso.

Per ciascuna delle altre due fasi dell'inverter il meccanismo di determinazione della tensione di uscita è analogo a quello sopra descritto per la fase A: si utilizzano a tal scopo due modulanti che sono sfasate, rispettivamente di un terzo e di due terzi del periodo elettrico rispetto quella della fase A, mentre la portante triangolare di confronto rimane unica. Le tensioni d'uscita di un inverter trifase formano quindi una terna simmetrica di tensioni aventi forma d'onda che varia tra i due livelli V_d e 0.

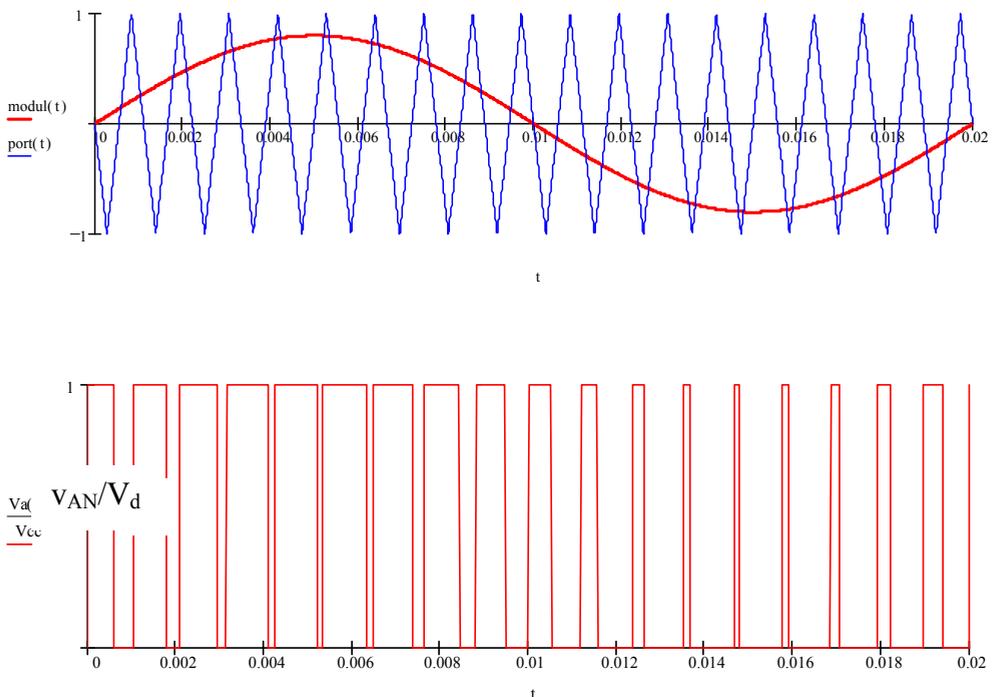


Fig. 7. 6 - Tecnica PWM sinusoidale: a) esempio di modulante sinusoidale e portante; b) forma d'onda della tensione di uscita di un ramo dell'inverter (e.g. la tensione VAN di cui alla precedente Fig. 7.3)

Osservando la combinazione degli stati di conduzione degli switch sulle tre fasi dell'inverter si evince che per un inverter trifase funzionante con modulazione PWM si determinano complessivamente 8 modi diversi di conduzione, cioè due modi di conduzione in più rispetto ai 6 modi di conduzione che la stessa struttura determina nel caso di funzionamento ad onda quadra.

I due modi di conduzione aggiuntivi corrispondono a condizioni nelle quali, rispettivamente, tutti gli switch collegati alla sbarra positiva del DC bus, oppure tutti gli switch collegati alla sbarra negativa del DC bus, sono contemporaneamente accesi per cui in entrambi i casi il valore delle tensioni concatenate all'uscita dell'inverter è nullo. È proprio l'introduzione di questi due modi di conduzione aggiuntivi che consente di regolare il valore efficace della componente fondamentale della tensione di uscita dell'inverter. Definendo come "indice (o profondità) di modulazione" $m_a = \hat{S}_{\text{modul}} / \hat{S}_{\text{tri}}$ il rapporto tra l'ampiezza della modulante e quello della portante, si dimostra che il valore efficace dell'armonica fondamentale della tensione di uscita è direttamente proporzionale all'indice di modulazione fintanto che $\hat{S}_{\text{modul}} \leq \hat{S}_{\text{tri}}$. Al variare del valore di m_a si modificano i punti di intersezione tra modulante e portante e si modifica conseguentemente la forma d'onda della tensione di uscita. La frequenza delle componenti armoniche rimane invariata, ma le rispettive ampiezze variano secondo andamenti non uniformi. Solamente l'armonica fondamentale ha una variazione lineare, purché non siano raggiunte condizioni di sovr modulazione determinate da $\hat{S}_{\text{modul}} \geq \hat{S}_{\text{tri}}$.

Oltre all'indice di modulazione, un parametro caratteristico della modulazione PWM sinusoidale è il "rapporto di frequenza di modulazione" $m_f = f_s / f_1$ definito come rapporto tra la frequenza di commutazione degli switch dell'inverter (i.e. quella del segnale portante triangolare) e la frequenza della modulante. A condizione di scegliere la frequenza di switching pari ad un multiplo intero di quella della modulante, la frequenza f_1 della componente fondamentale è esattamente quella della prima armonica della tensione di fase dell'inverter, ossia la periodicità fondamentale delle commutazioni è pari a quella del segnale modulante. Diversamente, è possibile generare contenuti armonici non nulli a frequenza inferiore a quella della componente fondamentale, in ogni caso di entità trascurabile, o più piccoli di oltre un ordine di grandezza rispetto alla componente fondamentale, se $m_f \gg 1$.

Nel caso in cui l'inverter è chiamato ad alimentare il carico con frequenza f_1 variabile (e.g. nel caso di un motore elettrico, la frequenza fondamentale varia da qualche Hz a qualche centinaia di Hz al crescere della velocità del motore) il rapporto m_f varia conseguentemente, determinando un contenuto armonico della tensione di uscita nel quale l'ampiezza e la frequenza delle diverse armoniche risulta variabile con m_f .

Tenuto conto che negli azionamenti elettrici la presenza di armoniche diverse dalla fondamentale costituisce sempre un elemento negativo (i.e. nel motore le armoniche di tensione danno luogo ad un aumento delle perdite di potenza nel circuito magnetico mentre le armoniche di corrente, se di ampiezza significativa, determinano pulsazioni di coppia ed un incremento delle perdite di potenza per effetto Joule), è naturale che la distribuzione delle armoniche della tensione di uscita dell'inverter sia uno dei fattori primari da valutare.

I motori elettrici, per loro natura, hanno una caratteristica filtrante di tipo "passa basso" rispetto alla tensione. Da ciò consegue che, scegliendo un valore di m_f sufficientemente elevato in corrispondenza della massima frequenza di alimentazione del motore, l'insieme delle componenti armoniche "indesiderate" è relegato nel campo di frequenze in cui il motore, senza l'adozione di filtri supplementari, effettua un adeguato filtraggio, limitando a valori accettabili l'ampiezza delle correnti associate alle componenti armoniche di tensione aventi le frequenze più alte.

Esiste, tuttavia, un limite di convenienza all'incremento di m_f , solitamente più restrittivo di quello di fattibilità, a causa dell'aumento delle dissipazioni di potenza dei componenti elettronici durante le commutazioni.

7.2.3 Sovramodulazione ed iniezione di terza armonica

Per un convertitore DC/AC regolato mediante una tecnica PWM basata su segnali modulanti di tipo sinusoidale si indica con "sovrarmodulazione" una condizione di esercizio del tipo mostrato in Fig. 7.7, nella quale l'ampiezza della modulante supera l'inviluppo della portante. Il numero delle commutazioni durante un periodo elettrico della modulante è ridotto ma contemporaneamente si perde la proporzionalità tra m_a e l'armonica fondamentale della tensione di uscita.

La sovrarmodulazione del tipo mostrato nella Fig. 7.7 determina sulla tensione di uscita dell'inverter un limite superiore che è proprio della tecnica con modulanti di tipo sinusoidale. Va tuttavia considerato che, in termini di vincolo fisico, ai terminali di uscita dell'inverter sarebbe invece possibile ottenere una tensione concatenata di valore massimo esattamente pari alla tensione continua disponibile ai terminali di ingresso dell'inverter.

Affinché la modulazione delle tre fasi permetta di raggiungere, senza errori o distorsioni, il vincolo fisico di cui sopra, si dimostra necessario sommare un'adeguata forma d'onda, identicamente a tutte le tre sinusoidi costituenti il segnale modulante fondamentale. In questo modo, poiché le componenti concatenate di uscita non vengono modificate da questo "modo comune" di modulazione, è possibile evitare la sovrarmodulazione in un ulteriore, ma limitato, campo di variazione delle ampiezze fondamentali, nell'ambito del quale la tensione di uscita dell'inverter permane esente da componenti armoniche di basso ordine.

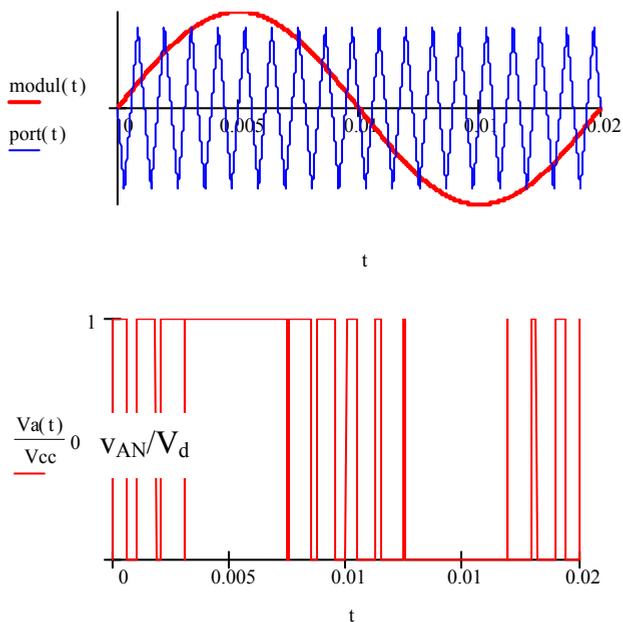


Fig. 7.7 - Esempio di sovramodulazione ($m_a=1,2$)

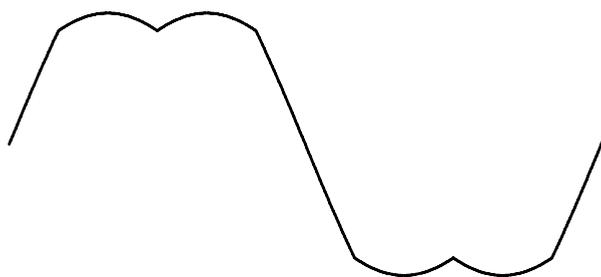


Fig. 7.8 - Tipica deformazione di terza armonica di un segnale modulante di fase che consente l'estensione della linearità di modulazione

Per mantenere una adeguata proprietà di simmetria dei segnali modulanti così modificati, si dimostra necessario che il modo comune di modulazione abbia frequenza pari a tre volte quella della componente fondamentale delle modulanti.

La fase di tale cosiddetta "terza armonica" viene disposta in modo da ridurre i valori di picco della modulante deformata, come mostrato in Fig. 7.8, ovviamente a parità di valore massimo della componente modulante fondamentale.

Il nuovo limite di linearità determina una tensione concatenata di uscita dell'inverter il cui valore massimo coincide con il limite fisico imposto dalla tensione continua di ingresso; l'incremento di modulazione lineare corrisponde quindi all'introduzione di un coefficiente moltiplicativo pari a $2/\sqrt{3}$, così che il valore efficace della tensione di concatenata ottenibile con $m_a = 1$ passa da $V_{LL} = \sqrt{3}V_{dc}/2\sqrt{2}$, caratteristico della tecnica PWM con modulanti di tipo sinusoidale, a $V_{LL} = V_{dc}/\sqrt{2}$.

7.3 Convertitori di potenza DC/DC bidirezionali

In un sistema elettrico di propulsione gli azionamenti di trazione sono sempre alimentati da un circuito in corrente continua (nel seguito indicato anche come "DC bus") che - in relazione al tipo di applicazione, e quindi alla potenza di dimensionamento dell'azionamento - è esercito con un idoneo livello di tensione. Ad esempio, livelli di tensione nel campo da 36V a 80V sono tipici dei carrelli elevatori industriali, mentre per gli autoveicoli elettrici o ibridi la tensione del DC bus è usualmente scelta nel campo da 200V a 400V. Infine, con riferimento alle applicazioni di trazione su rotaia, sono di norma utilizzati livelli di tensione nel campo da 750V a 3kV, tenuto conto delle rilevanti potenze di dimensionamento del sistema di propulsione e della tensione di esercizio della linea di contatto che alimenta il sistema di propulsione del veicolo.

La sorgente elettrica che alimenta il DC bus di un azionamento di trazione può essere unica (come nel caso dell'accumulatore elettrochimico "di energia" che alimenta l'azionamento di trazione di un carrello elevatore industriale oppure quello di un autoveicolo elettrico a batteria) ovvero può essere costituita dall'insieme di più dispositivi (ad esempio, uno stack di celle a combustibile opportunamente combinato con un accumulo elettrochimico di "potenza" realizzato con supercondensatori) aventi funzioni, tra loro coordinate, di generazione e di accumulo temporaneo della potenza. In entrambi i casi è necessario, oppure si dimostra tecnicamente conveniente, interporre un convertitore elettronico di potenza DC/DC tra ciascuno dei dispositivi costituenti la sorgente elettrica in corrente continua ed il DC bus dell'azionamento di trazione, tenuto conto che spesso i livelli di tensione ritenuti più opportuni per il dimensionamento dei dispositivi di generazione e di accumulo sono sostanzialmente diversi da quelli idonei per il dimensionamento dell'azionamento di trazione.

I convertitori elettronici di potenza DC/DC sono pertanto componenti fondamentali di un sistema elettrico di propulsione, essendo ad essi affidato il compito di interfaccia tra i dispositivi di generazione e di accumulo presenti a bordo di un veicolo ed il DC bus dell'azionamento di trazione: infatti, il loro impiego consente di controllare opportunamente il funzionamento dei vari dispositivi, permettendo inoltre di regolare al valore desiderato la tensione di alimentazione dell'azionamento di trazione al variare delle condizioni operative.

Nel seguito sono illustrate alcune delle principali configurazioni utilizzate per i convertitori DC/DC bidirezionali, rimandando al riferimento bibliografico [1] per ulteriori approfondimenti.

7.3.1 Convertitori DC/DC a singolo ingresso

Per i convertitori DC/DC sono utilizzate diverse configurazioni circuitali che possono essere classificate sulla base del rapporto di conversione tra la tensione media di uscita e quella d'ingresso del convertitore. In relazione a ciò, si distinguono convertitori che consentono di ottenere in uscita una tensione media minore di quella d'ingresso (convertitori di tipo Buck, Full-bridge, Push-pull, Forward), convertitori con tensione media di uscita maggiore di quella d'ingresso (convertitore di tipo Boost), convertitori con tensione media di uscita che può essere minore o maggiore della tensione d'ingresso (convertitori di tipo Buck-Boost, Cuk, Flyback) in funzione del valore assunto dal parametro di regolazione (i.e. duty-cycle), essendo tale parametro comune a tutte le tipologie di convertitore DC/DC e di valore sempre compreso tra 0 e 1.

Una sintetica illustrazione del significato del parametro di regolazione "duty-cycle" può essere fornita riferendosi alla Fig. 7.9, che mostra la semplice configurazione di convertitore DC/DC di tipo Buck spesso adottata per il circuito di frenatura presente nel circuito in corrente continua di un sistema di propulsione.

A partire dalla tensione V_d del DC bus che alimenta l'azionamento di trazione, fissata la frequenza di commutazione f_s dello switch (cui corrisponde un periodo $T_s=1/f_s$), la tensione media V_o ai terminali del resistore di frenatura (e quindi la potenza che in esso è dissipata) è regolata attraverso il tempo t_{on} nel quale lo switch è mantenuto nello stato di conduzione. Si definisce duty-cycle il rapporto $d = t_{on} / T_s$, dove $0 < d < 1$, ed è immediato verificare che risulta $V_o = d V_d$. Il segnale di pilotaggio dello switch è determinato dal confronto tra un segnale di controllo $v_{control}$ (generato sulla base dell'errore tra il valore desiderato ed il valore effettivo della tensione media ai terminali del resistore) ed un segnale periodico v_{st} (e.g. un'onda triangolare a dente di sega, come mostrato in Fig. 7.9) avente ampiezza prefissata e frequenza pari alla frequenza di commutazione dello switch.

Si deve ricordare che, ai fini di una utilizzazione ottimale di un sistema elettrico di propulsione, è necessario poter effettuare il recupero di energia durante le fasi di frenatura del veicolo. I convertitori DC/DC utilizzati nei sistemi elettrici di propulsione devono pertanto avere una configurazione bidirezionale in corrente, cioè uno schema circuitale che, oltre a consentire il trasferimento di potenza elettrica dal circuito di ingresso a quello di uscita, rende possibile, senza soluzione di continuità, l'inversione del flusso di potenza.

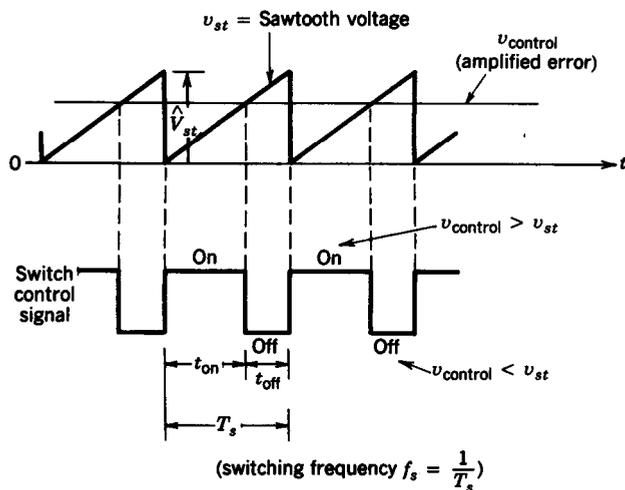
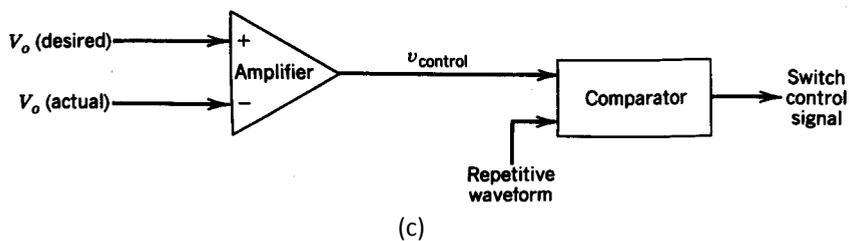
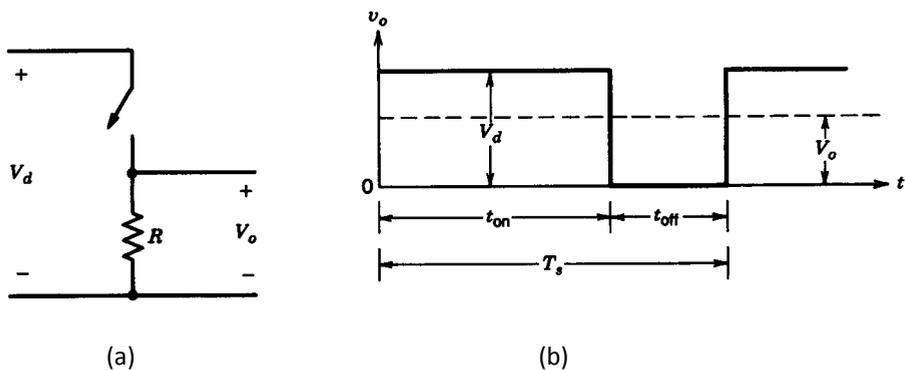


Fig. 7.9 - Illustrazione del concetto di "duty cycle" utilizzato nella regolazione dei convertitori DC/DC: a) schema circuitale per il controllo della potenza dissipata in un resistore di frenatura; b) forma d'onda della tensione ai terminali del resistore di frenatura; c) circuito di controllo della tensione ai terminali del resistore di frenatura; d) segnale di pilotaggio dello switch [1]

Tra le diverse configurazioni possibili, lo schema circuitale maggiormente utilizzato nei sistemi elettrici di propulsione è quello mostrato nella Fig. 7.10 (a), che si riferisce ad un convertitore Boost bidirezionale. A partire da una sorgente che imprime una tensione di ingresso U_g , tale convertitore – regolando opportunamente il duty cycle d_{up} dello switch T_{up} e mantenendo nello stato off lo switch T_{dw} – consente di ottenere in uscita valori di tensione U_o sempre maggiori della tensione di ingresso, essendo $U_o = U_g / (1 - d_{up})$.

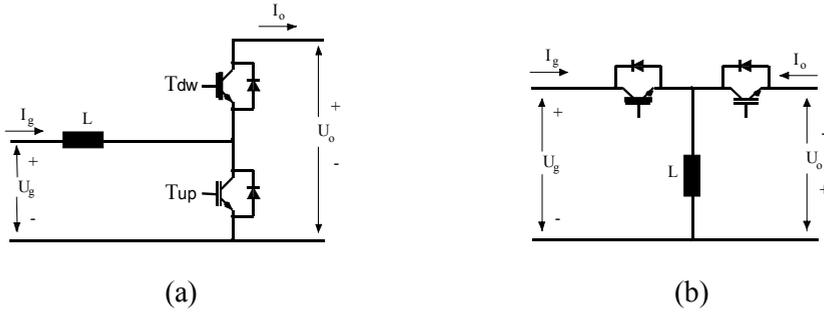
Il duty cycle dello switch T_{up} è di norma regolato nel campo $0,1 < d_{up} < 0,65$, consentendo cioè aumenti della tensione di uscita fino a circa 3 volte la tensione di ingresso. In un sistema di propulsione tale possibilità può essere utilizzata per regolare la tensione del DC bus in funzione delle condizioni di marcia del veicolo [2], così da migliorare le condizioni di funzionamento dell'azionamento di trazione. L'inversione del flusso di potenza (e.g. nel caso di frenatura rigenerativa) è ottenuta imponendo lo stato off allo switch T_{up} e regolando opportunamente il duty cycle d_{dw} dello switch T_{dw} nel campo $0 < d_{dw} < 1$ al diminuire della tensione U_o .

Nel caso si ritenga opportuno che la tensione U_o possa assumere valori sia maggiori sia minori della tensione U_g della sorgente, è necessario adottare una diversa configurazione circuitale. Tra le varie alternative disponibili a tale scopo, la più semplice è quella del convertitore Buck-Boost avente lo schema è mostrato in Fig. 7.10 (b).

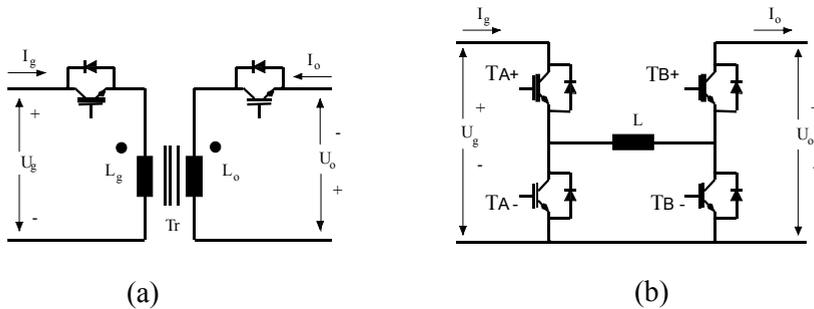
Tale convertitore Buck-Boost è caratterizzato dalla inversione di polarità della tensione, tra ingresso e uscita, ma ciò tuttavia non impone alcun vincolo funzionale nel tipo di applicazioni proprie dei sistemi di propulsione. Una alternativa talvolta utilizzata si basa sull'impiego di un convertitore Flyback avente la configurazione mostrata in Fig. 7.11 (a).

Tale convertitore è caratterizzato dalla presenza di un trasformatore ad alta frequenza che introduce un isolamento galvanico tra i circuiti di ingresso e di uscita. Il funzionamento e le prestazioni del convertitore Flyback sono molto simili a quelli del convertitore Buck-Boost. Dal punto di vista del dimensionamento, tuttavia, il trasformatore ad alta frequenza presente nello schema circuitale del convertitore Flyback è, rispetto al corrispondente induttore del convertitore Buck-Boost, di più onerosa realizzazione. Poiché nei sistemi di propulsione l'isolamento introdotto dal trasformatore non è di norma necessario, si ritiene quasi sempre preferibile l'impiego del convertitore Buck-Boost, rispetto alla configurazione Flyback.

Una ulteriore alternativa per realizzare un convertitore DC/DC bidirezionale in grado di rendere disponibile in uscita valori di tensione U_o sia maggiori che minori della tensione U_g è mostrata nella Fig. 7.11 (b) [3, 4].



**Fig. 7.10 - Schemi circuitali di convertitori DC/DC bidirezionali:
a) convertitore Boost; b) convertitore Buck-Boost**



**Fig. 7.11 - Schemi circuitali di convertitori DC/DC bidirezionali:
a) convertitore Flyback; b) convertitore composto Buck-Boost**

Tale configurazione Buck-Boost può essere considerata come l'unione di due convertitori Boost reversibili. Nella condizione di funzionamento in cui è erogata potenza al carico la modalità Buck è ottenuta regolando il duty-cycle dello switch T_{A+} e mantenendo nello stato off tutti gli altri switch; la modalità Boost è invece attuata regolando il duty-cycle dello switch T_{B-} e mantenendo nello stato di on lo switch T_{A+} (gli switch T_{A-} e T_{B+} restano entrambi nello stato off). Il recupero di potenza verso la sorgente è attuato con modalità Buck, regolando il duty-cycle dello switch T_{B+} (essendo tutti gli altri switch nello stato off), ovvero con modalità Boost, regolando il duty-cycle dello switch T_{A-} (con T_{B+} mantenuto nello stato on e gli altri switch nello stato off).

Rispetto al convertitore Buck-Boost, lo schema di Fig. 7.11 (b) è caratterizzato da minori sollecitazioni di tensione sui componenti e da ridotte correnti circolanti nell'induttore, che risultano di entità paragonabile a quelle del convertitore Boost. Tuttavia, il numero di componenti è più elevato e due di essi sono attraversati contemporaneamente dall'intera corrente induttiva commutata, con un incremento delle perdite del convertitore.

7.3.2 *Impiego di un convertitore DC/DC nel DC bus di un azionamento di trazione*

Una possibile configurazione di propulsore elettrico è quella che utilizza la sorgente elettrica DC presente a bordo – sia essa un accumulatore elettrochimico di energia, oppure uno stack di celle a combustibile, oppure un gruppo elettrogeno costituito da motore termico, generatore elettrico e convertitore AC/DC – per alimentare direttamente il DC bus dell’azionamento di trazione. Tale semplice configurazione si dimostra tuttavia svantaggiosa riguardo diversi aspetti relativi sia al dimensionamento che al funzionamento del propulsore.

Un primo svantaggio è determinato dalla necessità di vincolare la tensione di dimensionamento della sorgente DC alla “velocità base” dell’azionamento (i.e. la velocità del motore oltre la quale l’inverter deve attuare una regolazione di corrente in “deflussaggio” per ovviare all’impossibilità di aumentare ulteriormente la tensione efficace di alimentazione del motore al crescere della velocità), piuttosto che scegliere il valore più idoneo alle caratteristiche del dispositivo sorgente, in genere più basso rispetto a quello richiesto per l’alimentazione dell’azionamento di trazione.

Un secondo svantaggio è poi determinato dalla necessità di utilizzare una modulazione “profonda” della tensione di uscita dell’inverter nel funzionamento del motore alle basse velocità, con conseguente aumento delle perdite complessive di potenza nell’azionamento. Infine, il collegamento diretto tra sorgente e azionamento di trazione impedisce di compensare le variazioni della tensione di uscita della sorgente dovute al carico (e.g. si pensi alle variazioni della tensione ai morsetti di un accumulatore elettrochimico determinate dalla scarica dell’accumulatore stesso), con conseguenti limitazioni sulle prestazioni complessive dell’azionamento di trazione.

Allo scopo di ovviare agli svantaggi sopra evidenziati, si dimostra tecnicamente conveniente introdurre nella configurazione del propulsore un convertitore DC/DC bidirezionale, interposto tra la sorgente e l’azionamento di trazione. Ciò consente sia di svincolare la tensione di dimensionamento della sorgente da quella richiesta per l’alimentazione dell’azionamento di trazione, sia di compensare le variazioni della tensione di uscita della sorgente con il carico, ad esempio controllando il duty-cycle del convertitore DC/DC in modo da alimentare a tensione costante l’azionamento di trazione.

Tale impostazione, tuttavia, non pone rimedio alla necessità di adottare una modulazione “profonda” della tensione di uscita dell’inverter per adattarla alle condizioni variabili di velocità del motore. Un miglioramento del rendimento del sistema di propulsione si ottiene pertanto utilizzando il convertitore DC/DC per adattare la tensione di alimentazione dell’inverter alle condizioni di funzionamento del motore [2, 3], così da rendere la tensione del DC bus il

più possibile vicina, in qualsiasi condizione operativa dell'azionamento di trazione, alla tensione richiesta per l'alimentazione del motore.

Per valutare l'onere derivante dall'impiego di un convertitore DC/DC per regolare la tensione di alimentazione dell'azionamento di trazione, si può fare riferimento ad una "potenza di dimensionamento" dell'intero sistema di conversione, cioè comprensivo sia del convertitore DC/DC che dell'inverter. Per ciascun componente la potenza di dimensionamento è definita dal prodotto della massima tensione e della massima corrente che interessano il componente stesso. Poiché la potenza di dimensionamento di un sistema di conversione con componenti a semiconduttore (i.e. switch e diodi) può essere convenzionalmente definita dalla somma delle potenze apparenti di tutti i componenti attivi che lo compongono, rispetto al caso in cui è utilizzato solo l'inverter si dimostra che, dal punto di vista della potenza complessiva di dimensionamento, l'aggiunta di un convertitore DC/DC riduce apprezzabilmente il dimensionamento dell'inverter stesso, così da poter risultare nel complesso conveniente.

La scelta della tensione massima di alimentazione dell'inverter è in generale determinata dai limiti dei componenti elettronici di potenza commercialmente disponibili. Sono scelte plausibili i valori di 400V e di 700V, in corrispondenza a componenti (in particolare IGBT) con limiti rispettivamente di 600V o di 1200V.

Tali valori sfruttano ragionevolmente i limiti di tensione dei componenti, tenuto conto di adeguati margini di sicurezza, riducendo così il dimensionamento in corrente dei componenti dell'inverter. Poiché in un convertitore DC/DC di tipo Boost, fissata la potenza elaborata dal convertitore, le perdite aumentano al crescere del rapporto tra la tensione di uscita e quella di ingresso, la scelta della tensione di ingresso del convertitore deve essere effettuata sulla base di un compromesso tra le esigenze poste dal dimensionamento in tensione della sorgente e quelle del convertitore DC/DC; per i sistemi di propulsione degli autoveicoli si verifica che in genere la soluzione più idonea è quella che determina l'impiego di IGBT da 600V.

Scegliendo una tensione di dimensionamento dell'inverter pari a quella massima dei componenti commercialmente disponibili, ne consegue che la tensione di alimentazione dell'inverter sarà in generale sempre maggiore di quella della sorgente, e pertanto il convertitore DC/DC da impiegare dovrà essere in grado di operare come elevatore di tensione.

Come già precedentemente esposto, un miglioramento del rendimento del sistema di conversione si può conseguire con un adeguato controllo del convertitore DC/DC che mantenga la tensione di alimentazione dell'inverter il più possibile vicina alla tensione richiesta dal motore, adeguando la tensione di alimentazione dell'inverter alle effettive necessità del motore stesso.

Tale adeguamento può essere parziale (i.e. la tensione di alimentazione dell'inverter è sempre maggiore o uguale a quella della sorgente) oppure totale (i.e. la tensione di alimentazione dell'inverter può essere anche minore di quella della sorgente), a seconda della escursione della tensione della sorgente e di quella richiesta per l'alimentazione del motore, in funzione dei limiti di tensione dei componenti attivi impiegati.

Tuttavia, i risultati ottenibili sia con l'adeguamento parziale della tensione di alimentazione dell'inverter alle esigenze del motore, impiegando il convertitore Boost, sia con l'adeguamento totale impiegando il convertitore Buck-Boost fanno dedurre che le maggiori perdite che si verificano nel convertitore Buck-Boost di norma vanificano il vantaggio che si consegue con l'adeguamento completo della tensione. Anche dal punto di vista della potenza di dimensionamento complessiva, la soluzione di un adeguamento parziale mediante il convertitore Boost si dimostra essere la più vantaggiosa.

Oltre a ciò va considerato che il convertitore Boost, nel confronto con altre configurazioni di convertitore, assorbe dalla sorgente una corrente con il minimo contenuto di ondulazione. Tale caratteristica può essere significativa per le perdite di potenza e per la vita della sorgente, soprattutto nel caso in cui la sorgente sia costituita da un accumulatore elettrochimico. Nel caso fossero adottate altre configurazioni di convertitore (e.g. la configurazione Buck-Boost) sarebbe necessario inserire appositi filtri, con incremento della complessità e delle perdite del sistema.

Da quanto sopra esposto si giunge alla conclusione che la soluzione più conveniente è quella di un convertitore DC/DC di tipo Boost bidirezionale che alimenta l'azionamento di trazione. Il convertitore DC/DC dovrebbe essere gestito in modo da adeguare la tensione di alimentazione dell'inverter alle esigenze del motore durante le diverse condizioni di funzionamento dell'azionamento di trazione; nelle condizioni di marcia in cui la tensione di alimentazione dell'inverter è uguale a quella della sorgente (i.e. convertitore DC/DC funzionante con duty-cycle nullo) la regolazione della tensione ai terminali del motore è attuata dal solo inverter.

La comparazione tra una configurazione di tipo convenzionale (i.e. uno schema di propulsore nel quale la sorgente alimenta direttamente l'azionamento di trazione) e quella che comprende un convertitore DC/DC interposto tra la sorgente e l'azionamento di trazione è di per sé complessa proprio per la variazione delle condizioni operative della sorgente e dell'effettivo ciclo di lavoro dell'azionamento di trazione, tenuto conto anche del tipo di motore utilizzato, ad esempio in termini di capacità di funzionamento in condizioni di deflussaggio.

Con riferimento a tale comparazione, non sussistono correlazioni che possano dimostrare, in modo univoco e risolutivo, che una delle due configurazioni sia migliore rispetto all'altra per ogni aspetto del dimensionamento.

È pertanto necessario attuare una verifica puntuale di progetto in relazione a ciascun caso specifico. Sussistono, tuttavia, diverse indicazioni del fatto che la soluzione con convertitore di tipo Boost risulti essere la migliore per molti aspetti (rendimento, costo, volumi) quanto meno nella maggior parte delle condizioni operative del sistema di propulsione. L'aspetto probabilmente più controverso, dal punto di vista del rendimento globale, riguarda la comparazione delle perdite per commutazione dei due sistemi di conversione. Tali perdite, a differenza di quelle per conduzione, coinvolgono ulteriori variabili relative alla "qualità" piuttosto che alla "quantità" della conversione.

La principale variabile è la frequenza di modulazione da utilizzare nei due sistemi di conversione oggetto di confronto. Nella configurazione che utilizza un convertitore Boost, ad esempio, la modulazione PWM dell'inverter può essere attuata a frequenze ridotte in virtù dell'adeguamento della tensione del DC bus alle effettive esigenze del motore; per contro la frequenza di modulazione del convertitore Boost dovrebbe essere di valore piuttosto elevato per ridurre costo e volume dell'induttore. Nel caso di un azionamento di trazione alimentato direttamente dalla sorgente, per ottenere un'identica percentuale di ondulazione di corrente nel motore, si dovrebbe prevedere una frequenza di modulazione comunque superiore a quella utilizzata nel caso in cui l'inverter è alimentato dal convertitore Boost. Ciò è necessario in tutte le condizioni di funzionamento nelle quali la tensione della sorgente è in eccesso rispetto alla minima tensione di dimensionamento, cioè praticamente nella gran parte del tempo di autonomia del veicolo.

7.3.3 Convertitori DC/DC ad ingresso multiplo

Nel caso di sistemi di propulsione utilizzando sistemi combinati di accumulo costituiti, ad esempio, da un accumulatore elettrochimico e da un banco di condensatori, l'alimentazione a tensione regolata del DC bus di ingresso dell'azionamento di trazione può essere realizzata attraverso un convertitore DC/DC ad ingressi multipli e singola uscita [5]. La configurazione di questo convertitore DC/DC, in letteratura indicata anche come MIPEC, comprende un certo numero di convertitori Boost i cui terminali di uscita sono posti tra loro in parallelo per costituire il DC bus di alimentazione dell'azionamento di trazione, come mostrato schematicamente nella Fig. 7.12 (vedi anche il Cap. 15).

Un convertitore di tipo MIPEC si dimostra vantaggioso in termini di gestione ottima dei flussi di potenza tra i diversi dispositivi predisposti per l'accumulo di energia, consentendo di attuare strategie di "peak shaving" finalizzate ad eliminare nell'accumulo elettrochimico i rapidi transitori di corrente determinati dalla dinamica del veicolo. Tali benefici si manifestano soprattutto in occasione delle fasi di accelerazione e di decelerazione, durante le quali risulta utile demandare al banco di supercondensatori l'onere di provvedere all'erogazione (o all'assorbimento) dei picchi di potenza elettrica derivanti dal funzionamento dell'azionamento di trazione.

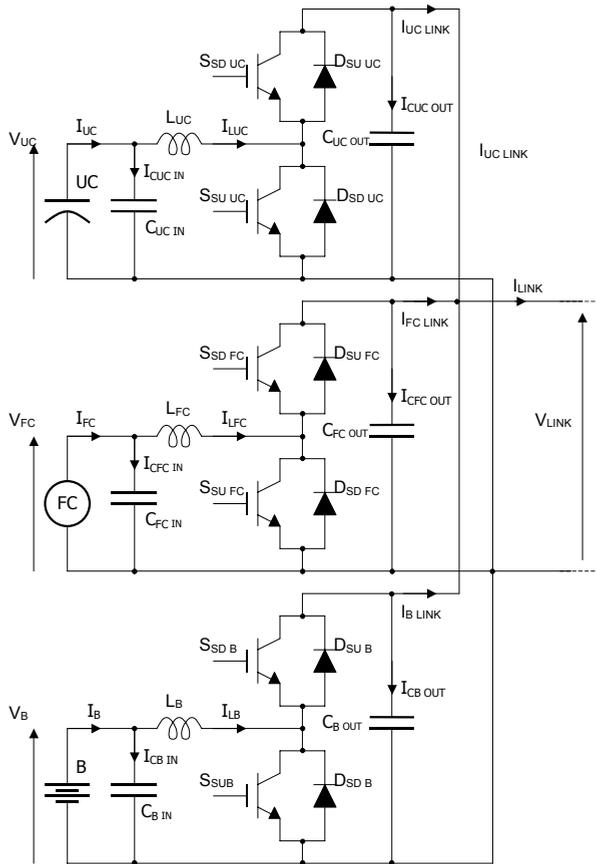


Fig. 7.12 - Configurazione di un convertitore DC/DC a ingressi multipli e singola uscita (MIPEC)

7.4 Analisi del funzionamento dei convertitori statici

Sui metodi per l'analisi dei convertitori statici di potenza è disponibile una ampia e consolidata letteratura internazionale, cui si rimanda per i necessari approfondimenti. Nel seguito sono brevemente descritti alcuni modelli che possono essere utilizzati per l'analisi del funzionamento a regime permanente e in regime dinamico dei convertitori statici di potenza.

7.4.1 Modellazione del circuito di potenza dei convertitori statici

La modellazione dei convertitori elettronici di potenza assume importanza fondamentale nello studio dei sistemi elettrici ed elettronici utilizzati nel campo della trazione. La presenza di componenti switching con frequenze di lavoro dell'ordine delle decine di kHz comporta l'esigenza di individuare modelli medi per gli apparati di conversione che possano rappresentarne fedelmente

il comportamento, in particolare per quanto riguarda la determinazione delle perdite di potenza e il comportamento sia dinamico che a regime permanente delle grandezze elettriche in ingresso e in uscita dal convertitore, senza richiedere capacità e tempi di calcolo non compatibili con le risorse hardware e software comunemente disponibili per tali attività.

A tal fine viene individuato il modello medio di uno switch [6] da impiegare nella modellazione e nella simulazione delle diverse configurazioni di convertitori elettronici di potenza.

È conveniente a tal fine fare riferimento alla classica configurazione di un “ramo”, comprendente due switch in serie e due diodi in antiparallelo; infatti, come visto in precedenza, tale configurazione di base permette la realizzazione sia di apparati di conversione DC/AC sia di convertitori DC/DC bidirezionali.

Nell’ambito dei sistemi di propulsione di veicoli elettrici ed ibridi la configurazione del convertitore elettronico di potenza di tipo Boost è quella più impiegata in quanto ben si presta ad adattare i bassi livelli di tensione ai quali operano i sistemi di accumulo, generalmente formati da accumulatori elettrochimici e/o da supercondensatori, a quelli più elevati richiesti dagli azionamenti elettrici di trazione. Per tale motivo, ma anche per ragioni di semplicità nella trattazione, appare utile ottenere il modello medio di uno switch a partire dalla configurazione propria del convertitore Boost unidirezionale mostrata nella Fig. 7.13, nella quale lo switch ed il diodo cui il modello si riferisce sono evidenziati da un rettangolo tratteggiato. Con riferimento alla configurazione di “ramo” propria di un convertitore Boost bidirezionale, il modello medio di switch sarà pertanto rappresentativo dello switch inferiore e del diodo superiore, così come per lo switch superiore ed il diodo inferiore della stessa configurazione sarà possibile sviluppare in maniera del tutto analoga una rappresentazione in termini di switch medio.

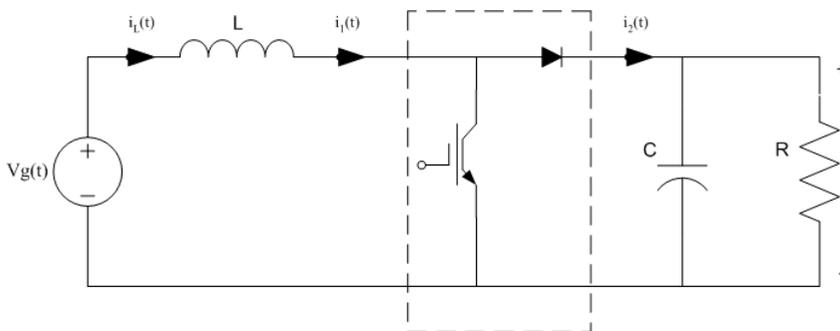


Fig. 7.13 - Schema circuitale di un convertitore Boost unidirezionale

Nel circuito di riferimento di cui alla Fig. 7.13 è possibile isolare i dispositivi a semiconduttore dal resto del circuito, come mostrato nella rappresentazione circuitale di Fig. 7.14; questo approccio può essere applicato a qualsiasi altra configurazione di convertitore elettronico di potenza, la cui analisi, in termini di “stato medio di funzionamento”, può quindi essere condotta sulla base di quanto di seguito esposto. La rappresentazione in termini di “stato medio di funzionamento” del gruppo switch-diodo mostrato nella Fig. 7.14 è ottenuta sulla base delle equazioni che regolano lo switch e il diodo durante lo stato di conduzione e di interdizione.

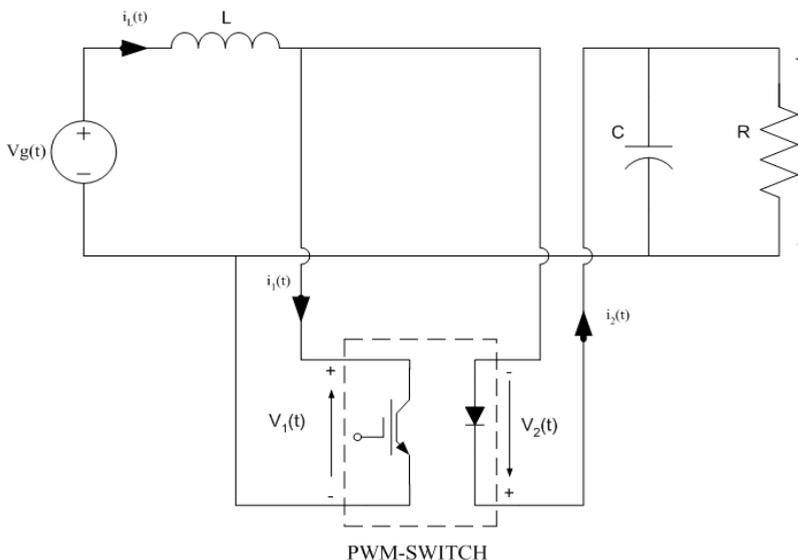


Fig. 7.14 - Convertitore Boost con PWM-switch evidenziato

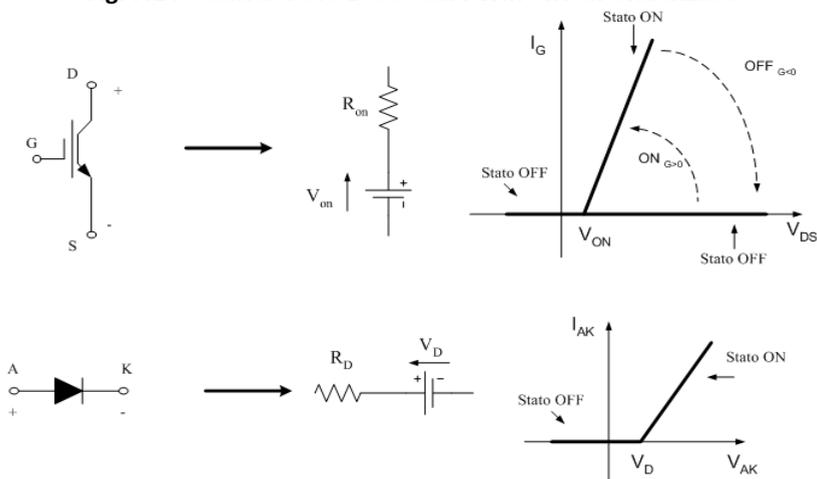


Fig. 7.15 - Stati di conduzione di switch e diodo e loro caratteristiche

Indicando con T_s il periodo corrispondente alla frequenza di switching e con d il duty cycle dello switch, nell'intervallo di tempo corrispondente allo stato di conduzione ($T_{on}=d \cdot T_s$) la caduta di tensione ai terminali dello switch è dovuta alla resistenza che lo stesso switch offre al passaggio della corrente e alla tensione minima necessaria ad attivarlo. Lo stesso comportamento si riscontra sul diodo, e quindi durante lo stato di conduzione entrambi i componenti sono rappresentabili tramite una resistenza ed un generatore di tensione, come mostrato in Fig. 7.15.

Per arrivare alle equazioni necessarie a definire il modello medio dello switch è necessario ricavare i grafici relativi alle grandezze in ingresso ed in uscita dal gruppo switch-diodo: $V_1(t)$, $V_2(t)$, $i_1(t)$ e $i_2(t)$.

Come mostrato nelle Figure 7.16 e 7.17, alla generica grandezza elettrica $x(t)$ relativa al funzionamento dello switch o del diodo è associato un valore mediato

$$\langle x(t) \rangle_{T_s} = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} x(t) dt$$

calcolato con riferimento al periodo di commutazione T_s .

Per le correnti si ottiene

$$\langle i_1 \rangle_{T_s} = d \cdot \langle i \rangle_{T_s} \quad (1)$$

$$\langle i_2 \rangle_{T_s} = (1-d) \cdot \langle i \rangle_{T_s} \quad (2)$$

Dalla (1) si ricava la corrente mediata che attraversa lo switch ed il diodo

$$\langle i \rangle_{T_s} = \frac{\langle i_1 \rangle_{T_s}}{d} \quad (3)$$

La (3) sostituita nella (2) fornisce il seguente risultato:

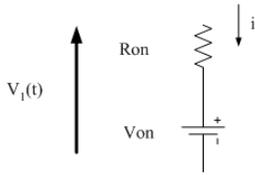
$$\langle i_2 \rangle_{T_s} = \frac{(1-d)}{d} \cdot \langle i_1 \rangle_{T_s} \quad (4)$$

Per la tensione $V_1(t)$, invece, si ha

$$\langle V_1 \rangle_{T_s} = (R_{on} \cdot \langle i \rangle_{T_s} + V_{on}) \cdot d + (1-d) \cdot (\langle V \rangle_{T_s} + V_D + R_D \cdot \langle i \rangle_{T_s}) \quad (5)$$

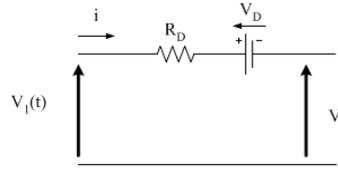
$$\langle V_1 \rangle_{T_s} + \langle V_2 \rangle_{T_s} = \langle V \rangle_{T_s} \quad (6)$$

IGBT IN CONDUZIONE



$$V_1(t) = R_{on} i + V_{on}$$

IGBT IN INTERDIZIONE



$$V_1(t) - R_D i - V_D - V = 0$$

$$V_1(t) = R_D i + V_D + V$$

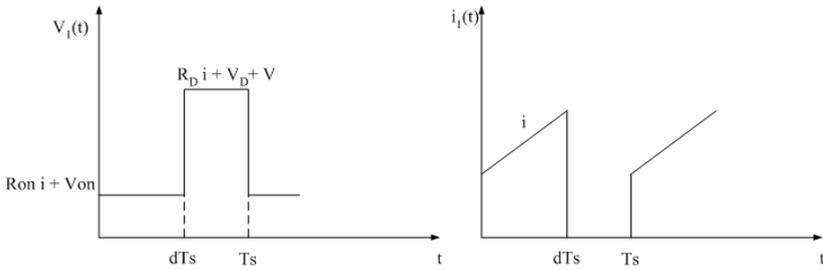
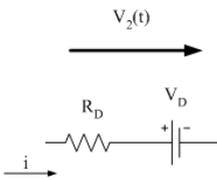


Fig. 7.16 - Tensione e Corrente di switch

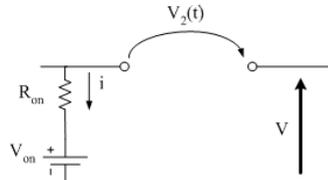
DIODO IN CONDUZIONE



$$R_D i + V_D = \Delta V_{\text{sul diodo}} = -V_2(t)$$

$$V_2(t) = -R_D i - V_D$$

DIODO IN INTERDIZIONE



$$V_2(t) - V + V_{on} + R_{on} i = 0$$

$$V_2(t) = V - R_{on} i - V_{on}$$

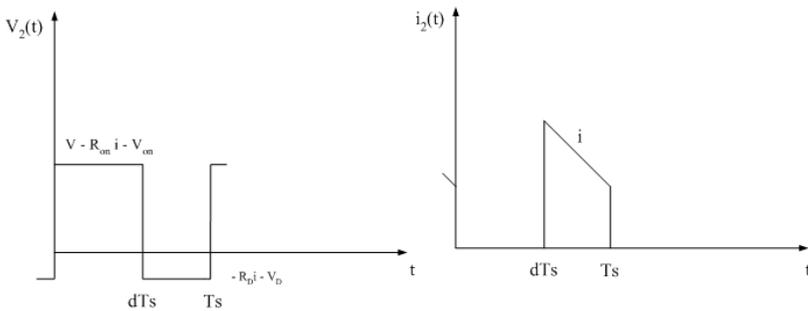


Fig. 7.17 - Tensione e corrente di diodo

Sostituendo $\langle V \rangle_{T_s}$ e $\langle i \rangle_{T_s}$ nella (5), si ottiene la seguente espressione

$$\langle V_1 \rangle_{T_s} = (Ron \cdot \frac{\langle i_1 \rangle_{T_s}}{d} + Von) \cdot d + (1-d) \cdot (\langle V_1 \rangle_{T_s} + \langle V_2 \rangle_{T_s} + V_D + R_D \cdot \frac{\langle i_1 \rangle_{T_s}}{d}) \quad (7)$$

Dalla (7), con semplici passaggi, si ricava l'espressione della caduta di tensione media $V_1(t)$

$$\langle V_1 \rangle_{T_s} = \left(Ron \cdot \frac{\langle i_1 \rangle_{T_s}}{d} \right) + Von + \frac{(1-d)}{d} \cdot (\langle V_2 \rangle_{T_s} + V_D) + \left(\frac{1-d}{d} \right) \cdot R_D \cdot \langle i_1 \rangle_{T_s} \quad (8)$$

Utilizzando le espressioni (4) e (8) è possibile rappresentare il gruppo switch-diodo con la combinazione di un generatore di tensione e di un generatore di corrente come mostrato in Fig. 7.18.

Aggiungendo la consueta rappresentazione circuitale degli altri componenti presenti nella configurazione di un convertitore Boost (i.e. l'induttore d'ingresso ed il condensatore di uscita), si ottiene lo schema circuitale mostrato in Fig. 7.19 che rappresenta il modello di un convertitore Boost implementato con lo switch medio; al generatore di tensione viene imposta una tensione V pari a $\langle V_1 \rangle_{T_s}$, mentre al generatore di corrente viene imposta una corrente i di valore $\langle i_2 \rangle_{T_s}$. Tale modello, con l'aggiunta dello stadio di controllo che fornisce il duty cycle d , permette la verifica del funzionamento del convertitore sia a regime permanente che in regime transitorio.

L'approccio modellistico sopra esposto può evidentemente essere esteso a qualsiasi altra configurazione di convertitore elettronico di potenza, sia di tipo DC/AC sia di tipo DC/DC, utilizzando il modello medio di switch per la rappresentazione di ciascun gruppo switch-diodo.

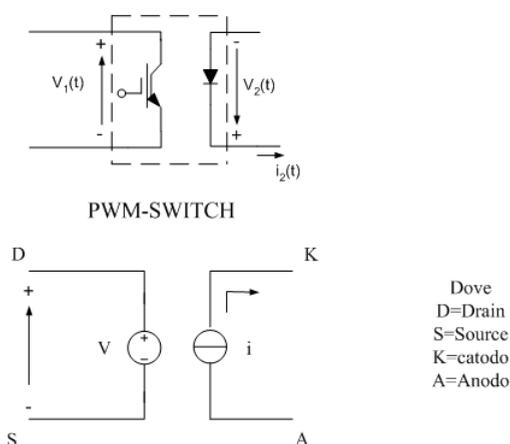


Fig. 7.18 - Modello del gruppo switch-diodo

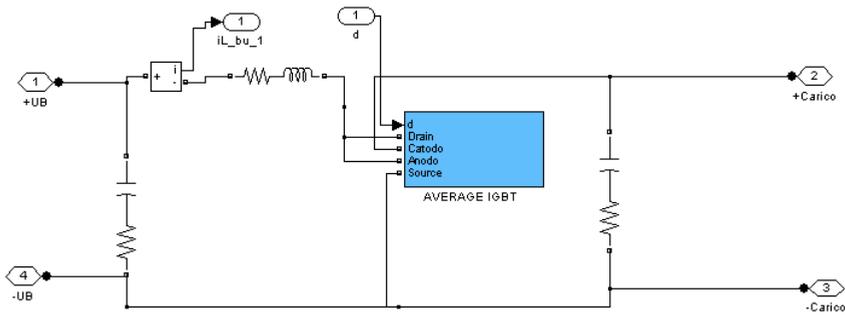


Fig. 7.19 - Modello di un convertitore Boost con modello medio del gruppo switch-diodo

7.4.2 Modellazione dei circuiti di regolazione e di controllo dei convertitori statici

Nei sistemi elettrici di propulsione è comune che diversi apparati elettronici di conversione interagiscano fra loro come nel caso di sistemi di generazione e accumulo combinati e/o veicoli con più di un azionamento elettrico di trazione. Diventa quindi di fondamentale importanza l'identificazione dei parametri di controllo dei convertitori di potenza in modo da assicurarne il corretto funzionamento nelle regioni di stabilità per qualsiasi condizione di esercizio del veicolo.

Le tradizionali e più comunemente impiegate leggi di controllo sono di tipo lineare; i convertitori elettronici di potenza a commutazione sono invece sistemi non lineari tempo-varianti in quanto la presenza degli switch dà luogo, a seconda dello stato in cui essi si trovano (ON-OFF), a due circuiti distinti. Per poter far uso della teoria del controllo lineare è necessario ricavare la funzione di trasferimento del sistema e quindi modellizzare appropriatamente gli apparati elettronici di conversione. Il metodo matematico utilizzato per la modellizzazione ai fini dei sistemi di regolazione ha come obiettivo proprio la ricerca di un'espressione analitica che contenga le informazioni sul comportamento statico e/o dinamico del sistema di conversione; tali informazioni sono poi utilizzate per progettare e sintonizzare l'anello di controllo e studiare il sistema tramite i fondamenti dell'analisi lineare.

L'analisi è possibile grazie al metodo introdotto da R.D. Middelrook e S. Cuk nel 1976 e noto come *State Space Averaging* (SSA) [7], i cui principi di funzionamento sono sintetizzati nell'Appendice 1. Nell'Appendice 2 è fornito un esempio di applicazione del metodo SSA ad un convertitore di tipo Boost.

Una volta individuate le possibili configurazioni del sistema elettronico di conversione, si determina il set di equazioni che descrive le caratteristiche dello stesso per ognuna delle specificate configurazioni.

Con lo SSA si trascurano i transitori e le discontinuità associati alla commutazione, ottenendo un set di equazioni di stato che descrivono il comportamento, mediato, delle grandezze proprie del convertitore. Tali equazioni, però, sono non lineari con coefficienti dipendenti dalle variabili di stato (i.e. duty cycle, tensione di ingresso ecc.); tuttavia, una volta linearizzate la tensione di ingresso e la corrente di carico nell'intorno di un dato punto di lavoro determinato da un preciso valore di duty cycle, le equazioni forniscono una descrizione del sistema nello spazio di stato lineare; come processo di linearizzazione viene solitamente utilizzato il metodo delle equazioni perturbate.

Appendice 1 - Il metodo dello State Space Averaging

Un generico sistema può essere rappresentato nello spazio di stato come

$$\dot{x} = Ax + BU_i \quad \text{(stato)} \quad (9)$$

$$y = Cx + G\dot{x} + EU_i \quad \text{(uscita)} \quad (10)$$

dove:

- x vettore di stato
- y vettore d'uscita
- U_i vettore d'ingresso
- A matrice dinamica del sistema
- B matrice di forzamento (dovuto agli ingressi)
- C matrice che determina il legame tra l'uscita e le variabili di stato
- G matrice che determina il legame tra l'uscita e le derivate delle variabili di stato
- E matrice che determina l'eventuale legame diretto ingresso-uscita

Nel vettore d'uscita y possono trovarsi, a seconda dei casi, le grandezze che necessitano di essere controllate, alcune di esse sono:

- v_o tensioni di uscita
- i_L correnti sugli induttori
- i_p correnti in ingresso
- i_d correnti sui diodi

Un convertitore in Modalità di Conduzione Continua (CCM) e con un singolo switch, quale ad esempio un convertitore Boost o un convertitore Buck, ha due soli stati distinti: uno quando lo switch è in conduzione "STATO 1" ed uno quando è in interdizione "STATO 2". È possibile perciò esemplificare la rappresentazione nello spazio di stato ai soli due stati possibili e distinti; avendo indicato il duty cycle con d si ottiene

STATO 1, per $t = dT$

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_1 x + B_1 U_i \\ y &= C_1 x + G_1 \dot{x} + E_1 U_i\end{aligned}\quad (11)$$

STATO 2, per $t = (1-d)T$

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_2 x + B_2 U_i \\ y &= C_2 x + G_2 \dot{x} + E_2 U_i\end{aligned}\quad (12)$$

Lo stato e l'uscita complessivi sono pari alla media pesata dei due stati così individuati.

$$\dot{x} = [A_1 d + A_2 (1-d)] \cdot x + [B_1 d + B_2 (1-d)] \cdot U_i \quad (13)$$

$$y = [C_1 d + C_2 (1-d)] \cdot x + [G_1 d + G_2 (1-d)] \cdot \dot{x} + [E_1 d + E_2 (1-d)] \cdot U_i \quad (14)$$

Perturbando le due equazioni mediate rispetto al duty-cycle, al vettore d'uscita ed al vettore di stato, si ottiene la linearizzazione del convertitore elettronico di potenza intorno ad un assegnato punto di lavoro. In maiuscolo ci si riferisce al valore medio di una variabile (Componente Continua - CC), in corsivo minuscolo invece si indica la componente variabile relativa alla perturbazione (Componente Alternata - CA), mentre con la variabile minuscola si indica la somma dei due contributi precedenti:

$$\begin{aligned}x &= X + x && \text{Componente CC + CA} \\ y &= Y + y && \text{Componente CC + CA} \\ d &= D + d && \text{Componente CC + CA}\end{aligned}$$

Il vettore di ingresso U_i non viene perturbato in quanto la FdT (Funzione di Trasferimento) relativa al controllo dei convertitori elettronici di potenza è normalmente ottenuta rispetto alle grandezze di uscita.

Svolgendo i calcoli e considerando che $\dot{X} = 0$ e che vengono trascurati tutti i termini del secondo ordine, prodotto di due perturbazioni, si ottiene

$$\dot{x} = \underbrace{AX + BU_i}_{C.C.} + \underbrace{Ax + [(A_1 - A_2) \cdot X + (B_1 - B_2) U_i]}_{C.A.} \cdot d \quad (15)$$

dove:

$$A = A_1 D + A_2 (1 - D) \quad (16)$$

$$B = B_1 D + B_2 (1 - D) \quad (17)$$

Per cui il comportamento a regime permanente della componente in C.C. dalla (15) è dato da

$$X = -A^{-1} B U_i \quad (18)$$

Per la (14) analogamente a quanto fatto per la (13) si ha

$$Y + y = \underbrace{C \cdot (X + x) + E \cdot U_i}_{C.C} + \underbrace{[(C_1 - C_2) \cdot X] \cdot d + G \cdot \dot{x} + [(E_1 - E_2) \cdot U_i] \cdot d}_{C.A} \quad (19)$$

dove:

$$C = C_1 D + C_2 (1 - D)$$

$$G = G_1 D + G_2 (1 - D)$$

$$E = E_1 D + E_2 (1 - D)$$

Applicando la trasformata di Laplace per le componenti C.A. dei vettori di stato (15) e di uscita (19) si ottiene:

$$x(s) = [sI - A]^{-1} [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U_i] \cdot d(s) \quad (20)$$

$$y(s) = C \cdot x(s) + [(C_1 - C_2)x] \cdot d(s) + G \cdot \dot{x}(s) + [(E_1 - E_2)U_i] \cdot d(s) \quad (21)$$

Legando le due equazioni appena scritte con la C.A. della (15) si possono ottenere le FdT del vettore di uscita rispetto al duty cycle $\frac{y(s)}{d(s)}$.

Appendice 2 - Applicazione dello SSA ad un Convertitore di tipo Boost

In accordo con quanto esposto con riferimento alla determinazione del modello medio del gruppo switch-diodo, anche per l'applicazione dello SSA si propone la modellizzazione di un convertitore Boost, il quale presenta i due diversi circuiti mostrati in Fig. 7.20 a seconda dello stato dello switch (ON/OFF), e i quali sono contraddistinti dalle seguenti diciture

STATO 1 - switch chiuso e diodo interdetto;

STATO 2 - switch aperto e diodo in conduzione.

Il carico del convertitore è rappresentato tramite un generatore di corrente che simula la richiesta di corrente dell'azionamento elettrico di trazione. Inoltre, sia il diodo D sia lo switch S nel caso di conduzione, sono modellizzati mediante la caduta di tensione che si presenta sui componenti dovuta alla resistenza che gli stessi offrono al passaggio di corrente (R_s e R_d) e mediante la tensione minima di attivazione degli stessi (V_s e V_d).

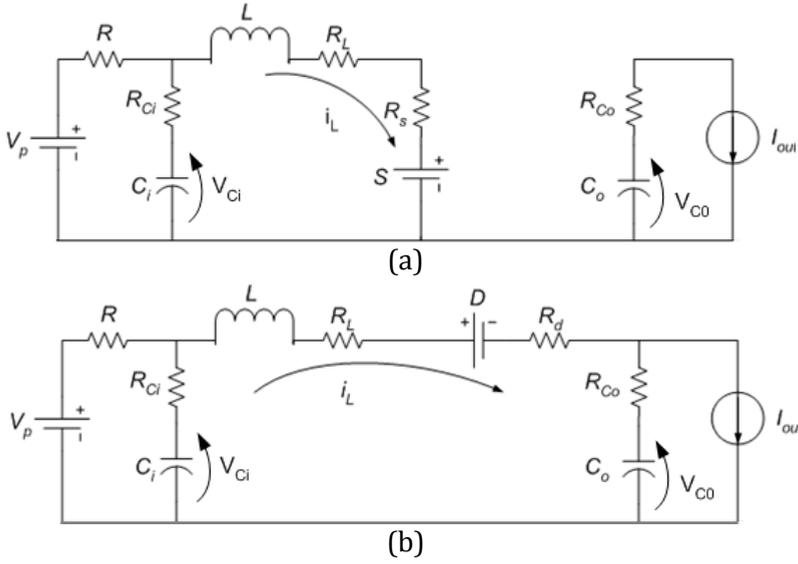


Fig. 7.20 - a) Boost in STATO 1, b) Boost in STATO 2

Ricordando che:

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{1}{C} i_c(t)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{1}{L} v_L(t)$$

È possibile esprimere le relazioni relative alle variabili di stato per lo **STATO 1**

$$\begin{cases} \dot{v}_{C_o} = -\frac{1}{C_o} (I_{OUT}) \\ \dot{v}_{C_i} = \frac{1}{C_i} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{C_i}}{R}} \left(\frac{V_p - v_{C_i}}{R} - i_L \right) \\ \dot{i}_L = \frac{1}{L} [V_{C_i} - V_S - i_L (R_L + R_S) + R_{C_i} \dot{v}_{C_i} C_i] \end{cases} \quad (22)$$

Tenendo presente le espressioni del vettore di stato e del vettore di ingresso

$$x = \begin{bmatrix} v_{C_o} \\ v_{C_i} \\ i_L \end{bmatrix}; \quad U_i = \begin{bmatrix} I_{out} \\ V_p \\ V_S \\ V_d \end{bmatrix}$$

si ottengono le espressioni delle matrici dello SSA

$$A_1 = \begin{bmatrix} \dot{v}_o(v_o) & \dot{v}_o(v_i) & \dot{v}_o(i_L) \\ \dot{v}_i(v_o) & \dot{v}_i(v_i) & \dot{v}_i(i_L) \\ \dot{i}_L(v_o) & \dot{i}_L(v_i) & \dot{i}_L(i_L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_i(R_{Ci}+R)} & -\frac{R}{C_i(R_{Ci}+R)} \\ 0 & \frac{R}{L(R_{Ci}+R)} & -\frac{R_L R + R_L R_{Ci} + R_{Ci} R + R_s R + R_s R_{Ci}}{L(R_{Ci}+R)} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \dot{v}_o(I_{out}) & \dot{v}_o(V_p) & \dot{v}_o(V_s) & \dot{v}_o(V_d) \\ \dot{v}_i(I_{out}) & \dot{v}_i(V_p) & \dot{v}_i(V_s) & \dot{v}_i(V_d) \\ \dot{i}_L(I_{out}) & \dot{i}_L(V_p) & \dot{i}_L(V_s) & \dot{i}_L(V_d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_o} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i(R+R_{Ci})} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_{Ci}}{L(R+R_{Ci})} & -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = [y(v_o) \quad y(v_i) \quad y(i_L)] = [0 \quad 0 \quad 1]$$

$$G_1 = [i_L(\dot{v}_o) \quad i_L(\dot{v}_i) \quad i_L(\dot{i}_L)] = [0 \quad 0 \quad 0]$$

$$E_1 = [i_L(I_o) \quad i_L(V_p) \quad i_L(V_s) \quad i_L(V_d)] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

Per lo **STATO 2** si ha invece:

$$\begin{cases} \dot{v}_{Co} = \frac{1}{C_o}(i_L - I_{OUT}) \\ \dot{v}_{Ci} = \frac{1}{C_i} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{Ci}}{R}} \left(\frac{V_p - v_{Ci}}{R} - i_L \right) \\ \dot{i}_L = \frac{1}{L} [v_{Ci} - V_d - v_{Co} - i_L(R_L + R_d) + R_{Ci}C_i\dot{v}_{Ci} - R_{Co}C_o\dot{v}_{Co}] \end{cases} \quad (23)$$

Le matrici ottenute sono quindi

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{C_o} \\ 0 & -\frac{1}{C_i(R+R_{in})} & -\frac{C_i(R+R_{in})}{R} \\ -\frac{1}{L} & \frac{R}{L(R+R_{in})} & -\frac{R_L R + R_L R_{Ci} + R_{Ci} R + R_d R + R_d R_{Ci} + R R_{Co} + R_{Co} R_{Ci}}{L(R_{Ci} + R)} \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_o} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i(R+R_{Ci})} & 0 & 0 \\ \frac{R_{Co}}{L} & \frac{R_{Ci}}{L(R+R_{Ci})} & 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

$$C_2 = C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$G_2 = G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_2 = E_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Utilizzando le equazioni (20) e (21) si ottengono quindi le desiderate funzioni di trasferimento necessarie alla determinazione dei regolatori del convertitore elettronico di potenza. Come illustrato in Fig. 7.21, a titolo di esempio, gli anelli di controllo sono normalmente due: un anello interno responsabile della regolazione di corrente, un anello esterno responsabile della regolazione di tensione. Lo schema del controllo in retroazione di Fig. 7.21 è comunemente usato nelle applicazioni industriali del controllo automatico. L'obiettivo dello schema di controllo è quello di forzare la variabile controllata V_o (l'uscita di un certo sistema da controllare) a seguire il più fedelmente possibile una variabile di riferimento V_{ref} definita dal generatore di riferimento FdTcVloop.

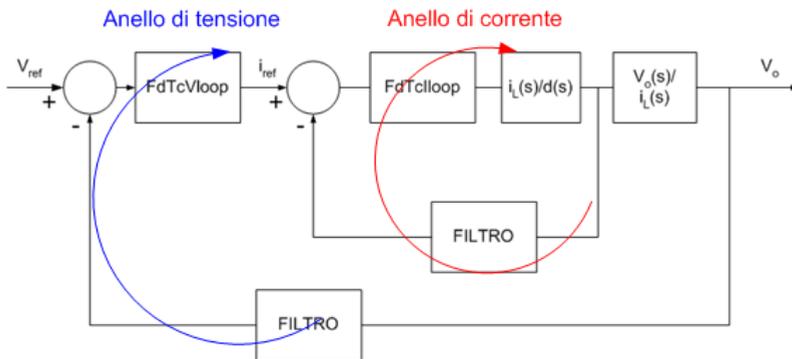


Fig. 7.21 - Esempio di anelli di regolazione per un convertitore elettronico di potenza

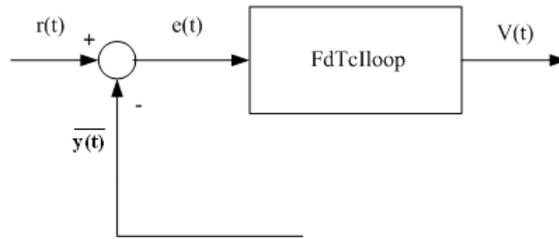


Fig. 7.22 - Particolare dell'anello di controllo di corrente

Nelle applicazioni automobilistiche sono spesso usati controllori con una struttura fissa costituita da un termine proporzionale (P) e da un termine integrale (I). Tali controllori, detti regolatori standard o PI, sono particolarmente apprezzati per la loro semplicità ed efficacia.

Dimensionando opportunamente i coefficienti della rete PI è possibile ottenere una buona risposta al transitorio (buona banda passante), sovraelongazioni ridotte ed un errore a regime permanente nullo dopo un accettabile periodo di tempo.

Per individuare l'espressione della rete correttiva è possibile fare riferimento alla Fig. 7.22, la quale mostra un particolare dell'anello di controllo della corrente mostrato in Fig. 7.21.

Il blocco FdTcloop non è altro che il controllore dell'anello di corrente, mentre

- $r(t)$ è il valore della variabile di riferimento che l'anello deve seguire e il segnale è prodotto dal controllore dell'anello di tensione che in Fig. 7.9 è indicato con FdTcVloop;
- $\overline{y(t)}$ è il valore della grandezza misurata che viene inviato al nodo sommatore, questo è stato ricavato attraverso il filtro/trasduttore che in Fig. 7.9 è indicato col nome Filtro;
- $e(t)$ è l'errore prodotto dal confronto tra $r(t)$ e $\overline{y(t)}$;
- $v(t)$ è il segnale di controllo generato dal controllore con l'obiettivo di ridurre l'errore $e(t)$.

L'espressione risultante della rete correttiva PI è la seguente

$$v(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) \cdot dt = K_p \left(e(t) + \frac{K_i}{K_p} \int e(t) \cdot dt \right) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) \cdot dt \right) \quad (24)$$

dove

- T_i è il periodo dell'azione integrale $\left(\frac{K_p}{K_i}\right)$;
- K_i e K_p sono rispettivamente il guadagno dell'azione integrale e il guadagno dell'azione proporzionale.

Tramite l'applicazione della trasformata di Laplace, la funzione di trasferimento del controllore PI risulta

$$\frac{v(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left(1 + \frac{K_i}{K_p \cdot s} \right) = C_{PI}(s) \quad (25)$$

Il rapporto $\frac{v(s)}{e(s)}$ rappresenta proprio la FdT del controllore dell'anello di corrente, tramite la teoria dei controlli automatici vengono opportunamente stabiliti i valori delle costanti K_p e K_i (o T_i) in modo da garantire il corretto funzionamento della rete di regolazione. La Fig. 7.23 mostra l'implementazione con il software Matlab-Simulink rispettivamente del regolatore di corrente e del regolatore di tensione comunemente impiegati per i convertitori elettronici di potenza utilizzati nelle applicazioni veicolistiche.

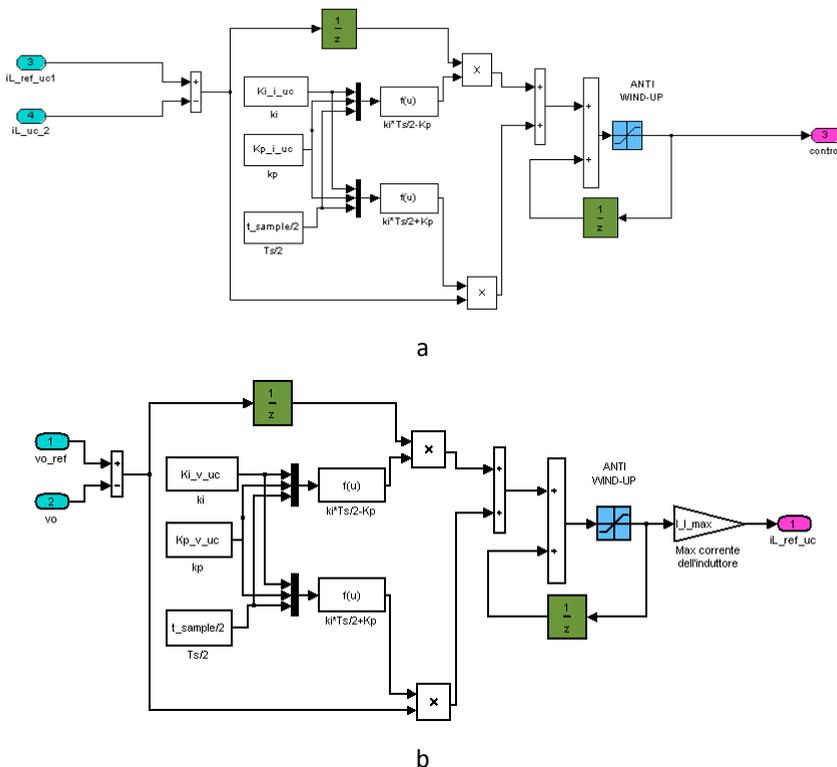


Fig. 7.23 - Esempio di implementazione di regolatori di corrente (a) e regolatori di tensione (b) per convertitori elettronici di potenza

7.5 Criteri di dimensionamento dei convertitori statici

Il progetto di un convertitore statico di potenza è un processo che richiede la determinazione delle massime sollecitazioni elettriche e termiche previste nei componenti attivi e passivi che compongono la configurazione circuitale prescelta. Anche su questo argomento, squisitamente di natura specialistica, è disponibile una vasta letteratura tecnica cui si rimanda per eventuali approfondimenti. Nel seguito sono brevemente evidenziati alcuni dei criteri di norma adottati nel processo di dimensionamento dei componenti attivi e passivi di un convertitore statico di potenza.

7.5.1 Scelta dei componenti a semiconduttore

I semiconduttori di potenza sono scelti sulla base della massima tensione e della massima corrente a cui sono sottoposti in fase rispettivamente di interdizione e di conduzione. Un sovradimensionamento in termini di tensione e di corrente viene usualmente adottato per evitare la rottura dei dispositivi nel corso dei transitori di commutazione. La corrente di dimensionamento è in generale scelta tenendo conto della sollecitazione termica di lavoro del dispositivo in condizioni di funzionamento continuativo.

7.5.2 Dimensionamento dei componenti passivi

Induttore

Nei convertitori elettronici di potenza l'induttore è dimensionato sulla base della specifica della massima ondulazione di corrente e la seguente espressione è impiegata per individuare il necessario valore di induttanza

$$\Delta I_{Lpp} = \frac{2 \cdot V_{dc}}{3 \cdot L \cdot f_s} \cdot (1 - M) \cdot M$$

dove ΔI_{Lpp} è il valore dell'ondulazione picco-picco della corrente.

Nel caso di conversione DC-DC viene impiegata la relazione

$$\Delta I_{Lpp} = \frac{d_{top} (1 - d_{top}) V_{dc}}{L \cdot f_s}$$

La potenza perduta per ogni induttore è pari a

$$P_L = P_{L-Cu} + P_{L-Fe}$$

dove con $P_{L-Cu} = R_L \cdot I_{Lrms}^2$ sono indicate le perdite nell'avvolgimento di resistenza R_L e con P_{L-Fe} le perdite nel nucleo dell'induttore.

Condensatore del DC bus

Nei convertitori elettronici di potenza il condensatore di link è dimensionato sulla base della specifica imposta per la massima ondulazione della tensione del dc-link. Nel caso di apparati di conversione AC-DC o DC-AC la seguente e-

spressione è utilizzata per individuare il valore della capacità richiesta

$$\Delta V_{pp} = \frac{\sqrt{3} \cdot (1-M) \cdot M \cdot I_{Lrms}}{\sqrt{2} \cdot f_s \cdot C}$$

dove ΔV_{pp} è il valore dell'ondulazione picco-picco della tensione di link, I_{Lrms} è il valore efficace della corrente alternata, f_s è la frequenza di commutazione, C è il valore della capacità cercata ed M è sempre l'indice di modulazione. Tuttavia, anche il valore dell'ondulazione efficace della corrente del condensatore di link deve essere secondo la relazione

$$I_{Crms} = I_{Lrms} \cdot \sqrt{M \left[\frac{1}{\pi} + \cos^2 \varphi \cdot \left(\frac{4}{\pi} - \frac{3}{2} \cdot M \right) \right]}$$

dove $\cos \varphi$ è sempre il fattore di potenza della prima armonica.

Nel caso di apparati di conversione per applicazioni DC-DC le seguenti espressioni permettono il dimensionamento del condensatore di link in termini di capacità e valore efficace dell'ondulazione di corrente

$$\Delta V_{pp} = \frac{(1-d_{top}) \cdot d_{top} \cdot I_{leg}}{f_s \cdot C}$$

$$I_{Crms} = \sqrt{d_{top} (1-d_{top}) \cdot I_{leg}^2 + \frac{V_{dc}^2 \cdot d_{top}^2}{12 \cdot L \cdot f_s} (-d_{top}^3 + 3d_{top}^2 - 3d_{top} + 1)}$$

con L induttanza di ingresso.

La potenza perduta nel condensatore di link è espressa come

$$P_C = R_C \cdot I_{Crms}^2$$

dove R_C è la resistenza serie equivalente del condensatore alla frequenza di commutazione.

7.6 Comportamento termico dei convertitori statici

Tenuto conto che l'impiego dei convertitori elettronici di potenza nei sistemi elettrici di propulsione impone requisiti stringenti in termini sia di compattezza e di peso, sia di condizioni sfavorevoli di installazione, è necessaria una accurata valutazione delle perdite di potenza allo scopo di scegliere per il sistema di raffreddamento le caratteristiche costruttive più idonee. Per una approfondita discussione delle metodologie utilizzate nella determinazione delle perdite di potenza in un convertitore elettronico di potenza si rimanda alla letteratura tecnica disponibile [8-17].

Il progetto di un convertitore elettronico di potenza è basato principalmente sulla determinazione delle perdite di potenza che interessano i dispositivi a semiconduttore, essendo tali perdite suddivise in perdite per conduzione e perdite per commutazione.

Le perdite per conduzione dipendono dall'intensità di corrente che attraversa i dispositivi e dalle caratteristiche elettriche dei dispositivi stessi, le perdite per commutazione sono funzione della frequenza di commutazione, della corrente e della tensione che interessano i dispositivi, e dalle caratteristiche dinamiche dei componenti in commutazione. Le correnti che attraversano switch e diodi dipendono significativamente dalla tecnica di modulazione impiegata, per individuare delle espressioni di validità generale si ipotizzano modalità di conduzione continua (CCM) in quanto le modalità di conduzione discontinua (DCM) comportano in generale una riduzione delle perdite per commutazione, a fronte comunque di significative penalizzazioni in termini di contenuto armonico e distorsione ad alta frequenza delle grandezze elettriche.

Le espressioni generali per la determinazione delle perdite di potenza possono essere determinate a partire dalle informazioni presenti sui data-sheet dei componenti; naturalmente modelli più accurati possono essere individuati tramite l'individuazione sperimentale dei parametri di interesse. Nel seguito le relazioni per il calcolo delle perdite negli switch e nei diodi sono analiticamente descritte con riferimento al caso di apparati di conversione DC/AC e sono successivamente ricondotte al caso particolare di conversione DC/DC.

7.6.1 Valutazione delle perdite di potenza nella conversione dell'energia

Perdite per conduzione

In caso di corrente alternata, la frequenza di commutazione è ipotizzata essere sufficientemente maggiore della frequenza della componente fondamentale; inoltre il valore medio e il valore efficace per le correnti di diodi e switch sono calcolati sulla base della forma d'onda di corrente. Le perdite per conduzione nei dispositivi a semiconduttore sono quindi determinate tramite la linearizzazione della caratteristica di conduzione dei dispositivi stessi secondo relazioni che legano la caduta di tensione di switch (V_{CE}) e diodo (V_F) con la corrente di conduzione I_C

$$V_{CE} = R_{on-s} \cdot I_C + V_{CE0}$$

$$R_{on-s} = \frac{V_{CEn} - V_{CE0}}{I_{Cn}}$$

$$V_F = R_{on-d} \cdot I_C + V_{F0}$$

$$R_{on-d} = \frac{V_{Fn} - V_{F0}}{I_{Cn}}$$

dove I_{Cn} è la corrente nominale del dispositivo, V_{CEn} e V_{Fn} sono le cadute di tensioni nominali rispettivamente di switch e diodo e V_{CE0} e V_{F0} sono le tensioni di attivazione sempre rispettivamente di switch e diodo.

Le perdite per conduzione associabili alla comune configurazione di ramo di inverter, formata dai due switch collegati in serie e dai due diodi in antiparallelo, sono espresse dalle relazioni

$$P_{on-s} = I_{av-s} \cdot V_{CE0} + R_{on-s} \cdot I_{rms-s}^2$$

$$P_{on-d} = I_{av-d} \cdot V_{F0} + R_{on-d} \cdot I_{rms-d}^2$$

dove I_{av} , I_{rms} e R_{on} sono il valore medio e il valore efficace della corrente e la resistenza in conduzione rispettivamente per switch (s) e diodi (d).

Le espressioni per il valore medio e per il valore efficace della corrente vengono individuate ipotizzando una funzione sinusoidale per la corrente e considerando la tensione sfasata in anticipo di un angolo generico φ .

La corrente alternata di fase, i valori di duty cycle rispettivamente dello switch superiore (top) e inferiore (bot) della configurazione a ramo sono espressi come

$$i_l = I_{lpk} \cdot \sin \theta$$

$$d_{top} = \frac{1}{2} \cdot [1 + M \sin(\theta + \varphi)]$$

$$d_{bot} = 1 - d_{top} = \frac{1}{2} \cdot [1 - M \sin(\theta + \varphi)]$$

dove M è l'indice di modulazione (rappresenta la tensione normalizzata ed è compreso fra 0 e 1) e θ è l'angolo di fase.

Il valore medio della corrente dello switch è calcolato integrando, su metà del periodo della componente alternata fondamentale, il prodotto fra corrente e duty cycle, dove la corrente dello switch è considerata costante lungo il periodo di modulazione (di tre ordini di grandezza inferiore rispetto al periodo della fondamentale).

La valutazione del valore medio della corrente è fatta lungo metà del periodo della componente alternata fondamentale in quanto ciascuno dei due switch e dei due diodi, facenti parte della configurazione base di ramo di inverter, si trova nello stato di conduzione solo per metà periodo della fondamentale; inoltre, dal punto di vista dello studio del regime termico, la costante di tempo termica dei dispositivi a semiconduttore è confrontabile con il periodo fondamentale delle grandezze elettriche.

Le espressioni del valore medio della corrente nello switch (I_{av-s}) e nel diodo (I_{av-d}) sono mostrate di seguito

$$I_{av-s} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_l \cdot d_{top} \cdot d\theta = \frac{1}{2\pi} I_{lpk} \int_0^{\pi} \left\{ \sin \theta [1 + M \sin(\theta + \varphi)] \right\} \cdot d\theta$$

$$I_{av-s} = I_{lpk} \left(\frac{1}{\pi} + \frac{M \cos \varphi}{4} \right)$$

$$I_{av-d} = I_{lpk} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{M \cos \varphi}{4} \right).$$

L'espressione per il valore efficace della corrente di switch (I_{rms-s}) e diodo (I_{rms-d}), di tipo impulsivo, è ottenuta elevando al quadrato l'ampiezza della forma d'onda e integrandola lungo i tratti di conduzione

$$I_{rms-s} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_l^2 \cdot d_{top} \cdot d\theta} = I_{lpk} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left\{ \sin^2 \theta [1 + M \sin(\theta + \varphi)] \right\} \cdot d\theta}$$

$$I_{rms-s} = I_{lpk} \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2 \cdot M \cos \varphi}{3\pi}}$$

$$I_{rms-d} = I_{lpk} \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{2 \cdot M \cos \varphi}{3\pi}}.$$

Le espressioni ottenute sono riferite allo switch superiore e al diodo inferiore della configurazione base, in maniera del tutto analoga possono essere ricavate le relazioni associate al valore medio e al valore efficace della corrente dello switch inferiore e del diodo superiore. L'analisi delle perdite e del regime termico per un convertitore viene condotta in funzione dell'angolo di sfasamento φ tra corrente e tensione lato alternata e dell'indice di modulazione M , in particolare assumendo il primo pari a zero e il secondo uguale a 1 si ottiene il massimo valore per la corrente negli switch e il minimo valore per la corrente nei diodi.

Utilizzando le espressioni riportate di seguito è possibile derivare le relazioni per il valore medio e il valore efficace della corrente dei switch e diodo nel caso particolare di apparati elettronici di conversione in corrente continua

$$d_{top} = V_{Source} / V_{link}$$

$$d_{bot} = 1 - d_{top} = 1 - V_{Source} / V_{link}$$

$$I_{av-s} = I_{leg} \cdot d_{top / bot}$$

$$I_{av-d} = I_{leg} \cdot d_{bot / top}$$

$$I_{RMS-s} = I_{leg} \cdot \sqrt{d_{top / bot}}$$

$$I_{RMS-d} = I_{leg} \cdot \sqrt{d_{bot / top}}$$

dove con I_{leg} si intende la corrente che fluisce attraverso i dispositivi a semiconduttore.

Perdite per commutazione

Le perdite per commutazione sono rappresentative delle non idealità nelle transizioni di accensione e di spegnimento di un dispositivo a semiconduttore; per le frequenze di modulazione comunemente utilizzate nei convertitori elettronici di potenza per applicazioni automobilistiche, le perdite per commutazione sono significative e devono essere considerate nello studio del regime termico dei dispositivi.

Il metodo più accurato per determinare le perdite per commutazione è tramite l'andamento della potenza istantanea ottenuto dal prodotto punto per punto di corrente e tensione dello switch durante le commutazioni, come mostrato in Fig. 7.24 in cui gli andamenti sono stati linearizzati. L'area sottesa dalla potenza istantanea rappresenta l'energia persa in Joule/commutazione.

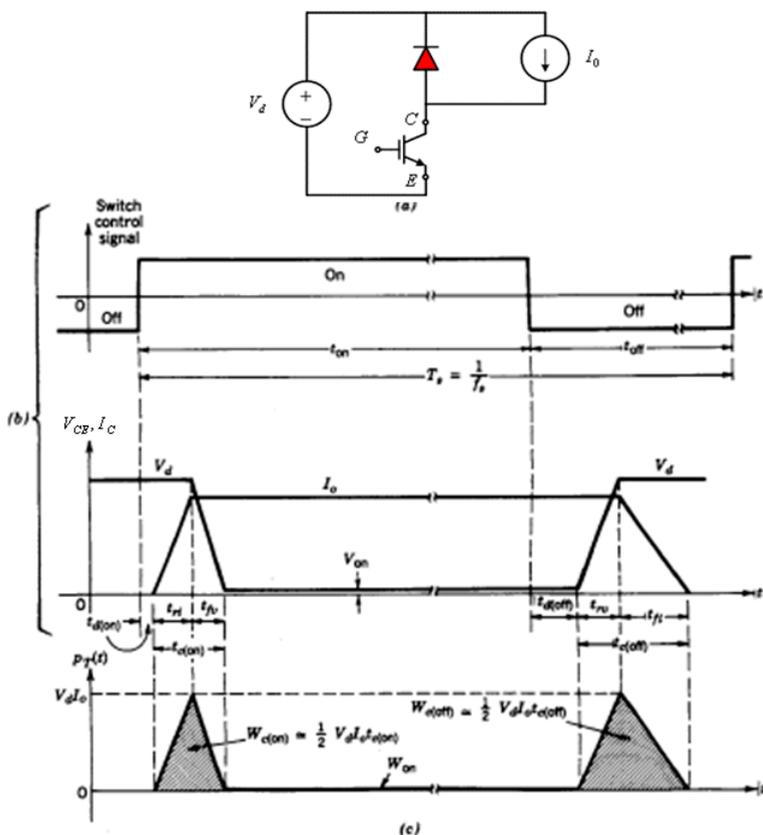


Fig. 7.24 - Caratteristiche di commutazione linearizzate di un IGBT: (a) circuito switching semplificato, (b) caratteristiche linearizzate dello switch, (c) andamento nel tempo delle perdite per commutazione [1]

Le perdite per commutazione si compongono di perdite in accensione e perdite in spegnimento di switch e diodo, dove le perdite in accensione dei diodi sono normalmente trascurabili.

Considerando costanti la frequenza di commutazione e la tensione V_{dc} ai capi della configurazione base fra il collettore dello switch superiore e l'emettitore dello switch inferiore, le espressioni di seguito mostrate possono essere utilizzate solo per ottenere una stima approssimata delle perdite per commutazione per switch (P_{sw-s}) e diodo (P_{rr}); le perdite reali sono infatti funzione anche della temperatura di giunzione, della frequenza fondamentale della componente alternata, dell'ondulazione di corrente alla frequenza di modulazione

$$P_{sw-s} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f_s \cdot \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_l \cdot d\theta = \frac{2}{\pi} (E_{on} + E_{off}) \cdot I_{lpk} \cdot f_s$$

$$P_{rr} = E_{rr} \cdot f_s \cdot \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_l \cdot d\theta = \frac{2}{\pi} \cdot E_{rr} \cdot I_{lpk} \cdot f_s$$

dove E_{on} e E_{off} sono rispettivamente l'energia per unità di corrente (alla tensione di lavoro V_{dc}) per commutazione in accensione e in spegnimento dello switch, mentre E_{rr} è l'energia per commutazione e per unità di corrente del diodo.

Nel caso in cui i produttori dei dispositivi a semiconduttore non dovessero fornire le necessarie informazioni sull'energia persa per commutazione e per unità di corrente, le seguenti espressioni possono essere utilizzate per il calcolo approssimato delle perdite per commutazione

$$P_{sw-s} = \frac{1}{\pi} \cdot V_{dc} \cdot I_{lpk} \cdot f_s (t_{c-on} + t_{c-off})$$

$$P_{rr} = \frac{1}{4} \cdot V_{dc} \cdot I_{rr} \cdot f_s \cdot t_{rr}$$

dove t_{c-on} e t_{c-off} sono rispettivamente il tempo di commutazione in accensione e in spegnimento dello switch, t_{rr} è il tempo di recupero inverso del diodo, e I_{rr} è la corrente di picco inversa del diodo. In ogni caso è consigliato l'impiego dei dati del produttore forniti per la temperatura di giunzione $T_j=125$ °C.

Nel caso di un convertitore elettronico di potenza di tipo DC/DC si ha

$$P_{sw-s} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f_s \cdot I_{leg}$$

$$P_{rr} = E_{rr} \cdot f_s \cdot I_{leg} \text{ or}$$

$$P_{sw-s} = \frac{1}{2} \cdot V_{dc} \cdot I_{leg} \cdot f_s (t_{c-on} + t_{c-off})$$

$$P_{rr} = \frac{1}{2} \cdot V_{dc} \cdot I_{rr} \cdot f_s \cdot t_{rr}$$

Di conseguenza la potenza perduta complessivamente per switch e per diodo risulta

$$P_s = P_{on-s} + P_{sw-s}$$

$$P_d = P_{on-d} + P_{rr}$$

7.6.2 Criteri di progettazione del sistema di raffreddamento

Sulla base dei valori della potenza perduta nei dispositivi a semiconduttore viene dimensionato il sistema di raffreddamento del convertitore.

Ad esempio, per la configurazione base del ramo di un inverter il circuito termico equivalente di Fig. 7.25 permette di individuare la resistenza termica R_{th-ha} massima ammissibile per il dissipatore, una volta definita la temperatura T_j (con notazione dei pedici: s – switch, d – diodo, t – top, b – bottom) di riferimento per la giunzione dei dispositivi, la temperatura T_a del refrigerante, e le resistenze termiche R_{th-jc} fra giunzione e case e R_{th-ch} fra case e dissipatore. In caso di conversione AC/DC o DC/AC il calcolo della resistenza termica del dissipatore è condotto considerando $P_{st}=P_s$, $P_{db}=P_d$ e $P_{sb}=P_{dt}=0$ per il primo semiperiodo della componente fondamentale della corrente alternata, mentre $P_{st}=P_{db}=0$ e $P_{sb}=P_s$, $P_{dt}=P_d$ in corrispondenza al secondo semiperiodo della corrente alternata.

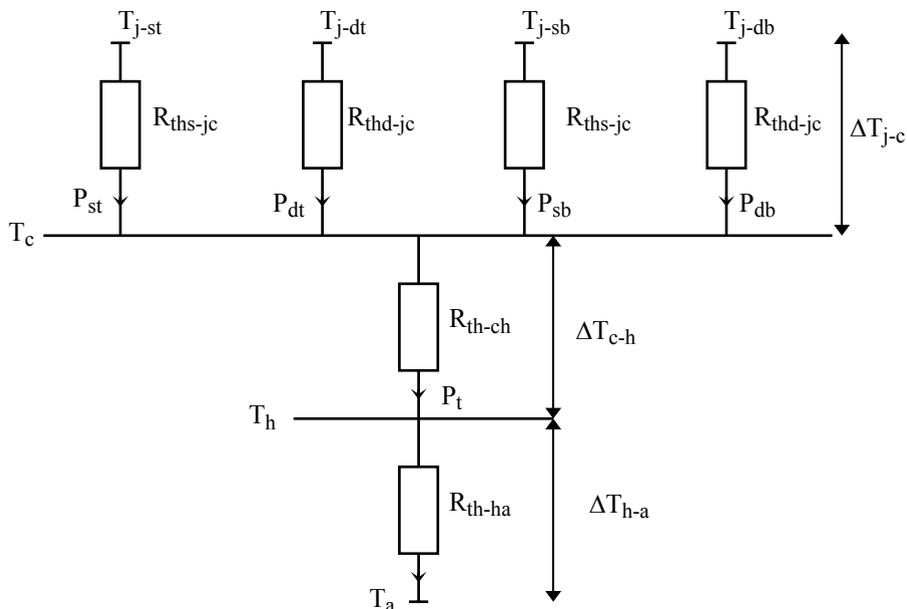


Fig. 7.25 - Circuito termico equivalente della configurazione base di ramo di inverter

7.7 L'impiego di Power Electronics Building Blocks (PEBB)

Negli ultimi venti anni, gli apparati di conversione elettronica di potenza si sono costantemente spinti verso frequenze di lavoro sempre più elevate, dando così luogo ad enormi progressi nelle prestazioni, ingombri, pesi e quindi costi. Tecniche di modulazione ad alta frequenza e di tipo PWM sono ormai uno standard in tutte le applicazioni di bassa e media potenza, mentre si stanno diffondendo rapidamente anche nelle applicazioni a potenza più elevata.

È comunque importante sottolineare che si stanno raggiungendo limiti strutturali che non potranno essere superati a meno di cambiamenti radicali nella progettazione adottata nell'ambito della conversione elettronica di potenza. L'incremento della frequenza di switching, possibile con le nuove tecnologie per i dispositivi a semiconduttore, impone una sostanziale riduzione delle capacità e induttanze parassite associate alla realizzazione dei componenti e degli apparati di conversione.

Uno dei maggiori ostacoli ad ulteriori progressi nelle tecnologie e nella riduzione dei costi è dovuto alla completa mancanza di standardizzazione, dato che ancora oggi l'industria dell'elettronica di potenza è più spesso preoccupata nel fornire soluzioni parziali per specifiche applicazioni. L'implementazione spinta nelle architetture degli apparati elettronici di potenza dei concetti di "modularità" e di "standardizzazione" permetterebbe di superare molti dei difetti comuni all'approccio tradizionale alla progettazione dei convertitori elettronici, quali i lunghi tempi della fase progettuale, gli enormi costi di sviluppo, i tempi significativi per la commercializzazione, i bassi volumi di produzione e la complessità nella manutenzione.

Il volume di produzione potrebbe essere incrementato nel momento in cui fossero a disposizione "elementi costruttivi di base", che potremmo definire universali, multi-funzionali e flessibili, da poter assemblare e riconfigurare facilmente per realizzare apparati elettronici di conversione della potenza utilizzabili in un ampio numero di differenti applicazioni. Di conseguenza si avrebbero anche riduzioni dei costi di produzione mediante economie di scala.

Il termine di "elemento costruttivo di base" (in anglosassone "Building Block") non si riferisce necessariamente ad un elemento fisico; può infatti essere riferito ad un modulo di potenza, oppure ad un codice modulare per DSP, oppure ad un intero algoritmo di controllo. La modularità nelle strutture costruttive dei convertitori elettronici di potenza non è sufficiente da sola e non fornisce significativi passi avanti nella tecnologia per l'elettronica di potenza se non è affiancata ad un processo di standardizzazione.

È facile prevedere che l'individuazione di comuni denominatori nelle strutture di differenti apparati elettronici di potenza e la standardizzazione di un "elemento costruttivo base" – o almeno la standardizzazione delle interfacce e della comunicazione fra i diversi sottosistemi – possa rivoluzionare la consueta fase di progettazione degli apparati elettronici di potenza, soprattutto in quei

settori applicativi, come il settore “automotive”, nel quale l’impiego di elementi modulari e standardizzati potrebbe determinare rilevanti benefici nella produzione su larga scala di convertitori elettronici di potenza.

7.7.1 Il concetto di PEBB

Nell’elettronica di potenza il concetto di progettazione tramite “elementi costruttivi base” è stato concepito nei primi anni ottanta sotto l’influenza del grande sviluppo nell’industria dei circuiti integrati. L’idea di realizzare differenti convertitori di potenza facendo uso di un numero di moduli integrati inferiore a quello dei componenti discreti è stata presa in considerazione da numerosi produttori di dispositivi a semiconduttore e sperimentata in alcuni laboratori di ricerca. Tuttavia, le attività iniziali sono state soprattutto dirette verso la semplificazione del “packaging” e non hanno portato ad un totale cambiamento dell’approccio alla progettazione, come invece ha fatto l’introduzione dei circuiti integrati nell’industria delle telecomunicazioni e dell’informatica.

Il più esaustivo concetto di Power Electronics Building Block (PEBB) è nato negli anni Novanta. Complessivamente, l’idea si riferisce all’impiego di PEBB intelligenti e riconfigurabili con standardizzazione degli aspetti legati alla potenza, alla gestione dei flussi termici, al controllo, per sviluppare molteplici apparati di conversione di potenza a costi contenuti, affidabili e ad alto rendimento. Sulla base delle istruzioni elaborate dal sistema di controllo dell’apparato di conversione, uno o più PEBB possono essere tra loro collegati in modo da realizzare diverse configurazioni di convertitore elettronico di potenza, come mostrato schematicamente nella Fig. 7.26.

L’obiettivo dello sviluppo di un PEBB è quello di creare un componente per la conversione di potenza in cui grande parte della progettazione, legata alla scelta di switch di potenza, induttori, condensatori ed altri componenti ausiliari, non dipenda dalla specifica configurazione circuitale dell’applicazione finale. In altre parole, il concetto di PEBB rimuove le problematiche di progettazione di base e fa sì che un convertitore di potenza possa essere visto come assemblaggio di elementi modulari e standardizzati.

Utilizzando moduli PEBB per assemblare molteplici diverse tipologie di apparati di conversione, si ottiene la riduzione degli sforzi in fase di progettazione come pure l’incremento della semplicità e dell’affidabilità del sistema; l’impiego di PEBB può anche essere di grande aiuto nella minimizzazione degli elementi parassiti sia nel packaging che nella configurazione realizzata, in quanto i componenti di potenza, i circuiti di controllo e le connessioni di tipo “bus-bar” sono integrati insieme per formare un unico componente di potenza. In aggiunta, i costi di manutenzione sono ridotti poiché i singoli moduli sono facilmente sostituibili e diminuisce numero di tipologie di componenti da avere in magazzino.

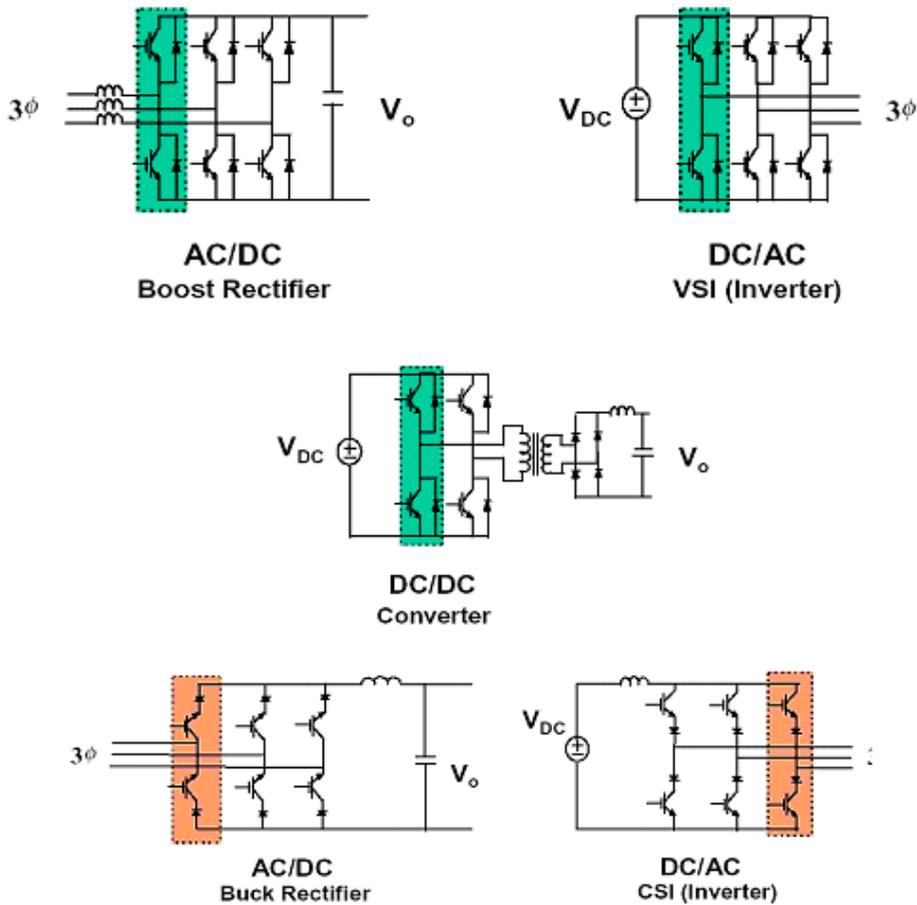


Fig. 7.26 – Schemi di diverse tipologie di convertitori di potenza che utilizzano un elemento PEBB (evidenziato nei riquadri in grigio). I primi tre sono PEBB per convertitori di tipo “voltage source”, i rimanenti due convertitori di tipo “current source”

Il PEBB deve risultare “intercambiabile” con un altro PEBB, ovvero due PEBB uguali devono essere in grado di assolvere a funzioni in generale differenti (ad esempio una conversione DC/DC ed una conversione DC/AC).

Questo in effetti è possibile grazie al fatto che la parte hardware necessaria a tutti i tipi di conversione è praticamente la stessa e quello che cambia è la modalità di controllo di tale hardware. Il PEBB deve essere quindi comandato da un’entità (fisicamente esterna o interna al PEBB è concettualmente indifferente) che conosca l’applicazione da realizzare e contenga al suo interno le informazioni necessarie a realizzarla.

È questa *entità* a comunicare al PEBB la modalità di accensione degli switch di potenza e quindi l'orientamento attuale è quello di realizzare PEBB "intelligenti", che accolgono al loro interno anche i driver di controllo dell'hardware, una sezione che si occupi della protezione degli elementi di potenza, una serie di sensori ecc., oltre ad una *interfaccia* che permetta la comunicazione bidirezionale tra il PEBB e l'*entità esterna* nella quale risiede la logica di controllo.

L'alimentazione di tutte queste sezioni è assicurata da un'ulteriore sezione, preposta allo scopo. In questo modo l'intero apparato di conversione viene suddiviso in due parti: una composta dallo stadio di potenza vero e proprio e da quanto ad esso serve per essere pilotato, ed un'altra nella quale risiede la strategia di controllo dell'applicazione. Ciò che spinge fortemente verso questa soluzione è che in questo modo si rende indipendente la strategia di controllo dalle potenze installate. Si prenda ad esempio un convertitore per un azionamento di un controllo di velocità. La strategia di controllo è praticamente la stessa sia per piccole che per grandi potenze (da pochi kW ai MW), quello che cambia è solo l'hardware.

È in questo senso che l'*entità* di cui prima può essere utilizzata indipendentemente dalla potenza impiegata: quella che dovrà essere cambiata è la sezione di elaborazione della potenza, ovvero il PEBB. Da un altro punto di vista, questo equivale a dire che lo stesso PEBB può essere utilizzato per diversi tipi di azionamenti, con l'unico vincolo di fargli elaborare al massimo la potenza per cui esso è stato costruito.

Un ultimo passo verso la standardizzazione è quello di dotare il PEBB di tecnologia "*Plug and Play*", tecnologia già sperimentata in ambito informatico con ottimi successi. In questo modo il PEBB comunica con altri sistemi a cui è eventualmente collegato, ed anche con i carichi che esso alimenta (i quali dovranno ovviamente essere dei carichi "intelligenti" o almeno in grado di fornire al convertitore le proprie "generalità elettriche"), per autoconfigurarsi in base alle esigenze, rilevate automaticamente: all'utente del PEBB non resterebbe da fare altro che collegarlo (o *collegarli* nel caso di più moduli) e decidere la strategia di controllo da utilizzare. Attualmente tale possibilità è in fase di studio e sperimentazione.

Non sono molte le case costruttrici che rendono disponibili PEBB per realizzare convertitori. Oltre a ciò, nei pochi esempi oggi disponibili, la configurazione ed il tipo di controllo del convertitore sono assegnati in fabbrica, senza possibilità di modifica una volta che il PEBB sia sul mercato. I prodotti presenti sul mercato basati su tecnologia PEBB sono ancora piuttosto simili, come caratteristiche e funzionalità, ai convertitori tradizionali. In sostanza la "modularità" introdotta dal PEBB resta all'interno della fabbrica, e l'utente finale non ne usufruisce se non in termini di velocità di consegna e costi del convertitore più contenuti. Il PEBB è quindi un prodotto ancora "giovane" e non sono molti gli utenti in grado di utilizzare le funzioni di un PEBB, anche a causa della mancanza di una standardizzazione finalizzata ad una ampia diffusione.

7.7.2 Un esempio di PEBB per il sistema starter/alternator di un autoveicolo

Un potenziale impiego del concetto di PEBB riguarda gli apparati di conversione alimentati a bassa tensione, quali quelli attualmente utilizzati in specifici azionamenti di trazione (e.g. azionamenti dei carrelli elevatori o delle carrozelle per disabili) o quelli che a breve potrebbero essere impiegati nelle automobili equipaggiate con sistemi di bordo a 42V, tra i quali – di particolare importanza – sono gli apparati di conversione dedicati a sistemi con starter/alternator direttamente accoppiati al motore termico e i convertitori dedicati a sistemi di accumulo basati sull'impiego di supercondensatori.

Nell'ambito di tali applicazioni, sono di interesse differenti tipologie di convertitori di potenza con tensione di ingresso compresa fra 24V e 80V e potenza da qualche kW a 30kW, allo scopo di realizzare apparati bi-direzionali di conversione DC/DC o DC/AC.

Una indagine condotta sulle tipologie di convertitori impiegati in applicazioni a bassa tensione del campo "automotive" mostra che la maggior parte di tali apparati di conversione si basa sull'utilizzo di una struttura base comprendente due switch con i relativi diodi in antiparallelo.

Sebbene tale struttura standard sia già commercializzata nella forma di moduli di potenza intelligenti, nel caso di applicazioni caratterizzate da alta corrente e bassa tensione tali moduli di potenza non soddisfano in pieno le esigenze dei produttori di convertitori di potenza e spesso nelle realizzazioni finali vengono ancora usati componenti discreti.

Un aspetto che ancora necessita di analisi è la distribuzione e la ripartizione in un PEBB dei componenti hardware generalmente presenti nei convertitori di potenza. Ciò include l'indagine su come includere in un PEBB a bassa tensione ed elevata corrente (i.e. LV-PEBB) i componenti necessari a svolgere funzioni "a basso livello" quali l'amplificazione dei segnali, l'isolamento, la protezione e la diagnostica. Tale gamma di componenti comprende trasduttori, convertitori A/D, schede di pilotaggio, interfacce di comunicazione e di isolamento ottico. Inoltre, è necessario includere nell'elemento base un controllore locale – denominato hardware manager (HM) – in modo da supervisionare le funzioni di controllo proprie dell'hardware.

Con riferimento ad applicazioni caratteristiche del settore "automotive" è stata recentemente proposta [18, 19] una configurazione di LV-PEBB avente la configurazione hardware schematicamente mostrata in Fig. 7.27.

Entro un opportuno campo di dimensionamento dei componenti attivi e passivi che costituiscono il PEBB, la configurazione a 5 terminali mostrata in Fig. 7.27 può essere utilizzata per realizzare sia convertitori DC/AC che convertitori DC/DC semplicemente selezionando il desiderato algoritmo di pilotaggio degli switch impostato nell'hardware manager.

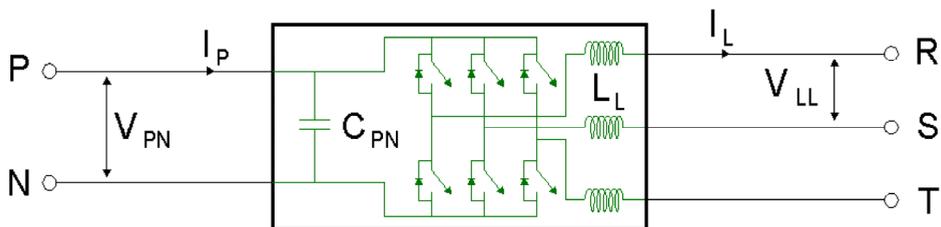


Fig. 7.27 - Configurazione schematica del circuito di potenza di un LV-PEBB

Come mostrato nella Fig. 7.28, l'hardware manager del PEBB comunica con una scheda di regolazione esterna, denominata "application manager", la quale fornisce, sulla base di una desiderata strategia di regolazione delle grandezze elettriche di ingresso e/o di uscita del PEBB, le grandezze di riferimento per il controllo locale attuato dall'hardware manager. La struttura del PEBB comprende, oltre che il sistema di raffreddamento dei semiconduttori e dei componenti passivi, anche i circuiti ausiliari richiesti per l'alimentazione dell'hardware manager ed i sensori di corrente, tensione e temperatura necessari ad implementare le funzioni di regolazione delle grandezze elettriche di ingresso e di uscita, nonché la protezione dei componenti rispetto ad eventuali condizioni anomale di funzionamento.

La Fig. 7.29 mostra il layout complessivo di un prototipo di LV-PEBB progettato e sperimentato con successo in laboratorio con riferimento a possibili applicazioni in sistemi di tipo starter/alternator a 42V.

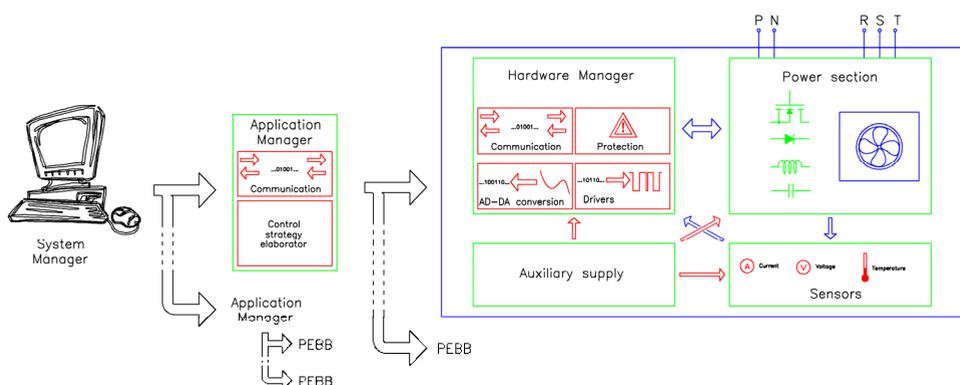


Fig. 7.28 - Schema a blocchi funzionale di un LV-PEBB

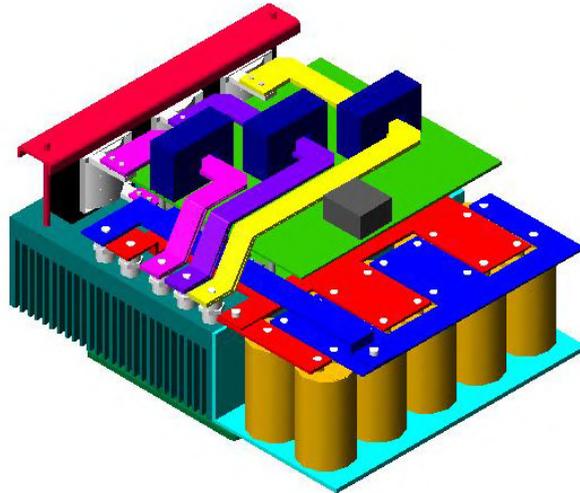


Fig. 7.29 - Layout di un prototipo di LV-PEBB da 10 kW per sistema starter-alternator

Bibliografia

- [1] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins: "Power Electronics – Converters, Applications and Design", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] F. Caricchi, F. Crescimbinì, G. Noia, D. Pirolò: "Experimental study of a bidirectional dc-dc converter for the dc link voltage control and the regenerative braking in PM motor drives devoted to electrical vehicles", IEEE 9th Applied Power Electronics Conference and Exposition, Orlando (USA), 13-17 febbraio 1994, Vol. 1, pagg. 381-386.
- [3] F. Caricchi, F. Crescimbinì, A. Di Napoli: "20 kW Water-Cooled Prototype of a Buck-Boost DC-DC Converter Topology for Electrical Vehicle Motor Drives", IEEE 10th Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas (USA), 5-9 marzo 1995, pagg. 887-892.
- [4] F. Caricchi, F. Crescimbinì, F. Giulii Capponi, L. Solero: "Study of Bi-directional Buck-Boost Converter Topologies for Application in Electrical Vehicle Motor Drives" Proceedings of the 13th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim (USA), 15-19 febbraio 1998.
- [5] A. Di Napoli, F. Caricchi, F. Crescimbinì, F. Giulii Capponi, L. Solero: Multiple-Input DC-DC Power Converter for Power-Flow Management in Hybrid Vehicles Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference 37th Annual Meeting, Pittsburg-PA (USA), 14-18 ottobre 2002, vol.3 pagg. 1578-1585.
- [6] P. T. Krein, J. Bentsman, R. M. Bass and B. L. Lesieutre: "On the use of averaging for the analysis of power electronic systems," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 5, no. 2, Apr. 1990, pp. 182-190.
- [7] R. D. Middlebrook and S. Cuk: "A General Unified Approach to Modeling Switching Converter Power Stage," Proc. of the IEEE PESC 1976, pp. 18-34.

- [8] P. Perruchoud, P. J. Pinewski, "Power Losses for Space Vector Modulation Techniques," IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation, 1996.
- [9] J. W. Kolar, F. C. Zach, "Correspondence – Losses in PWM Inverters Using IGBTs," IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 142, No. 4, July 1995.
- [10] J. W. Kolar, F. C. Zach, "Influence of the Modulation Method on the Conduction and Switching Losses of a PWM Converter System," IEEE Trans. on Industry Appl., vol. 27, No. 6, Nov/Dec 1991.
- [11] T. J. Kim, D. W. Kang, Y. H. Lee, D. S. Hyun, "The Analysis of Conduction and Switching Losses in Multi-Level Inverter System," PESC 2001.
- [12] F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, S. Sigurjonsson, A. Elkjaer, "An Extended Model of Power Losses in Hard-Switched IGBT-Inverters," Industry Appl. Soc. Annual Meeting 1996.
- [13] F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, U. Jaeger, "Evaluation of Modern IGBT-Modules for Hard-Switched AC/DC/AC Converters," Industry Appl. Soc. Annual Meeting 1995.
- [14] F. Blaabjerg, U. Jaeger, S. Munk-Nielsen, J. K. Pedersen, "Power Losses in PWM-VSI Inverter Using NPT or PT IGBT Devices," IEEE Trans. on Power Electr., vol. 10, No. 3, May 1995.
- [15] K. Berringer, J. Marvin, P. Perruchoud, "Semiconductor Power Losses in AC Inverters," Industry Appl. Soc. Annual Meeting 1995.
- [16] F. Casanellas, "Losses in PWM Inverters Using IGBTs," IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 141, No. 5, September 1994.
- [17] P. A. Dahono, Y. Sato, T. Kataoka, "Analysis of Conduction Losses in Inverters", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 142, No. 4, July 1995.
- [18] F. Crescimbin, V. Serrao, L. Solero "Power Electronics Building Block (PEBB) for Static Conversion Apparatus devoted to Low-Voltage Fed Electric Drives", Proceedings of the 36th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Recife (Brasil), 12-16 giugno 2005, CD-ROM.
- [19] L. Solero, V. Serrao, P. Taglioni, F. Crescimbin, "Low-Voltage Power Electronics Building Block for Automotive Applications", Proceedings of the APEC2006, 21th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas-TX (USA), 19-23 marzo 2006, pagg. 633-639.

CAPITOLO 8

I SISTEMI DI ACCUMULO ELETTRICO

Mario Conte

ENEA, Tecnologie per l'Energia, Fonti Rinnovabili e Risparmio Energetico

8.1 Introduzione

I veicoli elettrici ibridi sono classificati in diverse categorie, come in precedenza visto, la cui distinzione dipende sostanzialmente dal dimensionamento relativo del generatore primario e del sistema di accumulo. Pertanto il sistema di accumulo di tali veicoli è uno dei principali responsabili del comportamento statico e dinamico, del design e della struttura del veicolo. Infatti i parametri che descrivono in maniera compiuta un veicolo sono parametri fisici (peso totale, carico utile, peso dell'intero azionamento compreso il sistema di accumulo, dimensioni esterne ed interne, volume disponibile, area frontale, numero di passeggeri trasportabili); parametri meccanici ed energetici (potenza, coppia, resistenza al rotolamento delle ruote, accelerazione, velocità massima, rendimento energetico); parametri di utilizzabilità (comfort di guida, autonomia, affidabilità, flessibilità e disponibilità di uso, oneri di manutenzione e di costo).

Tutti questi parametri sono influenzati dalle caratteristiche del sistema di accumulo. Non a caso il sistema di accumulo è in grado di svolgere diverse funzioni all'interno del veicolo, e questa flessibilità ha portato allo sviluppo di sistemi di accumulo specializzati, per caratteristiche tecniche e costi, alle diverse applicazioni.

La Tab. 8.1 riassume in maniera prevalentemente qualitativa le principali funzioni richieste al sistema di accumulo di bordo nelle principali configurazioni dell'azionamento.

Le funzioni descritte possono essere svolte in maniera alternativa o complementare da diverse tipologie di sistemi di accumulo che vanno dagli accumulatori elettrochimici (più comunemente denominati *batterie*, che normalmente rappresentano un insieme di accumulatori elettrochimici collegati tra di loro), ai supercondensatori elettrochimici e, per completezza nell'esame delle alternative, a sistemi di accumulo meccanico, quali volani (*flywheels*) o accumulatori idraulici o pneumatici.

Lo scopo di questo capitolo è appunto quello di descrivere le principali caratteristiche richieste ai diversi sistemi di accumulo ed il loro stato dell'arte da un punto di vista della disponibilità commerciale e delle principali attività di ricerca e sviluppo.

Tab. 8.1 - Funzioni principali dei sistemi di accumulo in diverse tipologie di veicoli

| <i>Tipo di veicolo</i> | <i>Funzioni principali del sistema di accumulo</i> | <i>Requisiti principali del sistema di accumulo</i> |
|---|--|---|
| Veicolo convenzionale con motore a combustione interna | Avviamento ed alimentazione dei servizi di bordo | Costo e durata |
| Veicolo ibrido (HEV), micro e mild | Fornitura di potenza durante le fasi di stop-and-go, micro ibridi, più funzione di "power assist" nei mild | Condizioni operative tra il 45 ed il 75% dello stato di carica (SOC), numero elevato di cicli |
| Veicolo ibrido, Full | Fornitura di potenza durante le fasi di stop-and-go e contributo alla propulsione del veicolo | Condizioni operative tra il 45 ed il 75% dello stato di carica (SOC), numero elevato di cicli |
| Plug-in HEV | Fornitura di potenza durante le fasi di stop-and-go e contributo alla propulsione del veicolo per un'autonomia in puro elettrico dai circa 25 ad oltre 100 km. | Elevate potenze ed energie specifiche, scariche profonde, numero elevato di cicli di vita |
| Puro elettrico a batteria (EV) | Propulsione del veicolo (alimentazione con il solo sistema di accumulo di energia elettrica) | Elevate potenze ed energie specifiche, scariche profonde, numero elevato di cicli di vita |
| Ibrido a celle a combustibile, mild (FCHV) | Fornitura di potenza nei transitori e durante le manovre; potenza per il compressore delle FC e partecipazione alla trazione all'avvio e nei transitori | Elevata potenza specifica, moderata energia specifica, lunga vita ciclica |
| Per tutte le tipologie di ibridi (HEVs, EVs, FCHVs) | Recupero di energia in frenata | Alta accettazione di carica |

I sistemi considerati sono i seguenti:

1. Accumulatori elettrochimici (batterie)
 - a. Piombo-acido
 - b. Alcalini
 - c. Al Litio
 - d. Altri sistemi (Zebra)
2. Supercondensatori
3. Accumulo meccanico
 - a. Volani (flywheels)
 - b. Accumulo pneumatico (o idraulico)

La panoramica sui sistemi di accumulo per veicoli elettrici ibridi sarà infine integrata da un breve esame sulle necessità ed opportunità della gestione e del controllo di tali sistemi.

8.2 Caratteristiche delle batterie per veicoli elettrici ibridi

Un sistema di accumulo elettrochimico per veicoli elettrici ibridi consiste in un insieme di celle elettrochimiche (od anche accumulatori) in cui sia possibile ripristinare elettricamente lo stato dei reagenti precedente alla scarica e che siano collegate in modo da adattarsi alle richieste elettriche ed energetiche del sistema di propulsione e delle specifiche prestazionali del veicolo.

Una cella è solitamente costituita da due elettrodi (uno positivo e l'altro negativo) tra cui si stabilisce una differenza di potenziale che consente il flusso di ioni attraverso un materiale interposto (conduttore ionico ed isolante elettronico), chiamato elettrolita.

Le caratteristiche più importanti di una batteria possono essere classificate in funzione dell'impatto che hanno sulle prestazioni (energia e potenze specifiche, temperatura di esercizio), sui costi (vita ciclica, rendimento energetico, costo iniziale, manutenzione) e sull'effettiva disponibilità ed affidabilità di uso (tempo di ricarica, manutenzione, sicurezza, impatto ambientale) del veicolo.

La Fig. 8.1 presenta l'energia e la potenza richieste per le configurazioni più comuni di veicoli elettrici.

I principali programmi di ricerca e sviluppo delle batterie per le applicazioni alla trazione ibrida hanno da tempo individuato le prestazioni di riferimento richieste, che sono poi diventate gli obiettivi tecnici ed economici dei vari programmi.

La Tab. 8.2 riassume i principali requisiti, individuati dal consorzio americano USABC (United States Advanced Battery Consortium), nell'ambito del programma FreedomCar, per le batterie (a livello di sistema e non di singola cella ed a fine della vita operativa) in tre diverse applicazioni in veicoli ibridi Power Assist (per *Power Assist* si intende il solo contributo ai picchi di potenza con recupero di energia in frenata) [1].

Più recentemente anche per le batterie in veicoli ibridi plug-in, lo stesso consorzio americano ha proposto specifici requisiti tecnici ed economici, descritti nella Tab. 8.3.

Tab. 8.2 - Requisiti tecnici ed economici per sistemi di accumulo in tre diverse configurazioni di veicoli ibridi

| <i>Requisiti del sistema di accumulo</i> | <i>12V Start-Stop (TSS)</i> | | <i>42V Start-Stop (FSS)</i> | | <i>42V Transitorio Power Assist (TPA)</i> | |
|---|-----------------------------|----------|-----------------------------|-----------|---|-----------|
| Impulso di scarica | 4,2 kW | 2s | 6 kW | 2s | 13 kW | 2s |
| Impulso durante la ricarica in frenata | N/A | | N/A | | 8 kW | 2s |
| Impulso a freddo @ -30 °C | 4,2 kW | 7 V Min. | 8 kW | 21 V Min. | 8 kW | 21 V Min. |
| Energia disponibile con scarica alla Potenza Costante di 1 kW | 15 Wh | | 30 Wh | | 60 Wh | |
| Potenza di ricarica (kW) | 0,4 kW | | 2,4 kW | | 2,6 kW | |
| Vita ciclica / Percorrenza in miglia equivalenti (ciclo di riferimento) | 750k cicli / 150.000 miglia | | 750 cicli / 1150.000 miglia | | 750 cicli / 150.000 miglia | |
| Vita in anni | 15 | | 15 | | 15 | |
| Efficienza energetica in un ciclo di riferimento (%) | 95 | | 95% | | 95% | |
| Autoscarica (72hr da Max. V) | <4% | | <4% | | <4% | |
| Massima tensione operativa (Vdc) | 17 | | 48 | | 48 | |
| Minima tensione operativa (Vdc) | 9 | | 27 | | 27 | |
| Intervallo di temperatura operativa (°C) | -30 a +52 | | -30 a +52 | | -30 a +52 | |
| Peso massimo del sistema (kg) | 5 | | 10 | | 20 | |
| Volume Massimo del sistema (L) | 4 | | 8 | | 16 | |
| Prezzo di vendita (\$/sistema @ 100.000 sistemi prodotti/anno) | 40 | | 80 | | 130 | |

Tab. 8.3 - Requisiti principali richiesti ai sistemi di accumulo per veicoli ibridi plug-in

| <i>Caratteristiche a fine vita</i> | <i>Unità di misura</i> | <i>Batterie ad elevato rapporto potenza/energia</i> | <i>Batterie ad elevato rapporto energia/potenza</i> |
|---|------------------------|---|---|
| Autonomia equivalente in puro elettrico | miglia | 10 | 40 |
| Potenza ed energia | | | |
| Potenza di scarica di picco – 2 sec/ 10 sec | kW | 50/45 | 46/38 |
| Potenza di picco rigenerativa (10 sec) | kW | 30 | 25 |
| Energia disponibile in scarica per puro EV (modo Charge Depleting =CD)@ 10 kW | kWh | 3,4 | 11,6 |
| Energia disponibile in scarica per HEV (modo Charge Sustaining=CS) | kWh | 0,5 | 0,3 |
| Vita | | | |
| Vita ciclica in modo CD | cicli | 5.000 | 5.000 |
| Vita ciclica in modo CS con profili da 50 Wh | cicli | 300.000 | 300.000 |
| Vita (calendar life) a 35 °C | anni | 15 | 15 |
| Proprietà fisiche, condizioni operative e costi | | | |
| Massimo peso dell'intero sistema di accumulo (comprensivo dell'elettronica) | kg | 60 | 120 |
| Massimo volume dell'intero sistema di accumulo (comprensivo dell'elettronica) | L | 40 | 80 |
| Regime di ricarica a 30 °C | kW | 1,4 | 1,4 |
| Temperatura di ricarica ed operativa senza assistenza esterna | °C | -30 a +52 | -30 a +52 |
| Massimo prezzo @ 100.000 sistemi/anno | \$ | 1.700 | 3.400 |

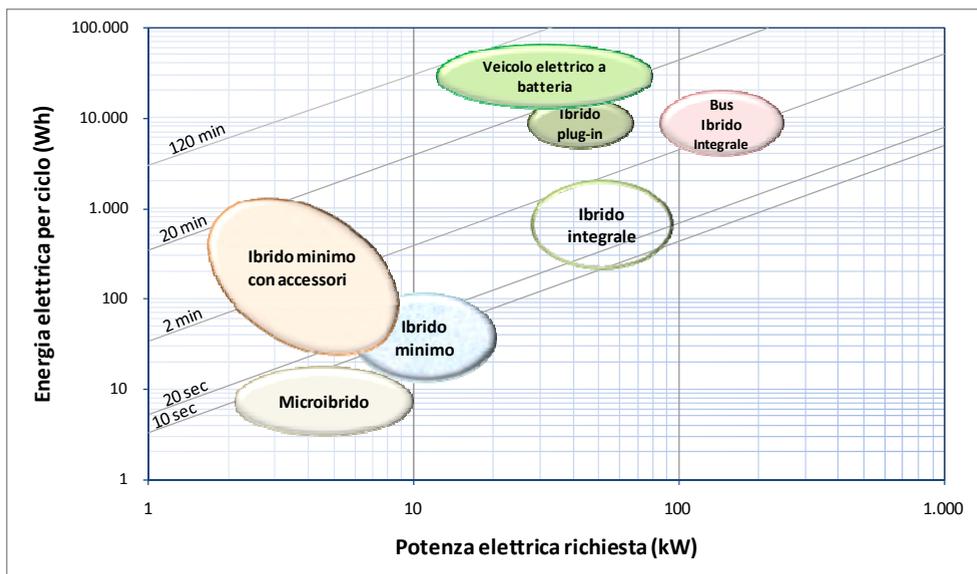


Fig. 8.1 - Prestazioni di potenza ed energia (per ciclo) per le batterie per veicoli elettrici puri e ibridi (compresi i plug-in)

8.3 Stato attuale della tecnologia

Negli ultimi 20 anni circa 30 differenti batterie sono state proposte per alimentare veicoli elettrici stradali. Tra queste ne sono state individuate alcune, ritenute le più promettenti e su cui è stato riversato il maggiore impegno di ricerca e sviluppo, che presentano caratteristiche e costi potenzialmente interessanti per le applicazioni ai veicoli ibridi.

Per meglio comprendere le caratteristiche principali delle batterie, in appendice sono riportate alcune semplici definizioni.

8.3.1 Batterie piombo-acido

La batteria piombo-acido è stata per anni il sistema di accumulo per veicoli elettrici più diffuso ed utilizzato.

Nonostante questo accumulatore presenti limiti (bassa densità di energia, lunghi tempi di ricarica, continua manutenzione, sensibilità alla temperatura operativa), che hanno condizionato fortemente la diffusione dei veicoli elettrici, essi trovano ancora interessanti applicazioni nei veicoli elettrici di piccola (scooter, biciclette a pedalata assistita elettricamente) e grande taglia (autobus e minibus). Le attività di R&S in corso hanno consentito interessanti miglioramenti.

La Fig. 8.2 presenta, a titolo esemplificativo, una tipica configurazione di un modulo di batteria al piombo.

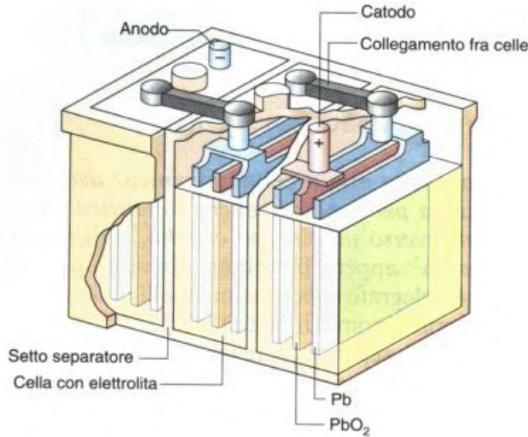


Fig. 8.2 - Esempio di modulo di una batteria piombo-acido

Esistono attualmente in commercio diverse configurazioni di accumulatori al piombo (con elettrodo positivo a piastra piana o tubolare, a ricombinazione di gas ecc.). Per la trazione elettrica si sono utilizzati nel passato principalmente sistemi ad elettrodi positivi tubolari in grado di fornire densità di energia di 35 Wh/kg (potenza specifica di 50-60 W/kg) e di resistere a scariche profonde per un numero limitato di cicli (fino ad 800 cicli), i tempi per una ricarica completa sono di circa 8 ore.

Gli sviluppi in corso mirano a migliorare o la manutenibilità o le prestazioni specifiche attraverso:

- l'adozione della tecnologia a ricombinazione di gas, cosiddetta con valvole di regolazione (VRLA = *Valve Regulated Lead Acid*), - sia in versione gelificata sia a separatore microporoso del tipo AGM= *Adsorptive Glass Mat* - che elimina il problema della manutenzione (rabbocco dell'acqua distillata) anche se penalizza leggermente la densità di energia e la vita ciclica (in fase di valutazione). Questi accumulatori sono ormai prodotti commerciali da diversi anni;
- i sistemi bipolari e flow-through dovrebbero invece consentire un significativo aumento delle prestazioni specifiche, potenza ed energia (oltre 40 Wh/kg ed 100 W/kg), e, per alcune configurazioni, anche un aumento della ciclabilità (1000 cicli) e la riduzione dei costi.

La tecnologia di fabbricazione consolidata, la possibilità di automazione della produzione di accumulatori per trazione e l'adozione di nuovi materiali più economici e più efficienti lasciano intravedere ulteriori riduzioni di costo del già più economico accumulatore commerciale.

Dal punto di vista ambientale, l'automazione del processo costruttivo e l'adozione di impianti di condizionamento con opportuni filtri hanno poi reso trascurabile l'impatto nell'ambiente di lavoro, mentre la messa a punto di processi di riciclaggio puliti e la creazione di consorzi per la raccolta (come il COBAT in Italia) hanno ormai risolto i problemi di inquinamento ambientale da piombo ed acido solforico.

La possibilità però di migliorare vita utile e prestazioni specifiche delle batterie al piombo, in modo da rispondere più adeguatamente ai requisiti previsti dai veicoli ibridi, comunque ha richiesto una sostanziale revisione della loro struttura convenzionale. Gli interventi principali hanno riguardato un nuovo disegno della griglia per aumentare l'accettazione di carica ed una nuova concentrazione della materia attiva per ridurre fenomeni di degrado (quale ad esempio la solfatazione).

Queste attività sono state promosse dal Consorzio internazionale ALABC (*Advanced Lead Acid Battery Consortium*, con un ramo europeo EALABC), nato per bilanciare le iniziative promosse da USABC su altri tipi di batterie.

I risultati più recenti sono stati ottenuti principalmente da tre progetti (in parte finanziati dal governo inglese nel programma Foresight): RHOLAB, EffPower e CSIRO, i cui risultati sono stati verificati sperimentalmente su una Honda Insight, sostituendo le precedenti batterie nichel-idruri metallici.

La batteria del progetto RHOLAB (**R**eliable, **H**ighly **O**ptimized, **L**ead-**A**cid **B**attery) [2, 3] è il risultato di un intervento combinato di modifica della struttura e della chimica della cella e di una corretta gestione della batteria durante l'utilizzo.

La cella di riferimento è in configurazione spirale avvolta (come illustrata in Fig. 8.3) con una specifica caratterizzazione data dai due terminali di corrente (il prodotto standard ha i terminali sullo stesso lato del cilindro).



Fig. 8.3 - Prototipo Cyclon del Progetto RHOLAB a doppio terminale di corrente

Le innovazioni introdotte hanno favorito una migliore utilizzazione della materia attiva e una riduzione dei gradienti termici con conseguente aumento della vita. Prove su strada hanno confermato i miglioramenti previsti.

La Effpower ha invece proposto una versione bipolare, non del tutto nuova, ma dalle prestazioni interessanti, superando i 30.000 km di percorrenza in una prova sperimentale a bordo di un veicolo ibrido.

La Fig. 8.4 mostra la configurazione bipolare adottata dall'Effpower.

Infine il laboratorio australiano CSIRO ha sviluppato una batteria di nuova concezione, accoppiando, di fatto, una batteria al piombo con una parte di supercondensatore asimmetrico (viene anche chiamato supercondensatore ibrido). Il risultato di questa integrazione tra due sistemi elettrochimici è l'UltraBattery, illustrata in Fig. 8.5.

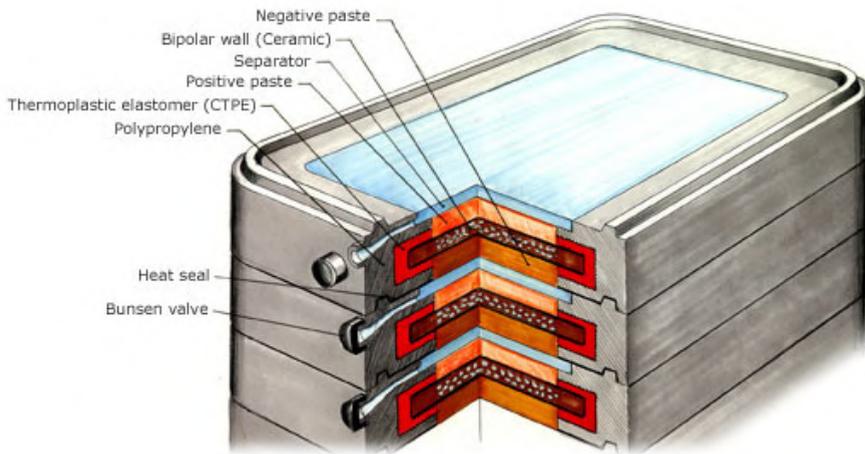


Fig. 8.4 - Configurazione bipolare della batteria al piombo della Effpower

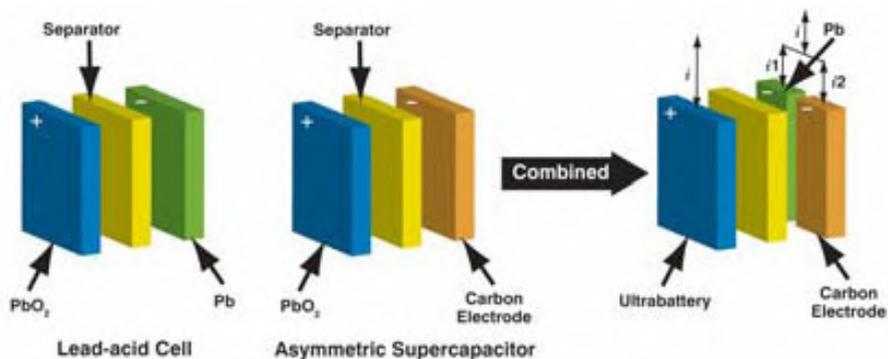


Fig. 8.5 - Schema dell'UltraBattery, sviluppata dal laboratorio australiano CSIRO

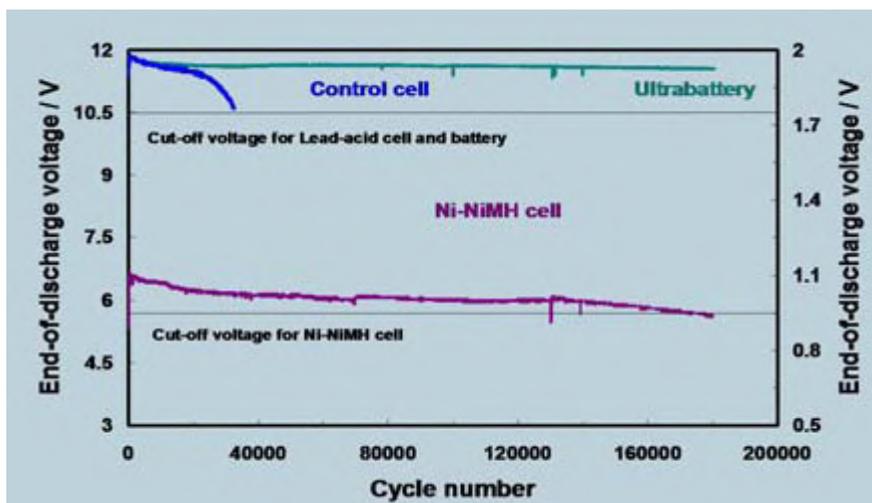


Fig. 8.6 - Vita ciclica dell'UltraBattery a confronto di una Ni-MH su un ciclo standard

La caratteristica progettuale è proprio la creazione dell'elettrodo negativo che è metà supercondensatore e metà elettrodo convenzionale.

Il risultato è un accumulatore dalle prestazioni di potenza, in carica e scarica, compatibili con quelle richieste dai veicoli ibridi. Da un confronto sperimentale fatto con un analogo sistema nichel-idruri metallici, si è potuto constatare l'elevata ciclabilità di questa batteria (Fig. 8.6).

8.3.2 Batterie alcaline

Le batterie alcaline, a base di nichel, hanno una tensione di lavoro intorno ad 1 V (la tensione a circuito aperto è da 1,2 V a 1,6 V) con un catodo, appunto, di nichel, un elettrolita costituito da idrossido di potassio (KOH), mentre l'anodo può essere costituito da un metallo (cadmio, zinco, ferro) o da una lega metallica (idruri metallici di varia composizione). Alcune caratteristiche delle batterie alcaline a base di nichel sono riportate nella Tab. 8.4.

Tab. 8.4 - Principali caratteristiche di batterie alcaline a base di nichel

| Sistema | Ni-Cd (pocket) | Ni-Cd (sealed) | NiMH | Ni-Zn | Ni-Fe (pocket) | Ni-H ₂ |
|--------------------------|-------------------|-------------------|--------|--------|-------------------|-------------------|
| Tensione, V | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,6 | 1,4 | 1,2 |
| Densità di energia, Wh/l | 40 | 100 | 75 | 60 | 55 | 105 |
| Energia specifica, Wh/kg | 20 | 35 | 240 | 120 | 30 | 64 |
| Potenza | Bassa | Alta | Alta | Alta | Bassa | Media |
| Profilo di scarica | Piatta | Piatta | Piatta | Piatta | Piatta | Piatta |
| Vita, cicli | 2000 | 700 | 600 | 500 | 4000 | 6000 |

Il sistema nichel-cadmio (NiCd) è certamente un accumulatore commerciale di grande affidabilità in virtù dell'elevata resistenza agli abusi sia in carica che in scarica. L'elevata ciclabilità, l'alta potenza specifica e, recentemente, una buona energia specifica hanno reso questo accumulatore particolarmente interessante, per cui, nonostante i costi (da 5 a 8 volte i sistemi al piombo), è stato largamente utilizzato (specialmente in Francia) nei veicoli elettrici, con forme particolari di leasing.

Lo sviluppo di tecniche costruttive innovative ne ha migliorato le prestazioni. Infatti l'adozione di feltri metallizzati con impregnazione elettrochimica del nichel ha consentito sensibili risparmi di nichel (30%) a parità di prestazioni, come pure l'uso di leganti organici, che hanno portato alla commercializzazione di batterie per trazione elettrica con densità di energia doppie di quelle precedenti (oltre 50 Wh/kg) ed un numero elevato di cicli (circa 2000 previsti). Caratteristica interessante è infine la possibilità di ricaricare in tempi inferiori alle 5 ore.

L'uso però del cadmio, che è un metallo estremamente tossico, nelle applicazioni veicolari è sempre meno considerato in quanto in prospettiva ne è prevista l'eliminazione, anche da specifiche direttive europee.

L'accumulatore nichel-ferro (NiFe) presenta caratteristiche sostanzialmente analoghe a quelle della nichel-cadmio. Principali vantaggi sono l'utilizzo di ferro che dovrebbe essere migliore rispetto al cadmio per costo ed impatto ambientale. La densità di energia è alta, come pure la ciclabilità.

I problemi di autoscarica e di riscaldamento con conseguente basso rendimento energetico hanno frenato la commercializzazione di questo tipo di accumulatore. Oramai il suo uso è molto ridotto e ristretto ai paesi dell'ex Unione Sovietica.

Il sistema nichel-zinco (NiZn) è stato per molti anni uno dei sistemi più promettenti per i veicoli elettrici. La buona densità di energia (fino ad 80 Wh/kg) e l'ampia disponibilità dei reagenti hanno portato alla realizzazione di numerosi prototipi. Nel tempo però i problemi di bassa ciclabilità e di estrema sensibilità alle sovraccariche non sono stati risolti. La solubilità dello zinco nell'elettrolita e la crescita dendritica sono le cause principali di questi problemi.

Lo sviluppo di nuovi separatori e l'aggiunta di opportuni additivi agli elettrodi ed all'elettrolita hanno portato ad una parziale soluzione di questi problemi.

Il sistema nichel-idrogeno (NiH₂) è stato sviluppato per usi spaziali in virtù delle sue elevate prestazioni. L'elevata vita ciclica, la buona potenza specifica e la robustezza in generale del sistema non sono sufficienti a stimolarne l'uso, in quanto utilizza materiali particolarmente costosi sia per la cella, dove è usato il platino, sia per il contenitore in pressione, che usa titanio.

Il sistema nichel-idruri metallici (NiMH) è la più recente batteria alcalina, ed è ormai il sistema di accumulo più utilizzato nei veicoli ibridi. Sostituendo il cadmio con una lega metallica (vanadio, titanio, zirconio, nichel, cromo) si ottiene un sistema privo di problemi di impatto ambientale.

Questo tipo di accumulatore presenta buona energia specifica (simile alle migliori nichel-cadmio), un'elevata ciclabilità e potenza specifica (oltre 1 kW/kg), assenza di manutenzione (le nichel-cadmio per trazione richiedono il rabbocco di acqua), un costo previsto inferiore (attualmente è intorno ai 700-800 €/kWh) e tempi di ricarica dell'ordine delle 3-4 ore.

La vita ciclica è elevata (circa 2000 cicli per scariche all'80% di DOD) e ha un'autoscarica di circa il 10% al mese. Le attese sono di altri miglioramenti fino ad arrivare ad una energia specifica di 80 Wh/kg ed una potenza specifica di 2400 W/kg.

La Fig. 8.7 mostra una tipica cella prismatica.

Ci sono diversi produttori al mondo, ma attualmente la Panasonic è il leader del mercato per la fornitura delle batterie per tutta la gamma di ibridi della Toyota, con una produzione che ha ormai superato il milione di batterie complete fornite. La Panasonic EV è stata in grado di fare evolvere la tecnologia migliorandone le prestazioni e i costi da una generazione all'altra.

La batteria NiMH può essere prodotta in versione cilindrica o prismatica (vedi in Fig. 8.8 la batteria della Panasonic usata nella Toyota Prius).

La produzione e l'uso diffuso della tecnologia ha portato a sostanziali miglioramenti del sistema, che per la Toyota è ormai alla terza generazione.

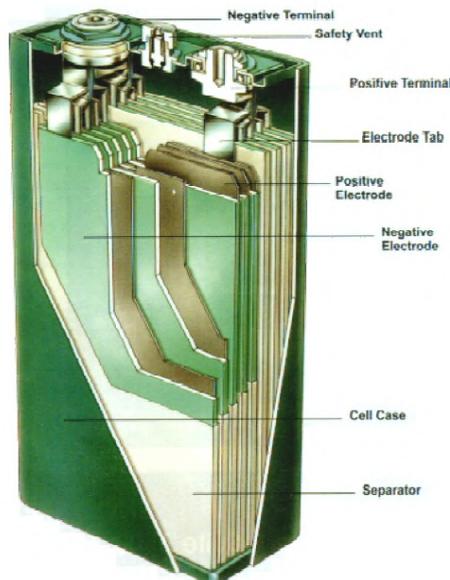


Fig. 8.7 - Cella prismatica nichel-idruri metallici (NiMH)



Fig. 8.8 - Batteria nichel-idruri metallici (NiMH) Panasonic usata nella Toyota Prius

La Tab. 8.5 mostra appunto l'evoluzione del sistema di accumulo nell'arco di 7 anni. La Toyota garantisce la vita della batteria per almeno 8 anni. Batterie NiMH sono ormai disponibili commercialmente da parte di diversi produttori: Panasonic, Sanyo, BYD, Yuasa, Saft, Cobasys ecc.

Tab. 8.5 - Evoluzione della batteria NiMH usata nella Toyota Prius

| <i>Caratteristiche</i> | <i>1997 Prius (Generazione I) Solo Giappone</i> | <i>2000 Prius (Generazione II)</i> | <i>2004 Prius (Generazione III)</i> |
|------------------------|---|--|---|
| Forma | Cilindrica | Prismatica | Prismatica |
| Celle (Moduli) | 240 (40) | 228 (38) | 168 (28) |
| Tensione nominale | 288,0 V | 273,6 V | 201,6 V |
| Capacità nominale | 6,0 Ah | 6,5 Ah | 6,5 Ah |
| Potenza specifica | 800 W/kg | 1000 W/kg | 1300 W/kg |
| Energia specifica | 40 Wh/kg | 46 Wh/kg | 46 Wh/kg |
| Peso del modulo | 1090 g | 1050 g | 1040 g |
| Dimensioni del modulo | 35(dia)x384(L) | 19,6x106x275 | 19,6x106x285 |

8.3.3 Batterie ad alta temperatura

La **batteria sodio-nichel cloruri metallici (NaNiCl_2)** è una diretta derivazione dell'accumulatore sodio-zolfo. Chiamata anche batteria Zebra, questo accumulatore utilizza in alternativa al catodo di zolfo un cloruro metallico (di nichel o di ferro) con un ulteriore elettrolita liquido: modifica giustificata dall'esigenza di risolvere i problemi della batteria sodio-zolfo. Infatti la batteria Zebra non ha problemi di corrosione, non avendo lo zolfo, ha un intervallo di temperatura operativa più ampio (lavora a $250\text{ }^\circ\text{C}$) e, l'eliminazione del nichel per il contenitore, non ha comportato modifiche delle prestazioni elettriche ed energetiche, ma anzi ha consentito di ridurre i costi. Come si vede dalla Fig. 8.9, che descrive lo schema di una cella elementare, la batteria Zebra, a causa della sua temperatura operativa, ha un elettrolita ceramico, solido, β -allumina, mentre gli elettrodi sono liquidi (sodio e cloruro di nichel).

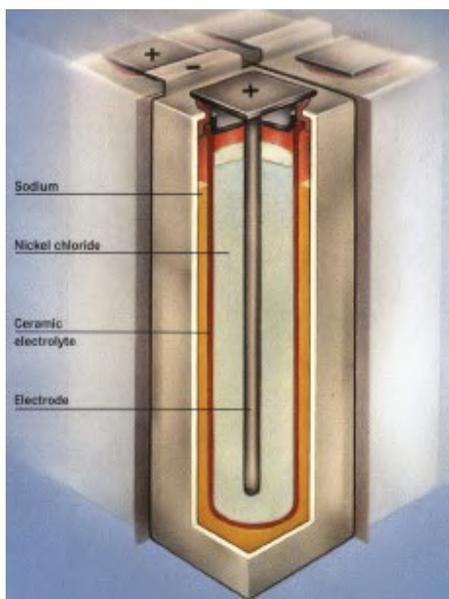


Fig. 8.9 - Schema di una cella Zebra

L'alta temperatura operativa rende la batteria Zebra particolarmente indicata per veicoli che sono usati in modo prevalentemente continuo.

Batterie Zebra con contenuti energetici fino a 130 kWh sono state provate in oltre 1000 prove su strada in diverse aree del mondo con ottimi risultati, raggiungendo una vita operativa superiore ai 10 anni con circa 1.500 cicli di carica/scarica a livello di batterie complete. Le attuali prestazioni delle batterie Zebra sono riportate nella Tab. 8.6.

Tab. 8.6 - Prestazioni attuali di celle e batterie Zebra

| <i>Proprietà</i> | <i>Celle per EV (30-40 Ah)</i> | <i>Batterie per EV (25-40 kWh, circa 360 celle)</i> |
|--------------------------|--------------------------------|---|
| Energia specifica, Wh/kg | 145 | 118 |
| Densità di energia, Wh/L | 340 | 183 |
| Potenza specifica, W/kg | 271 | 185 |
| Densità di potenza, W/L | 613 | 276 |

L'azienda svizzera MES-DEA, attualmente l'unica produttrice al mondo, per rendere più competitivi i suoi prodotti sta pensando a sostanziali cambiamenti per arrivare a prestazioni specifiche di circa 200 Wh/kg e di 400 W/kg, a livello di cella e non di sistema completo.

8.3.4 Batterie metallo-aria

Le batterie metallo-aria utilizzano un elettrodo negativo metallico (alluminio, ferro, zinco) ed un elettrodo positivo (simile a quello delle celle a combustibile) che usa l'ossigeno contenuto nell'aria. Questi sistemi presentano elevata potenza ed energia specifica.

La batteria alluminio-aria, a volte chiamata 'cella a combustibile', ha la particolarità di essere ricaricata meccanicamente, cioè gli elettrodi di alluminio devono essere sostituiti una volta scaricata la batteria. Questa operazione è molto rapida e rende i tempi di ricarica confrontabili con quelli di un pieno di carburante. I problemi attuali sono le operazioni di manutenzione che richiedono personale e infrastrutture adeguati ed i costi.

Sono già disponibili prototipi e prodotti industriali di piccola taglia. La batteria zinco-aria presenta il problema della instabilità dello zinco che ne riduce il rendimento e la vita. Può essere ricaricata sia meccanicamente che elettricamente, e rispetto all'alluminio-aria dovrebbe risultare meno costosa, anche se con prestazioni inferiori. La batteria ferro-aria è ricaricabile soltanto elettricamente, ma ha la prospettiva di costi ridotti. Attualmente la vita ciclica delle celle prototipo realizzate è stata piuttosto limitata (300 cicli).

8.3.5 Batterie al litio

L'accumulatore al litio è l'ultima e più promettente generazione di accumulatori per le applicazioni più diverse. 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. Tra le batterie ricaricabili, quelle al litio hanno, con esclusione forse delle metallo-aria, le prestazioni potenzialmente più interessanti.

Le batterie al litio ricaricabili si possono grossolanamente suddividere in batterie al litio metallico e litio-ioni.

Nella prima tipologia, l'anodo è litio metallico, mentre l'elettrolita può essere sia liquido che solido, con materiali ceramici, vetrosi o polimerici. Questa soluzione presenta notevoli vantaggi in termini di bassa resistenza interna, elevata capacità e conseguentemente elevate potenze ed energie specifiche, ma, per l'estrema reattività del litio metallico, ha posto alcuni limiti di sicurezza che hanno reso arduo il cammino commerciale di questo prodotto.

Nella seconda tipologia, quella appunto litio-ione, vengono usati materiali elettrodi ad intercalazione, che possono accumulare e rilasciare elevate quantità di litio in maniera reversibile. L'anodo ha prestazioni inferiori a quelle del litio metallico, ma essendo meno reattivo, offre maggiore stabilità e sicurezza in uso.

La scelta dei materiali anodici e catodici e dell'elettrolita determina la tensione di lavoro e ha effetto sull'energia specifica della singola cella: la maggiore parte delle celle a litio supera facilmente i 3 V di tensione a vuoto.

La Fig. 8.10 illustra il funzionamento di massima di una cella al litio-ione.

Una sintesi di alcuni sistemi al litio oggi studiati o sviluppati è riportata in Tab. 8.7.

La Fig. 8.11 mette in evidenza i progressi ottenuti dai sistemi al litio rispetto alle batterie alcaline negli ultimi anni.

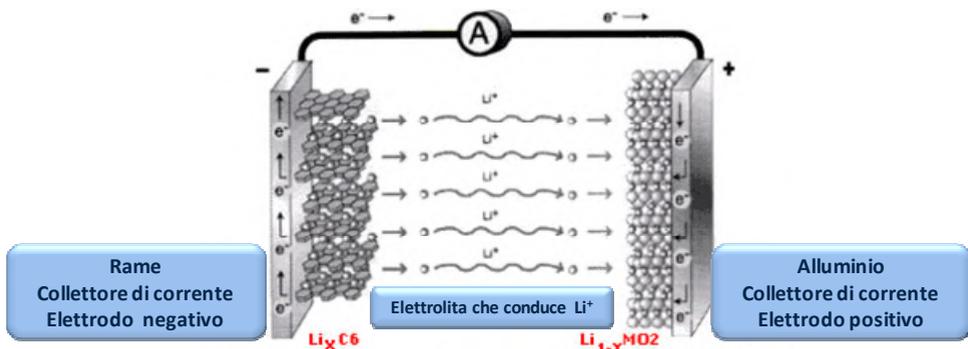


Fig. 8.10 - Schema di funzionamento di una batteria litio-ione in carica

Tab. 8.7 - Caratteristiche di alcune batterie al litio-ione per applicazioni ad ibridi plug-in [8]

| Sistema | NCA Grafite | LFP Grafite | MS TiO | MNS TiO | MN Grafite |
|--|--|------------------------------|--|---|--|
| Elettrodi Positivo Negativo | $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}$ Grafite | LiFePO_4 Grafite | LiMn_2O_4 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ | $\text{LiMn}_{1.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_4$ $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ | $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.6}\text{Ni}_{0.2}\text{O}_2$ Grafite |
| Capacità, mAh/g Positivo Negativo | 155 290 | 162 290 | 100 170 | 130 170 | 275 290 |
| Tensione, V a 50% SOC | 3,6 | 3,35 | 2,52 | 3,14 | 3,9 |
| Sicurezza | Discreta | Buona | Eccellente | Eccellente | Eccellente |
| Potenziale vita | Buono | Buono | Eccellente | Sconosciuto | Sconosciuto |
| Costo | Moderato | Moderato | Basso | Moderato | Moderato |
| Stato dell'arte | Scala pilota | Scala pi- lota | Sviluppo | Ricerca | Ricerca |

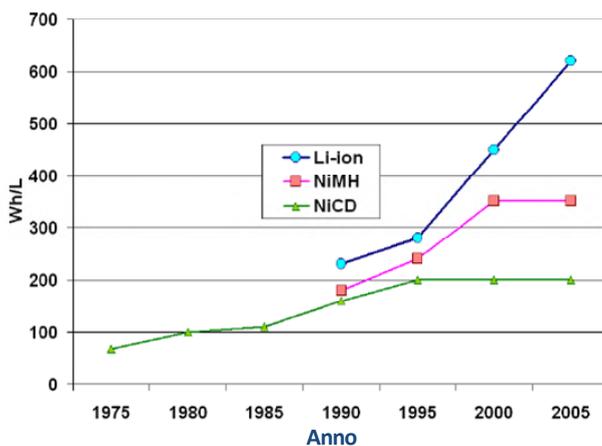


Fig. 8.11 - Confronto del miglioramento della densità di energia delle batterie litio-ione rispetto alle alcaline NiCd e NiMH [9]

Sono ormai proposte da numerosi costruttori europei, americani e asiatici (qualche esempio: Johnson Controls-Saft, Batscap, LITEC, Gaia-Lithium Tech, Enerdel, LGChem, CPI, A123, Boston Power, Valence Technologies, Kokam, Thundersky, BYD, EIG, Panasonic-Sanyo, Toshiba, Yuasa ecc.) batterie al litio con caratteristiche adeguate all'uso nelle diverse configurazioni di veicoli ibridi. Infatti, sul mercato sono offerte batterie Li-ione non ancora oggetto di produzioni di massa e quindi a costi abbastanza elevati, con energia specifica fino a circa 185 Wh/kg e potenze specifiche fino a qualche kW (in funzione delle condizioni di scarica). La vita ciclica, in funzione delle profondità di scarica considerata, varia da 1000-2000 cicli (per scariche complete fino al 100% della capacità nominale) ad alcune decine o centinaia di migliaia di cicli (per scariche poco profonde di qualche percento della capacità totale).

Uno dei principali problemi attuali delle batterie al litio è la sicurezza associata alla loro fabbricazione, uso e riciclaggio. Per quanto riguarda l'uso è necessario, com'è ormai scelta comune a tutte le batterie nei veicoli, sviluppare dispositivi elettronici di gestione e controllo di ogni singola cella (o piccoli gruppi fino ai moduli), insieme ad un sistema di controllo termico per garantire il mantenimento delle condizioni ottimali di funzionamento (solitamente un determinato intervallo di temperatura) delle singole celle nelle diverse condizioni operative, anche estreme.

8.4 Supercondensatori

I condensatori elettrochimici (comunemente denominati supercondensatori o ultracondensatori, per rilevare la sostanziale differenza con i condensatori convenzionali) sono un altro sistema elettrochimico simile alle batterie per accumulare direttamente energia elettrica. Questi dispositivi sono stati inventati nel 1957 da Becker della General Electric.

I supercondensatori, nella versione ora più commercializzata, sono costituiti da 2 elettrodi (di solito a base di carbone attivo) e da un elettrolita. Questa versione, chiamata a doppio strato (EDLC = *Electrochemical Double Layer Capacitor*), funziona sostanzialmente come un condensatore normale accumulando fisicamente energia elettrica e trasferendo cariche elettriche (positive e negative) sui due elettrodi separati da un isolante (in questo caso elettrochimico): nel supercondensatore la carica elettrica si accumula all'interfaccia tra un conduttore (l'elettrodo) ed un elettrolita liquido [10], creando pertanto un "doppio strato" di cariche, equivalente ad ogni elettrodo ad un condensatore a facce piane.

La Fig. 8.12 illustra appunto il principio di funzionamento di un supercondensatore a doppio strato.

L'aumento notevole delle caratteristiche ottenuto dai supercondensatori è principalmente dovuto all'utilizzo di materiali innovativi ad alta superficie microscopica ed allo spessore equivalente del dielettrico, pari alla distanza tra le cariche elettriche (spessore del doppio strato) e non a quella tra gli elettrodi.

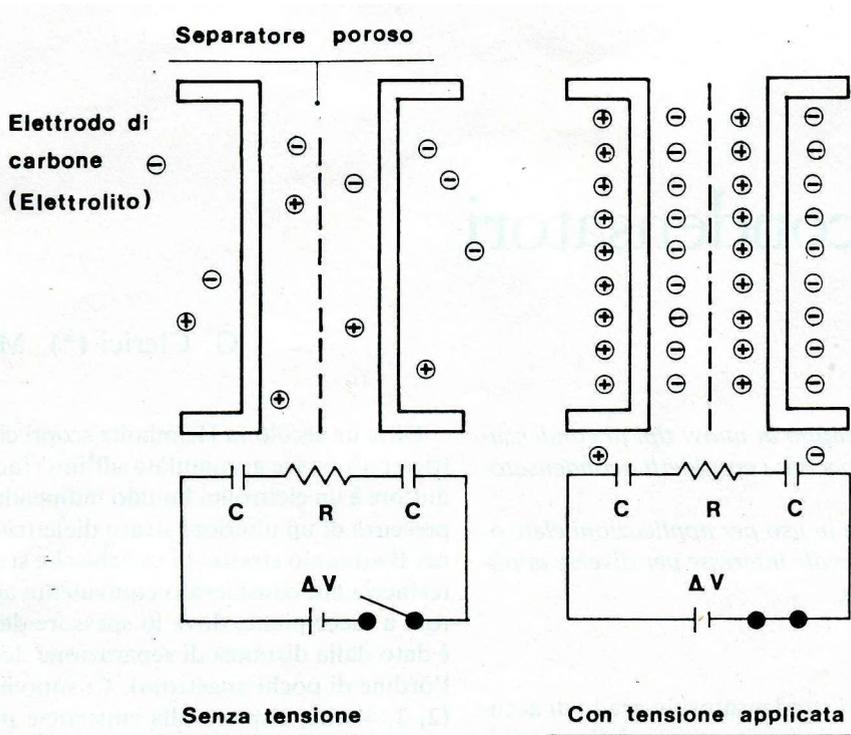


Fig. 8.12 - Principio di funzionamento di un supercondensatore a doppio strato: ad ogni singolo elettrodo si formano due strati di cariche elettriche di segno opposto. L'equivalente elettrico di questa distribuzione di cariche è un condensatore [10]

La ricerca e sviluppo hanno sostanzialmente modificato l'idea originale, sopra descritta, cambiando e trovando nuovi materiali elettrodici, nuovi elettroliti e nuove configurazioni.

Oggi si parla quindi di pseudo-condensatori (quando alla carica elettrostatica si unisce quella elettrochimica associata a particolari reazioni elettrodiche), supercondensatori simmetrici (quando i 2 elettrodi sono uguali) o asimmetrici (quando i due elettrodi sono dello stesso materiale ma di composizione diversa), o ibridi (quando i due elettrodi sono di materiale diverso) o, infine, asimmetrici ibridi (in cui uno un elettrodo di supercondensatore viene abbinato ad un elettrodo di una batteria, al litio od al piombo od altro, come l'UltraBattery, illustrata precedentemente).

Infine i supercondensatori si distinguono anche per l'elettrolita utilizzato, che può essere acquoso (come i primi che utilizzavano acido solforico diluito e avevano una tensione di lavoro intorno a 0,7-0,9 V) e non-acquoso (od organico), come quelli attualmente commercializzati, con tensione di cella superiore ai 2,3 V.

Queste nuove soluzioni hanno portato ad energie specifiche superiori ai 5 Wh/kg ed a potenze specifiche superiori ai 4-5 kW/kg con una stabilità e durata di vita ben maggiore di 500.000 cicli completi di carica e scarica.

L'energia accumulata (E) e la massima potenza di picco (P) di un supercondensatore sono date dalle seguenti equazioni:

$$E = \frac{1}{2} CV^2; \quad P = \frac{V^2}{4R}$$

dove C è la capacità del condensatore espressa in Farad, V è la tensione nominale in Volt e R è la resistenza equivalente serie in Ohm. La massima potenza di picco si ottiene con una resistenza del carico di riferimento uguale alla resistenza interna.

I supercondensatori hanno quindi consentito un incremento delle prestazioni dei condensatori impensabili fino a pochi decenni fa.

La Tab. 8.8 chiaramente mostra tali progressi confrontando le caratteristiche di condensatori tradizionali con i supercondensatori per accumulare 1 MJ di energia.

Tab. 8.8 - Caratteristiche di diversi tipi di condensatori per accumulare 1 MJ

| Tipo di condensatore | Massa (kg) | Volume (m ³) | Costo (\$) | Tempo di risposta (sec) |
|----------------------|------------|--------------------------|------------|-------------------------|
| Elettrostatico | 200,000 | 140 | 700.000 | 10 ⁻⁹ |
| Elettrolitico | 10,000 | 2.2 | 300.000 | 10 ⁻⁴ |
| Elettrochimico | 100 | 0.1 | 15.000 | 1 |

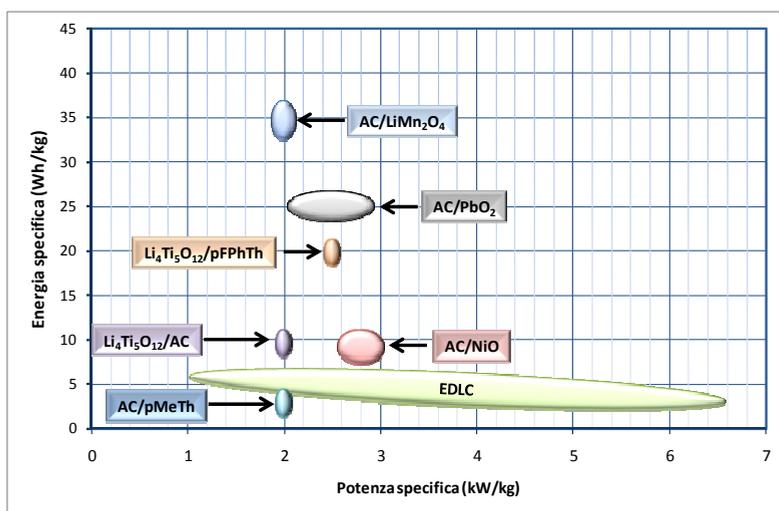


Fig. 8.13 - Stato dell'arte dei supercondensatori ibridi asimmetrici, adattata da [12]

Le straordinarie caratteristiche di potenza di picco rendono particolarmente interessanti questi dispositivi nei veicoli ibridi in cui la riserva di potenza è di estrema importanza. A tal fine il Consorzio americano USABC ha definito i requisiti tecnici ed economici dei supercondensatori in tre diverse possibili configurazioni di veicoli ibridi, che sono riassunti nella Tab. 8.9.

La Fig. 8.13 illustra invece lo stato dell'arte degli accumulatori asimmetrici ibridi, la generazione più recente di supercondensatori, rispetto ai supercondensatori a doppio strato (EDLC).

Tab. 8.9 - Requisiti dei supercondensatori per uso in 3 sistemi ibridi, proposti dal Consorzio USABC

| <i>Requisiti del sistema completo</i> | <i>Applicazione 12V Start-Stop (TSS)</i> | | <i>Applicazione 42V Start-Stop (FSS)</i> | | <i>Applicazione 42V Transient Power Assist (TPA)</i> | |
|---|--|---------------------|--|----------------------|--|----------------------|
| | | | | | | |
| Impulso di Potenza di scarica | 4,2 kW | 2s | 6 kW | 2s | 13 kW | 2s |
| Potenza di carica in frenata | N/A | | N/A | | 8 kW | 2s |
| Avviamento a freddo @ -30 °C | 4,2 kW | 7 V _{Min.} | 8 kW | 21 V _{Min.} | 8 kW | 21 V _{Min.} |
| Energia disponibile (per scarica a potenza costante @1kW) | 15 Wh | | 30 Wh | | 60 Wh | |
| Regime di ricarica | 0,4 kW | | 2,4 kW | | 2,6 kW | |
| Cicli di vita / Miglia equivalenti | 750k/150.000 | | 750k/150.000 | | 750k / 150.000 | |
| Vita (Anni) | 15 | | 15 | | 15 | |
| Efficienza energetica nel ciclo di riferimento (%) | 90 | | 90 | | 90 | |
| Autoscarica (72 hr da V _{Max}) | <4% | | <4% | | <4% | |
| V _{Max} / V _{Min} (V _{cc}) | 17/9 | | 48/27 | | 48/27 | |
| Intervallo di temperatura operativa (°C) | -30 a +52 | | -30 a +52 | | -30 a +52 | |
| Massimo peso del sistema (kg) | 5 | | 10 | | 20 | |
| Massimo volume del sistema (L) | 4 | | 8 | | 16 | |
| Prezzo di vendita (\$/sistema @ 100k/anno) | 40 | | 80 | | 130 | |

Tab. 8.10 - Prestazioni di alcuni supercondensatori per applicazioni veicolari

| Costruttore | Tensione nominale (V) | Capacità (F) | ESR (mOhm) (1) | Energia specifica Wh/kg (2) | Potenza specifica (W/kg) (95%) (3) | Massima Potenza specifica (W/kg) |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------|----------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Maxwell** | 2,7 | 2800 | 0,48 | 4,45 | 900 | 8000 |
| ApowerCap | 2,7 | 55 | 4 | 5,5 | 5695 | 50625 |
| Ness | 2,7 | 1800 | 0,55 | 3,6 | 975 | 8674 |
| Ness | 2,7 | 3640 | 0,30 | 4,2 | 928 | 8010 |
| Ness | 2,7 | 5085 | 0,24 | 4,3 | 958 | 8532 |
| Asahi Glass (propylene carbonate) | 2,7 | 1375 | 2,5 | 4,9 | 390 | 3471 |
| Panasonic (propylene carbonate) | 2,5 | 1200 | 1,0 | 2,3 | 514 | 4596 |
| EPCOS | 2,7 | 3400 | 0,45 | 4,3 | 760 | 6750 |
| LS Cable | 2,8 | 3200 | 0,25 | 3,7 | 1400 | 12400 |
| BatScap | 2,7 | 2600 | 0,3 | 3,95 | 1366 | 12150 |
| Power Sys. (carbone attivato, PC) | 2,7 | 1350 | 1,5 | 4,9 | 650 | 5785 |
| Power Sys. (carbone, PC) | 3,3 | 1800 | 3,0 | 8,0 | 825 | 4320 |
| Fuji Heavy Industry-hybrid (AC/C) | 3,8 | 1800 | 1,5 | 9,2 | 1025 | 10375 |

(1) Equivalent Series Resistance = Resistenza interna del supercondensatore

(2) L'energia specifica a potenza costante di 400 W/kg con scarica: $V_{nom} - 1/2 V_{nom}$

(3) Potenza specifica basta su $P=9/16*(1-EF)*V^2/R$, EF= Efficienza di scarica

Eccetto dove esplicitamente indicato, l'elettrolita usato è sempre acetonitrile.

L'attuale disponibilità commerciale e di sviluppo industriale dei supercondensatori è piuttosto ampia.

Nella Tab. 8.10 sono riportate i risultati sperimentali [13] di diversi supercondensatori insieme ad una lista dei principali costruttori.

8.5 Volani (flywheels)

Un volano (flywheel) accumula energia sotto forma di energia cinetica rotazionale di una massa rotante (rotore). L'energia accumulata (E) è data pertanto dalla seguente equazione:

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

dove ω è la velocità rotazionale ed I è il momento di inerzia della massa rotante.

Questi sistemi hanno proprietà interessanti: si possono ricaricare rapidamente (in circa 15 min), hanno una lunga vita (anche se diversi incidenti sono stati riportati), elevate energia specifica (≈ 130 Wh/kg) e potenza specifica ed un'efficienza di carica/scarica intorno al 90%.

La Fig. 8.14 mostra lo schema di un tipico volano (sviluppato anni fa nel progetto europeo PEAKFLY).

Un volano normalmente è costituito da un rotore sospeso da opportuni supporti (i più recenti sono magnetici per ridurre le perdite per attrito e quindi l'autoscarica), connesso ad un motore elettrico/generatore, sia in accoppiamento diretto che in accoppiamento elettromagnetico (per ridurre ancora le perdite).

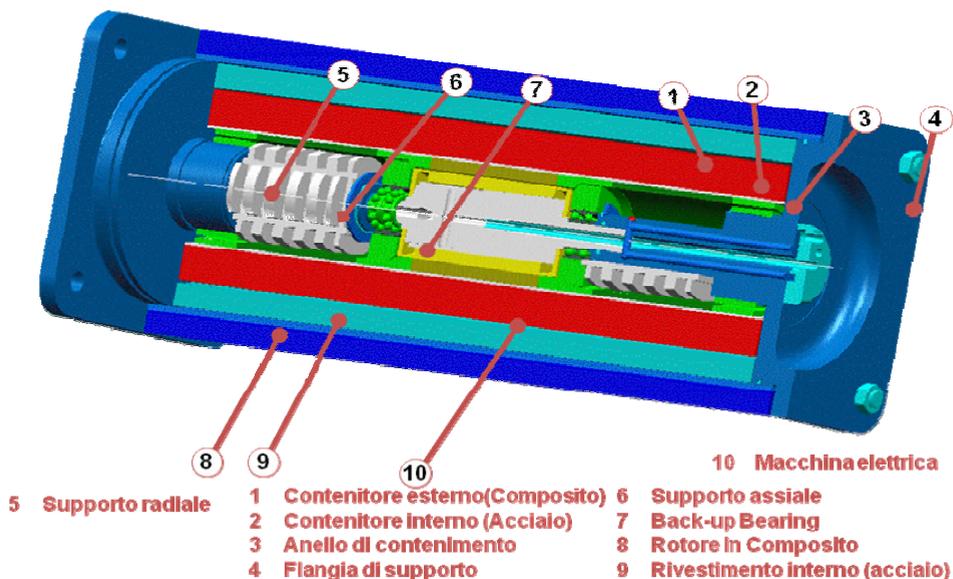


Fig. 8.14 - Schema di massima di un volano (Progetto europeo PEAKFLY)

I materiali utilizzati per il rotore sono i più vari (acciaio, fibre di carbonio, compositi), come pure la geometria del rotore, per garantire un'elevata velocità di rotazione ed un alto momento di inerzia: sono stati sviluppati volani che possono arrivare a velocità fino a 100.000 rotazioni al minuto.

Altri vantaggi sono associati ai volani rispetto alle batterie:

1. Il regime di carica/scarica dipende dall'elettronica e del sistema /motore/generatore.
2. Le prestazioni sono indipendenti dalla temperatura.
3. I materiali utilizzati non hanno un particolare impatto sull'ambiente.
4. Il contenuto energetico si misura facilmente, misurando la velocità rotazionale.

Ci sono, di contro, alcuni problemi fondamentali che ne limitano l'applicazione:

1. Rischio di esplosione (intesa come rilascio rapido dell'intera energia accumulata) della massa rotante in condizioni di malfunzionamento.
2. L'autoscarica che dipende fortemente dalle condizioni di uso.
3. Nelle applicazioni veicolari, l'effetto giroscopico della massa rotante deve essere adeguatamente bilanciata per evitare problemi di scarsa guidabilità del veicolo quando gira, ma può essere un modo per migliorare la stabilità in curva se adeguatamente progettato.

Per queste caratteristiche i volani sono stati utilizzati in alcuni veicoli di grande taglia (la prima applicazione negli anni 50 in un autobus Oerlikon in Svizzera), come mostrato in Fig. 8.15, in cui sono presentate alcune applicazioni veicolari dei volani prodotti dall'olandese CCM.

8.6 Accumulo meccanico (pneumatico)

Negli ultimi anni, l'EPA (Environmental Protection Agency) americano ha promosso lo sviluppo di veicoli ibridi che utilizzano un accumulo idraulico [14]. Il principio di funzionamento di questo sistema di accumulo (che accumula aria compressa a pressioni diverse) si basa su due elementi distinti: serbatoi di accumulo ed un trasformatore (compressore/espansore) che consente di collegare l'aria accumulata (con l'energia associata) con il carico meccanico (generalmente una massa rotante).

CCM Flywheel bus (1998)



Trolleybus 12m, 15 ton (scarico)
Volano: 200 kW/2kWh
Generatore: Motore a GPL 40kW continuativi

ULEV-TAP I Flywheel tram (2001)



Karlsruhe tram 30m, 30 ton (scarico)
Volano: 300 kW/4kWh
Generatore: No. Ricarica da linea aerea

APTS Phileas (2003)



Transporto Intermedio 24m, 23 ton (scarico)
Volano: 300 kW/4kWh
Generatore: Motore a GPL 80kW continuativi

Fraunhofer AutoTram (test vehicle)2003



Transporto Intermedio 18m, 18 ton (scarico)
Volano: 200 kW/4kWh
Generatore: FC 80kW max

Siemens Avanto Light Rail Vehicle.



Multi-system tram ibrido a basso pianale 37m,
60 ton (vuoto)
Volano: 2x250 kW/3kWh
Generatore: 3x200 kW . Motore diesel.



Fig. 8.15 - Esempi di applicazioni di volani della CCM (Olanda)

Quindi la trasformazione da energia meccanica (contenuta nell'aria compressa) ad energia elettrica (per il veicolo ibrido elettrico) richiede almeno due processi di trasformazione (in alcuni casi, per aumentare l'efficienza e la densità di energia del sistema, un processo intermedio da pneumatico ad idraulico con l'inserimento di un liquido tra il serbatoio di aria e la massa rotante del generatore, da cui deriva il nome di accumulo idraulico o pneumatico/idraulico).

La Fig. 8.16 illustra lo schema di funzionamento di tale tipo di accumulatore.

I riscaldamenti e raffreddamenti associati ai processi di compressione ed espansione sono le principali cause di perdite (efficienza di ciclo intorno al 70%), ma i risultati sperimentali eseguiti su un veicolo prototipo (mostrato in Fig. 8.17) hanno evidenziato un aumento dell'efficienza complessiva del veicolo.

Le prestazioni specifiche del sistema di accumulo per serbatoi di acciaio da 250 bar sono ancora limitate: 2 Wh/l e 3,2 Wh/kg. L'adozione di nuovi materiali per i serbatoi e di nuove soluzioni di sistema potrebbe consentire miglioramenti fino a 55 Wh/kg e rendere competitivo questo sistema con le batterie di contenuto energetico superiore a 5 kWh.

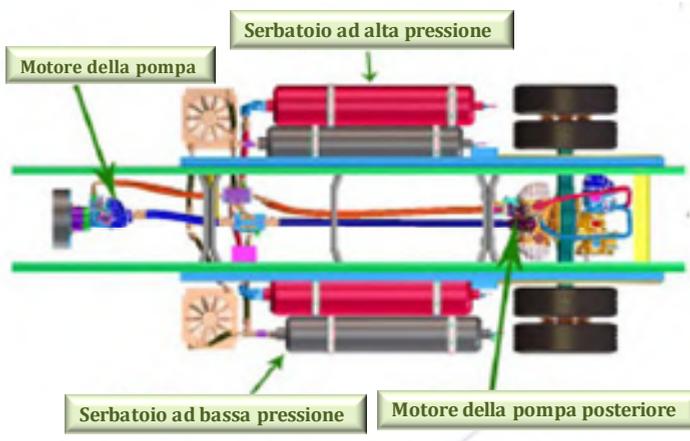


Fig. 8.16 - Schema di funzionamento di un sistema di accumulo idraulico/pneumatico



Fig. 8.17 - Veicolo ibrido sperimentale per la prova di un sistema di accumulo idraulico

8.7 Dispositivi ausiliari

La dipendenza delle prestazioni e del comportamento della batteria da fattori ambientali e dalle condizioni di uso richiede infine interventi di sviluppo non soltanto sulla tecnologia delle batterie, ma anche su quella dei dispositivi di controllo e gestione in grado di ottimizzare il rendimento, la gestione e la vita (caricabatterie intelligenti, indicatori di stato di carica, sistemi di rabbocco automatici e per la gestione termica). La messa a punto di questi dispositivi, con opportune logiche di gestione e controllo, e di opportune metodologie di ricarica è cruciale quanto lo sviluppo delle batterie stesse.

La Fig. 8.18, a titolo puramente esemplificativo, descrive uno schema di massima di un sistema di gestione e controllo con relativo sistema di raffreddamento previsto per una batteria NiMH.

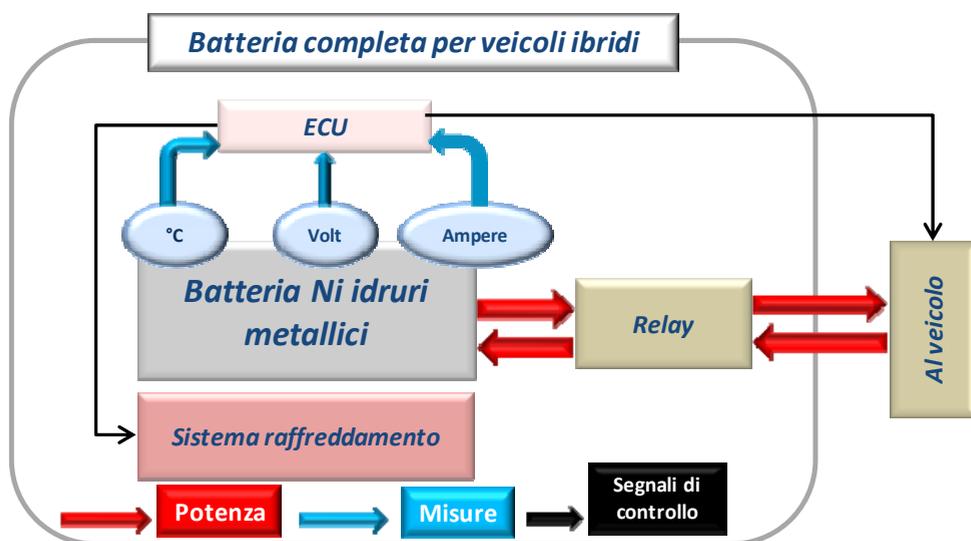


Fig. 8.18 - Schema di massima di un sistema di gestione e controllo (ECU) per una batteria NiMH

8.8 Conclusioni

I sistemi di accumulo di energia elettrica per applicazioni nei veicoli ibridi sono diversi e la scelta è fortemente dipendente dalle caratteristiche del veicolo (principalmente la missione e l'uso prescelto con impatto sulla configurazione adottata) e da quelle dei sistemi di accumulo nonché dai relativi costi di acquisto e gestione.

I sistemi esaminati vanno dalle batterie ai supercondensatori fino ai sistemi di accumulo meccanico.

Tab. 8.11 - Caratteristiche principali dei sistemi di accumulo esaminati

| Tecnologie per l'accumulo | | Caratteristiche principali | | | | | | | |
|---------------------------|--------------|----------------------------|----------|-------------------|---------------------------|------------|---------------------------|--|-----------|
| | | Densità di energia | | Potenza specifica | Vita ciclica | Efficienza | Intervallo di temperatura | Costo per produzione di massa (100 k/anno) | |
| | | [Wh/kg] | [Wh/l] | [W/kg] | numero di cicli @ 80% DoD | [%] | [°C] | [€/kWh] | |
| Piombo | acido libero | 25 -40 | 60 -100 | 140 -350 | 200 -1500 | 70 -75 | 20 -40 | 100 -190 | |
| | VRLA | 30 -40 | 80 -100 | 140 -300 | 300 -1000 | 80 -85 | 20 -40 | 100 -190 | |
| | compresso | 40 -50 | 100 | 140 -250 | 800 -1500 | 70 -85 | 20 -40 | 35 -50 | |
| Alcaline | Ni-Cd | | | | | | | | |
| | Tipo di | potenza | 25 -40 | 130 | 500 | 800 -1500 | 70 -75 | -40 -50 | 400 -1000 |
| | | energia | 40 -50 | 130 | 120 -350 | 800 -1500 | 70 -75 | -40 -50 | 400 -1000 |
| | NiZn | | 60 -80 | 200 -300 | 500 -1000 | 200 -1000 | 60 -65 | 0 -40 | 500 -800 |
| | NiMH | | | | | | | | |
| Tipo di | potenza | 40 -55 | 80 -200 | 500 -1400 | 500 -2000 | 70 -80 | 0 -45 | 400 -2000 | |
| | energia | 60 -80 | 200 -350 | 200 -600 | 500 -2000 | 70 -80 | 0 -45 | 200 -700 | |
| Litio | Li Ione | | | | | | | | |
| | Tipo di | potenza | 70 -130 | 150 -450 | 600 -3000 | 800 -1500 | 85 -90 | -20 -60 | 700 -2000 |
| | | energia | 110 -220 | 150 -450 | 200 -600 | 800 -1500 | 85 -90 | -20 -60 | 150 -600 |
| | Li Polimeri | | 100 -180 | 100 | 300 -500 | 300 -1000 | 90 -95 | -20 -110 | 300 -500 |
| Supercondensatori | Potenza | 3 -5 | 3 -10 | 2000 -10000 | 500k -1M | 95 -100 | -20 -90 | 1700 -2300 | |
| | Energia | 12 -20 | 3 -6 | 2000 -10000 | 500k -1M | 95 -100 | -20 -90 | 1700 -2300 | |
| Volani | Potenza | 1,8 -3,7 | 7 -17 | 100 -1000 | 10k -50k | 90 -95 | -20 -50 | 200 -660 [€/kW] | |
| | Vita | 1 -10 | 3,7 -5,7 | 100 -1000 | 10k -100k | 90 -95 | -20 -50 | 300 -400 [€/kW] | |

La scelta e la conseguente progettazione esecutiva richiedono un'adeguata conoscenza delle caratteristiche tecniche e prestazionali che, di solito, sono disponibili soltanto dopo una lunga e specifica campagna sperimentale. La bibliografia mette a disposizione vari esempi applicativi ad alcune analisi che mettono a confronto i vari sistemi di accumulo.

La Tab. 8.11 riporta i risultati di tali analisi [11].

Limitatamente alle grandezze presentate nel grafico di Fig. 8.1, soltanto le batterie Li-ione e NiMH soddisfano gli obiettivi prestazionali richiesti per le applicazioni di veicoli ibridi elettrici (HEV) e soltanto le batterie Li-ione alle prestazioni del sistema di accumulo nei veicoli ibridi elettrici plug-in (PHEV), nei limiti di peso e volume consentiti da una normale autovettura.

Più recentemente il DOE americano ha presentato, per le sole caratteristiche specifiche di energia e potenza, un grafico (noto come diagramma di Ragone) di alcuni dei sistemi di accumulo più interessanti per i veicoli ibridi (Fig. 8.19) [15].

In realtà la situazione reale è molto più complessa ed il pieno soddisfacimento dei obiettivi tecnici ed economici relativi a nuovi sistemi di accumulo richiede sostanziali miglioramenti in termini di affidabilità (sicurezza e vita) ed in termini di costi dei sistemi analizzati.

Nell'analisi di tutti i sistemi di accumulo, non bisogna infine trascurare le necessità di gestione e controllo sia termico che funzionale che deve essere sempre inclusa nell'analisi tecnica ed economica, insieme ad una valutazione di disponibilità e di impatto ambientale.

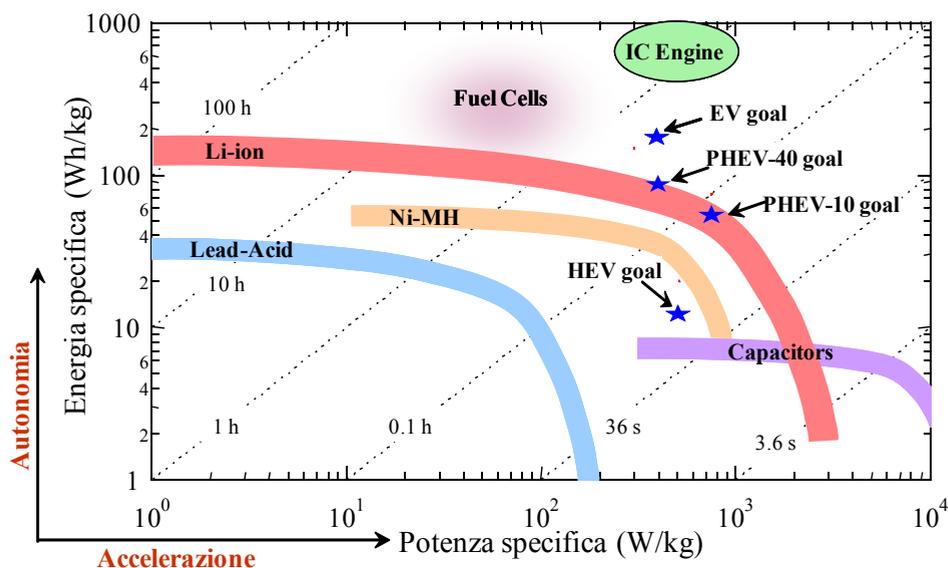


Fig. 8.19 - Confronto dei vari sistemi di accumulo (dati dei costruttori) per veicoli ibridi rispetto agli obiettivi fissati dal DOE [15]

Bibliografia

1. U.S. Department of Energy Office of Vehicle Technologies, *Progress Report for Energy Storage Research and Development – FY 2008*, Gennaio 2009.
2. A. Cooper, M. Kellaway, *Advanced Lead-Acid – the New Battery System for Hybrid Electric Vehicles*, EET-2008 European Ele-Drive Conference, International Advanced Mobility Forum, Ginevra, Marzo 11-13, 2008
3. A.Cooper, M. Kellaway, B. Bonnet, J. Marco, N. Vaughan. *The demonstration of new generation lead-acid batteries in hybrid electric vehicles*, EET- 2007, Brussels, Maggio 2007.
4. D. Linden, T. Reddy, *Handbook of Batteries*, 3rd ed., McGraw Hill, New York, 2002.
5. Beccu, Klaus D., Fetcenko, Michael A., *From Metal-hydride Batteries to Hybrid Vehicles*, International Advanced Mobility Forum, Geneva, Switzerland, EET-2008 European Ele-Drive Conference, Marzo 11 – 13, 2008.
6. Office of Basic Energy Sciences-Department of Energy, *Report of the Basic Energy Sciences Workshop for Electrical Energy Storage*, Aprile 2007.
7. A. Burke, M. Miller E. Van Gelder, *Ultracapacitors and Batteries for Hybrid Vehicle Applications*, Electric Vehicle Symposium – 23, Anaheim, California, Dicembre 2007.
8. P. Nelson et al., *Advanced Lithium-Ion Batteries for Plug-In Hybrid-Electric Vehicles*, Electric Vehicle Symposium 23, Anaheim, CA, Dicembre 2-5, 2007.
9. S. Ito, *EVS 22 Plug-in Hybrid Electric Vehicle Workshop*, Yokohama, Ottobre 2006.
10. G. Clerici, M. Conte, *I Supercondensatori*, L'Elettrotecnica, Vol. LXXVIII, Novembre 1991.
11. Autori vari, *Status Overview of Hybrid and Final report Phase III, Annex VII, IA-HEV, Electric Vehicle technology*, Rapporto Finale, IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia), Dicembre 2007.
12. K. Naoi, P. Simon, *New Materials and New Configurations for Advanced Electrochemical Capacitors*, The Electrochemical Society *Interface*, Primavera 2008.
13. A. Burke, M. Miller, E. Van Gelder, *Ultracapacitors and Batteries for Hybrid Vehicle Applications*, Electric Vehicle Symposium 23, Anaheim, CA, Dicembre 2-5, 2007.
14. EPA (US Environmental Protection Agency), *Developing Cleaner and More Efficient Vehicles and Engines for Tomorrow*, Clean Automotive Technology Program, Progress Report, 2006.
15. T. Q. Duong, *Challenges in Developing Batteries for PHEV Applications*, 1st International Conference on Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications, Argonne National Laboratory, Chicago, Settembre 15, 2008.

APPENDICE

Capacità

La capacità di un accumulatore elettrochimico è normalmente misurato in amperora (Ah) e corrisponde alla carica elettrica accumulata e disponibile durante la scarica. La capacità è una caratteristica dinamica degli accumulatori che deve essere definita insieme alle condizioni operative in cui viene misurata o a cui si riferisce. La capacità dipende infatti dalle modalità in cui la batteria viene scaricata, dalla temperatura e da altre condizioni operative. Infatti, ad esempio, la capacità di un accumulatore che viene scaricato in 1 ora è molto inferiore a quella dello stesso accumulatore scaricato in 20 ore.

La Fig. 8.20 mostra appunto come varia la capacità di uno stesso accumulatore (in questo caso al litio, ma il comportamento è analogo anche per altri accumulatori elettrochimici) in funzione del regime di scarica (da 1 C a 18 C), dato come multiplo della sua capacità nominale C.

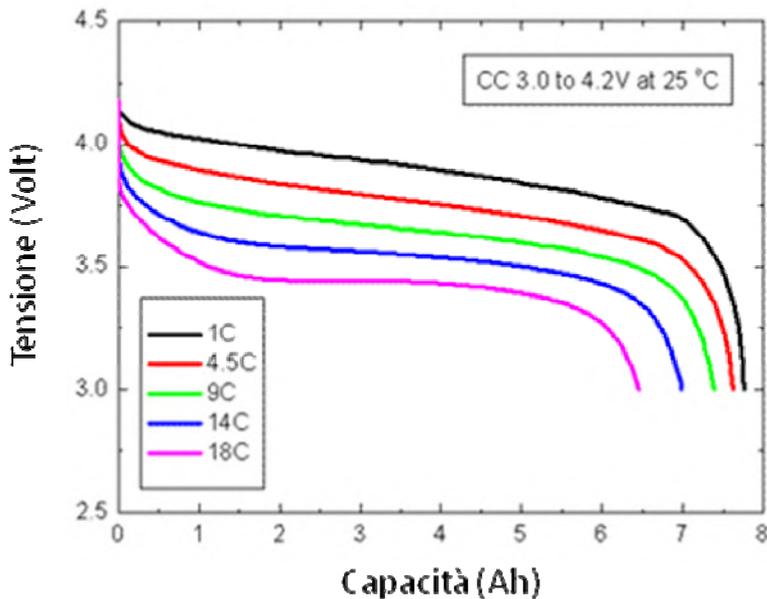


Fig. 8.20 - Capacità di un accumulatore elettrochimico in funzione del regime di scarica

Energia specifica

La quantità di energia (solitamente si parla di capacità intesa come carica elettrica in Amperora) accumulata nella batteria per unità di massa (o di volume) è strettamente correlata all'autonomia effettiva del veicolo ed è, di gran lunga, il fattore più limitante le prestazioni di un veicolo elettrico rispetto ad uno convenzionale a motore termico (l'energia specifica si misura in kWh/kg). Ba-

sti pensare che 1 kg di benzina contiene oltre 12 kWh contro circa 0,1 kWh in un kg della migliore batteria attuale.

È evidente quindi che, per fornire un'accettabile autonomia, il peso della batteria deve costituire una parte consistente dell'intero peso del veicolo (fino al 25-30% per un veicolo elettrico solo a batteria) con evidenti riflessi sul progetto del telaio e della componentistica di sicurezza (freni, sospensioni).

Un aspetto importante da evidenziare è che la densità di energia non è un parametro assoluto, univocamente definito da un numero, ma dipende dalle modalità (dalla corrente di scarica) e dalle condizioni (temperatura, vita della batteria) in cui l'energia viene erogata, esattamente come avviene per la capacità.

Potenza specifica

L'accelerazione e la capacità di superare dislivelli da parte del veicolo dipendono dalla potenza del motore e quindi dalla potenza erogabile dalla batteria. Questo parametro non penalizza le prestazioni dei veicoli elettrici rispetto a quelli convenzionali: questo anche in virtù delle caratteristiche di spunto dei motori elettrici. L'aspetto critico è rappresentato dalla stretta correlazione tra potenza specifica ed energia specifica: la potenza di scarica incide in maniera decisiva sull'effettiva energia utile disponibile dalla batteria. Questa relazione è dimostrata nella Fig. 8.1, che mette a confronto diversi tipi di batterie e indica energia e potenza richiesta per le diverse tipologie di veicoli elettrici e ibridi, correlate alla durata tipica delle fasi di scarica a potenza costante.

Vita ciclica

La durata di vita di una batteria è un parametro normalmente misurato in numero di cicli profondi (le norme precisano che è il numero di volte che l'accumulatore riesce a scaricarsi all'80% della sua capacità e riesce a ricaricarsi fino ad un valore non inferiore all'80% della stessa capacità).

Questo parametro incide in maniera rilevante sul costo di acquisto e su quelli di esercizio di un veicolo elettrico. Solitamente le batterie durano meno del veicolo (a batteria), contrariamente a quanto avviene per il serbatoio delle auto convenzionali, per cui va previsto un costo aggiuntivo ai normali consumi di energia elettrica. Nel caso di batterie per veicoli elettrici ibridi, oggi le batterie sono garantite per 8 anni di servizio.

La vita di una batteria è un parametro estremamente variabile ed è fortemente condizionato dalle condizioni di uso; una progettazione ottimale del sistema di accumulo non sempre si traduce in una massimizzazione della sua vita se non correlato, per esempio, a precise modalità di ricarica e di manutenzione: una ricarica non ottimizzata può ridurre a meno della metà la vita ciclica.

Rendimento energetico

Questo parametro tiene conto di alcuni fenomeni tipici dei sistemi di alimentazione dei veicoli elettrici a batteria (infatti per i veicoli convenzionali il rendimento energetico del serbatoio è il 100%): rendimento di scarica, rendimento di carica, gassificazione (per i sistemi ad elettrolita acquoso), aut scarica, condizionamento termico (sistemi operanti ad alta temperatura) ecc. È evidente l'influenza sui consumi e quindi sui costi di esercizio. Mediamente i rendimenti energetici di un ciclo completo di carica/scarica delle batterie sono compresi tra il 50 e l'85%.

Costi

L'incidenza economica del sistema di alimentazione per i veicoli elettrici è di gran lunga più rilevante di quella dei veicoli convenzionali. Infatti la batteria incide sia sul costo di acquisto del veicolo che sui costi di gestione. Il costo iniziale della batteria è certamente la voce più gravosa che differenzia il costo iniziale di un veicolo elettrico da quello convenzionale. Tale differenza varia molto con il tipo di batteria, ma non è mai trascurabile.

Attualmente i costi di acquisto delle varie batterie dipendono da vari fattori: la disponibilità ed il costo delle materie prime (il sodio e lo zolfo costano meno del piombo e molto meno del nichel e del litio), l'incidenza del processo produttivo e della scala di produzione.

I costi di gestione di un veicolo elettrico sono molto legati alle batterie:

- i costi di esercizio dipendono dalle tariffe elettriche e dal costo di sostituzione delle batterie durante la vita del veicolo;
- i costi di manutenzione sono funzione del tipo di batteria: le batterie ad elettrolita acquosa richiedono il rabbocco di acqua distillata, altre ad alta temperatura il controllo della corrosione e del mantenimento in temperatura ecc.

Un più serio ed accurato confronto tra i costi delle varie batterie deve tener conto delle diverse caratteristiche prestazionali (durata, rendimento) e non solo del costo unitario (costo/kWh accumulato). L'analisi normalmente utilizzata per questo confronto è il "life-cycle cost analysis". In questo modo è possibile verificare l'incidenza sul costo chilometrico di veicoli elettrici con diversi tipi di batterie e confrontarlo con quello dei veicoli convenzionali.

Ricarica delle batterie

La ricarica della batteria è certamente il maggiore ostacolo ad una larga diffusione dei veicoli elettrici presso una più ampia fascia di utenza comprensiva dei normali acquirenti di automobili. I lunghi tempi necessari per effettuare la ricarica di una batteria (attualmente 6-8 ore) e la necessità di adeguate infra-

strutture per compiere tale operazione determinano comprensibili perplessità tra gli utilizzatori.

Per aumentare i tempi di utilizzabilità effettiva dei veicoli sono adottate diverse soluzioni: ricarica rapida (anche parziale detta pertanto di *biberonaggio*, della durata di frazioni di ore) che consente di estendere la percorrenza tra due ricariche lente (eseguite normalmente di notte senza sostanziali modifiche delle infrastrutture elettriche esistenti); sostituzione meccanica delle batterie presso stazioni di ricarica attrezzate (l'operazione si può compiere in pochi minuti ma impone l'uso di veicoli standardizzati, di attrezzature e di personale dedicati); esiste anche una terza soluzione, molto vicina alla seconda, che si basa sull'uso di batterie ricaricabili meccanicamente (alluminio-aria, attualmente in fase di sviluppo), in cui vengono sostituiti gli elettrodi consumati presso le normali stazioni di servizio.

Sicurezza ed impatto ambientale

La sicurezza nell'uso e nella produzione, come pure il possibile inquinamento derivante dalla produzione e dal riciclaggio delle batterie, sono elementi certamente importanti nell'individuazione delle potenzialità applicative delle diverse batterie nei veicoli elettrici. Il sodio e lo zolfo, se vengono a contatto, reagiscono violentemente (le celle e le batterie sodio-zolfo sono realizzate in modo da rendere trascurabile l'effetto di questo evento); il litio deve essere manipolato in ambiente anidro (la camera secca è una normale dotazione in diversi impianti produttivi e di ricerca) ed i sistemi al litio sono particolarmente sensibili alle sovraccariche che possono infiammare l'accumulatore (ci sono fusibili di protezione); il piombo ed il cadmio sono metalli pericolosi (il cadmio è molto tossico), ma esistono processi di recupero estremamente efficienti, economicamente convenienti e sicuri per l'ambiente.

CAPITOLO 9

LE CELLE A COMBUSTIBILE

Stefano Galli, Alfonso Pozio

ENEA, Tecnologie per l'Energia, Fonti Rinnovabili e Risparmio Energetico

9.1 Introduzione

La prima cella a combustibile fu realizzata da W. Grove nel 1839 utilizzando elettrodi di platino ed acido solforico in qualità di elettrolita. Fu W.W. Jacques nel 1890 che conì il termine Cella a Combustibile e sostituì l'acido solforico con il fosforico. Questi primi dispositivi erano tuttavia caratterizzati da un basso rendimento e solo dopo il 1930 Francis Bacon sviluppò a Cambridge una cella a combustibile capace di produrre una densità di corrente pari a 1000 mA/cm² a 0,8 Volt. Poiché il platino era molto costoso, Bacon decise di utilizzare un elettrodo in nichel in un elettrolita alcalino. Dovette lavorare fino al 1959 per perfezionare il suo progetto oggi noto con l'acronimo AFC (Alcaline Fuel Cells), dimostrandone l'efficacia con una saldatrice alimentata da una Cella a Combustibile da 5 kW.

Nei primi anni 60, la General Electric, basandosi sui principi della "Cella Bacon" produsse un sistema di generazione d'energia elettrica basato sulle Celle a Combustibile, per le navicelle spaziali Gemini ed Apollo della NASA.

A partire dagli anni 60 furono sviluppati nuovi tipi di celle utilizzando sostanze elettrolitiche in grado di operare ad alte temperature, le Celle a Combustibile ad Elettrolita Polimerico (PEFC: *Polymer Electrolyte Fuel Cell*).

Le prime celle usavano molti tipi di membrane incluse fenolformaldeide solfonata (programma Gemini) e composti polivinilici. Tuttavia nelle prime PEFC il tempo di vita era limitato dalla degradazione ossidativa dell'elettrolita polimerico. I polimeri idrocarburici sono instabili a causa della scissione dei legami C-H, in modo particolare quelli relativi agli idrogeni in posizione alfa, dove sono inseriti i gruppi funzionali. Quando questi polistireni furono rimpiazzati da polistireni sostituiti con fluoro (acido solfonico del politrifluorostirene) la vita delle PEFC aumentò di circa cinque volte. Tuttavia la temperatura operativa delle PEFC con il polistirene sostituito con fluoro, era limitata a valori inferiori a 75 °C.

Le ricerche iniziate negli anni 60 portarono allo sviluppo del Nafion® (marchio registrato dalla Dupont de Nemours per le membrane di perfluorocarbonsolfonato); si tratta di membrane di acidi perfluorosolfonici che sono elettrochimicamente stabili nelle PEFC fino a temperature superiori a 100 °C. Rispetto agli altri tipi di Cella a Combustibile le PEFC godono di alcuni vantaggi tra i quali:

- bassa temperatura di funzionamento ($70\div 90\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- elettrolita che impedisce il passaggio di gas
- elettrolita non volatile
- problemi minimi riguardo la corrosione (assenza di liquidi corrosivi)
- alta resistenza ad elevate differenze di pressione
- cinetica elettrodica di ossidazione dell' H_2 veloce ($\eta=20\text{ mV}$ a 2 A/cm^2)
- cinetica elettrodica di riduzione dell'ossigeno rapida
- densità di potenza elevate ($\sim 1\text{ W/cm}^2$).

A fronte di queste caratteristiche positive vi sono però una serie di svantaggi che hanno limitato fino ad oggi fortemente le possibilità di industrializzazione. In particolare:

- alto contenuto di Pt (costoso) come catalizzatore
- l'anodo di Pt viene avvelenato dal CO
- problemi di gestione dell'acqua prodotta all'interno della membrana
- costo delle membrane ($\sim 250\text{ }/\text{m}^2$ per una membrana di Nafion 112)
- l'idrogeno è l'unico combustibile adatto per l'ossidazione diretta su platino
- prestazioni a lungo termine da dimostrare
- instabilità delle membrane ad alta temperatura
- degradazione materiali (elettrocatalizzatore, membrana, piatti).

9.2 Generalità sul funzionamento della cella a combustibile polimerica

Forniamo prima di tutto una descrizione generale della cella ad elettrolita polimerico, sottolineando le caratteristiche fondamentali dei materiali utilizzati nel caso di celle a combustibile alimentate ad idrogeno [1].

La Fig. 9.1 è una rappresentazione schematica di una sezione laterale di una singola cella ad elettrolita polimerico (PEFC). Questo schema verrà utilizzato per descrivere i materiali ed i processi fondamentali in una PEFC.

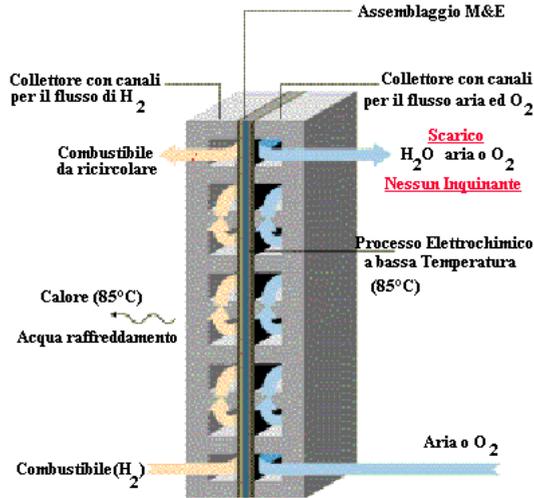
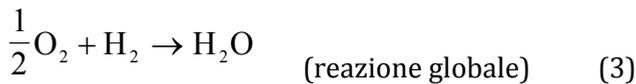


Fig. 9.1 - Sezione laterale di una PEFC

9.2.1 Termodinamica

In una PEFC avvengono le seguenti semi-reazioni:



L'acqua prodotta è normalmente liquida per le condizioni di cella (temperatura minore di 100 °C e pressione uguale o maggiore di quella atmosferica).

All'equilibrio si instaura una tensione ΔV fra i due elettrodi. Il lavoro utile che un sistema può compiere durante una trasformazione è dato dalla diminuzione della sua energia libera G :

$$-\Delta G = L_{\text{utile}} \quad (4)$$

In condizioni di equilibrio, a temperatura e pressione costanti, vale l'equazione:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (5)$$

dove ΔH è la variazione di entalpia della reazione (3), ΔS quella di entropia e T la temperatura assoluta della stessa.

Dato che $L_{\text{utile}} = nFE$, dove F è la costante di Faraday (96486 J/mole V), n il numero di moli di elettroni, ed E la differenza di potenziale tra i due elettrodi, si ha allora:

$$-\Delta G = nFE \quad (6)$$

Da questa equazione e dalla definizione dell'energia libera di Gibbs

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad (7)$$

deriva l'equazione di Nernst che, applicata ad una PEFC, dà:

$$E = 1.229V + \frac{RT}{2F} \ln \left[P_{H_2} \left[P_{O_2} \right]^{1/2} \right] \quad (8)$$

in cui P_{H_2} e P_{O_2} sono rispettivamente le pressioni parziali di idrogeno ed ossigeno nelle correnti anodiche e catodiche.

La corrente ottenibile a seconda del grado di avanzamento r della reazione è data, secondo la legge di Faraday, da:

$$i = nFr \quad (9)$$

All'equilibrio il grado di avanzamento r della reazione in ambedue i sensi è uguale, cioè le due reazioni (diretta e inversa) producono correnti di grandezza uguale ed opposte in segno. Questa intensità di corrente è chiamata densità di corrente di scambio all'equilibrio i_0 (mA/cm²).

A 300 °K ($\Delta H^\circ = -241,8$ kJ/mole, $\Delta G^\circ = -228,4$ kJ/mole) la differenza di potenziale idealmente ottenibile in condizioni standard è di 1,229 V.

L'influenza della temperatura e della pressione sul potenziale in una cella reversibile dipende dal tipo di reazione; infatti, noto che per una reazione reversibile $\Delta G = VdP - SdT$, dall'equaz. (6), si ricava che a $P =$ costante

$$E = -\frac{\Delta H}{nF} + T \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_P \quad (10)$$

dove $(\partial E / \partial T)_P = \Delta S / nF$. Per cui, se $\Delta S < 0$, come nella reazione (3), il potenziale di cella decresce al crescere di T (Fig. 9.2).

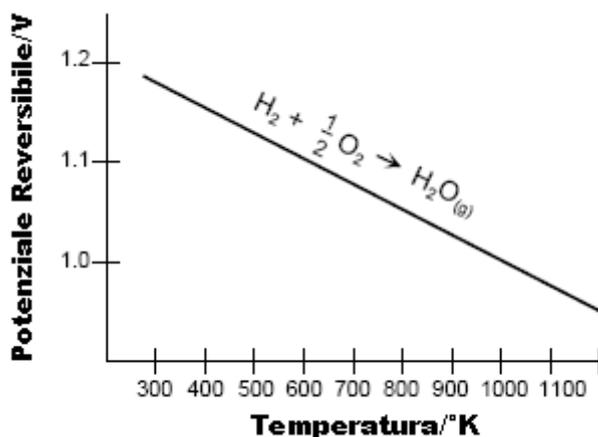


Fig. 9.2 - Potenziale ideale H_2/O_2 vs. temperatura

Viceversa se $T = \text{cost}$, $(\partial E/\partial P)_T = -\Delta V/nF$; per cui, se $\Delta V < 0$ come nella reazione (3), il potenziale aumenta al crescere della pressione. Anticipiamo che, per aumentare la potenza di una cella a parità di altre condizioni, una delle soluzioni adottate è proprio aumentare la pressione di funzionamento.

9.2.2 Cinetica

I fenomeni cinetici, che intervengono nel funzionamento della cella riducendone la potenza erogabile rispetto al valore teorico, sono riassunti sotto il concetto di polarizzazioni (o sovrapotenziali o sovravoltaggi). La polarizzazione totale può ritenersi la somma di almeno tre fenomeni distinti.

La POLARIZZAZIONE DI ATTIVAZIONE (η_{att}) rappresenta la barriera energetica che deve essere superata affinché le reazioni possano aver luogo. Questa energia di attivazione è collegata alla corrente i dall'equazione di Tafel:

$$\eta_{att} = a + b \log(i) \quad (11) \quad \text{ossia} \quad i = i_0 e^{\frac{2.3\eta_{att}}{b}} \quad (12)$$

dove i_0 è la corrente di scambio. L'equazione di Tafel descrive il fenomeno sia all'anodo sia al catodo della cella a combustibile, ed i parametri a e b sono ricavabili da dati sperimentali. La polarizzazione di attivazione si riferisce allo stadio lento della reazione.

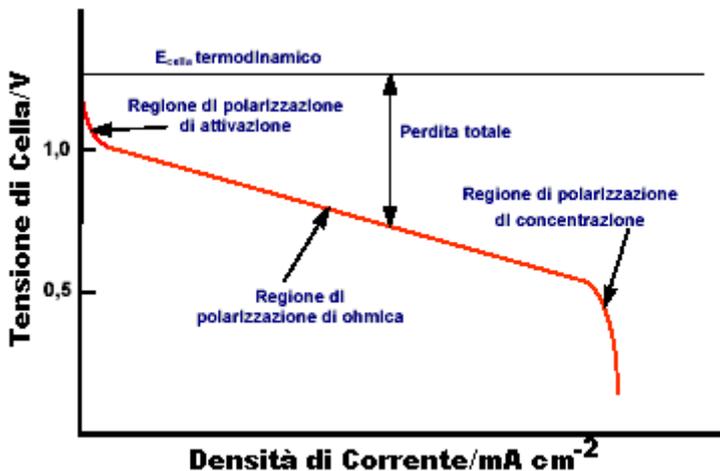


Fig. 9.3 - Curva caratteristica tensione/densità di corrente

La POLARIZZAZIONE OHMICA (η_{ohm}) rappresenta le perdite dovute alla legge di Ohm, cioè alla resistenza alla conduzione:

- degli ioni attraverso l'elettrolita;
- degli elettroni attraverso gli elettrodi;
- dei contatti elettrodi-circuito esterno.

La polarizzazione ohmica può essere considerata direttamente proporzionale ad i , ovvero

$$\eta_{ohm} = iR \quad (13)$$

dove R è la resistenza interna totale espressa in ohm.

La POLARIZZAZIONE DI CONCENTRAZIONE (η_{conc}) è dovuta all'azione ostativa di fenomeni di trasporto di massa. Nel caso della polarizzazione di concentrazione, il fattore controllante può essere:

- la diffusione del gas nell'elettrodo poroso;
- la solubilità dei reagenti o dei prodotti nell'elettrolita;
- la diffusione da e verso i siti di reazione.

L'ultima voce, in particolare, è predominante alle densità di corrente normalmente utilizzate (0,4-0,6 A/cm²). Quando, però, la conversione dei reagenti si avvicina al 100% le concentrazioni dei reagenti calano bruscamente e i fenomeni diffusivi agli elettrodi divengono predominanti. Questa situazione si manifesta con un calo repentino di tensione in corrispondenza di un valore di corrente detto corrente limite (i_L).

La corrente limitante si può calcolare dalla legge di Fick:

$$i_L = \frac{DnFC_B}{X} \quad (14)$$

dove D = coefficiente di diffusione degli ioni reagenti, n = numero di elettroni che partecipano alla reazione, F = costante di Faraday, C_B = concentrazione della specie elettroattiva, X = spessore dello strato di diffusione.

Per un elettrodo privo di polarizzazione di attivazione (cioè quando la reazione è molto veloce), la polarizzazione di concentrazione è

$$\eta_{conc.} = \frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (15)$$

Alla luce di quanto esposto la tensione effettiva di cella può ritenersi pari a:

$$V_{cella} = V_{catodo} - V_{anodo} - Ri = E_{catodo} - \eta_{catodo} - (E_{anodo} - \eta_{anodo}) - Ri \quad (16)$$

dove η_{anodo} ed η_{catodo} sono la somma delle polarizzazioni di attivazione e concentrazione al catodo ed all'anodo.

In una cella reale, contrariamente ad una cella ideale reversibile, un aumento di temperatura comporta, in genere, un aumento di tensione. Ciò è dovuto a vari fattori:

1. aumenta la velocità di reazione, ovvero la cinetica dei processi elettronici.
2. aumenta il trasferimento di massa.
3. aumenta la conducibilità ionica.

In sostanza, si riducono le polarizzazioni. Tuttavia va osservato che l'impatto della temperatura sulla resistenza di cella è differente secondo il materiale utilizzato. Per i metalli, la resistenza di solito aumenta con la temperatura, mentre per conduttori ceramici diminuisce esponenzialmente (legge di Arrhenius). Per gli elettroliti acquosi, l'impatto è limitato, sebbene le alte temperature portino alla disidratazione e perdita di conducibilità.

La polarizzazione può essere minimizzata con accorgimenti costruttivi ma non annullata.

La polarizzazione di concentrazione, dipendendo dalle proprietà di trasporto di massa, può essere limitata agendo su temperatura, pressione e concentrazione, proprietà fisiche e struttura degli elettrodi e dell'elettrolita.

La polarizzazione di attivazione invece dipende in pratica dal tipo di catalizzatore utilizzato, dalla sua disposizione e dalla temperatura.

9.2.3 Prestazioni energetiche

L'EFFICIENZA TERMODINAMICA è definita come:

$$\varepsilon_{th} = \frac{L_{utile}}{\Delta H} \quad (17)$$

e può essere espressa, dalla (4), come il rapporto tra il massimo lavoro elettrico ottenibile e l'energia totale disponibile:

$$\varepsilon_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (18)$$

Il valore di questo rapporto esprime in pratica il massimo rendimento di conversione energetica ottenibile da una cella a combustibile, operante reversibilmente in certe condizioni di temperatura e pressione. Si noti che non tutta l'energia chimica del combustibile ($\Delta H_o = -57.80 \text{ kcal / mole}$) è disponibile per la conversione in energia elettrica a causa del calore prodotto irreversibilmente (TAS). In condizioni standard (25 °C e 1 atm) il rendimento di una cella ideale che opera con idrogeno e ossigeno puri è pari all'83% o al 94,5%, a seconda se l'acqua prodotta sia allo stato liquido o gassoso.

EFFICIENZA DI TENSIONE. Nel caso in cui la cella eroga corrente elettrica, la tensione di cella (V) è minore della tensione (E_{rev}) che si avrebbe a circuito aperto. Si definisce efficienza di tensione il rapporto fra la tensione sotto carico e la tensione reversibile calcolabile alle stesse condizioni di temperatura e pressione:

$$\varepsilon_V = \frac{V}{E_{rev}} \quad (19)$$

Questa quantità esprime l'entità delle polarizzazioni.

EFFICIENZA DI CORRENTE. La corrente elettrica prodotta da una reazione può essere definita dalla legge di Faraday:

$$i_F = i_{max} = n F \, df/dt \quad (20)$$

in cui df/dt è la velocità con cui si consumano le specie reagenti (moli/s).

La corrente effettivamente erogata dalla cella è minore della i_{max} ed è collegata alla quantità di combustibile realmente consumato:

$$i = n F (df/dt)_{cons} \quad (21)$$

Si definisce efficienza di corrente il rapporto:

$$\varepsilon_I = \frac{i}{i_F} \quad (22)$$

La cosiddetta **EFFICIENZA ELETTRICITÀ** della cella a combustibile è data dal prodotto delle precedenti efficienze ed esprime il rendimento di questo dispositivo nella conversione di energia chimica in energia elettrica.

$$\varepsilon_E = \varepsilon_{th} \varepsilon_V \varepsilon_I = \frac{\Delta G}{\Delta H} \cdot \frac{V \cdot i}{E_{rev} \cdot i_F} \quad (23)$$

Questi parametri sono utili nella valutazione delle prestazioni della sola sezione di generazione della potenza (*stack*) in quanto non tengono conto dell'interazione con le altre sezioni che compongono il sistema cella a combustibile (ausiliari, recuperi di calore, inverter ecc.).

9.3 I componenti della cella a combustibile

La cella a combustibile ad elettrolita polimerico è costituita, generalmente, dei seguenti elementi, nel seguito descritti:

- assemblato membrana/elettrodo (MEA: *Membrane Electrode Assembly*)
- piatti bipolari
- piatti bipolari finali
- elementi per il raffreddamento (dove presente)
- collettori di corrente (dove presenti)
- organi di tenuta
- piatti terminali con tiranti
- umidificatori interni (dove presenti).

9.3.1 L'assemblaggio membrana/elettrodo (MEA)

Il cuore di una cella, che nella Fig. 9.4 è stato ingrandito, è l'assemblato membrana-elettrodo (MEA). Nella sua forma più semplice, l'elettrodo è costituito da un film sottile (spessore 5-50 μm) che contiene un catalizzatore finemente disperso costituito da particelle di platino supportate su polvere di carbone.

Questo strato catalitico è in intimo contatto con una membrana ovvero un foglio di polimero conduttore di ioni H^+ che è rappresentato nella parte centrale dello schema di Fig. 9.4, e che ha la duplice funzione di elettrolita e di separatore di gas nella cella. Lo spessore della membrana polimerica è compreso tra 50-175 μm .

L'assemblaggio MEA consiste dunque di una membrana posta tra due sottili strati catalitici. Appare chiaramente che il MEA ha la struttura tipica di una cella elettrochimica: elettrodo/elettrolita/elettrodo, impacchettati come in un panino in una struttura di tre strati sottili. Il diffusore di gas o strato posteriore che è in contatto immediato con lo strato catalitico è costituito da un supporto di carbone poroso (*carbon paper*) o di tessuto (*cloth*) di carbone ricoperto da uno strato di carbone miscelato con un agente idrofobizzante (politetrafluoroethylene, PTFE) e rappresenta lo strato diffusivo [2, 3].

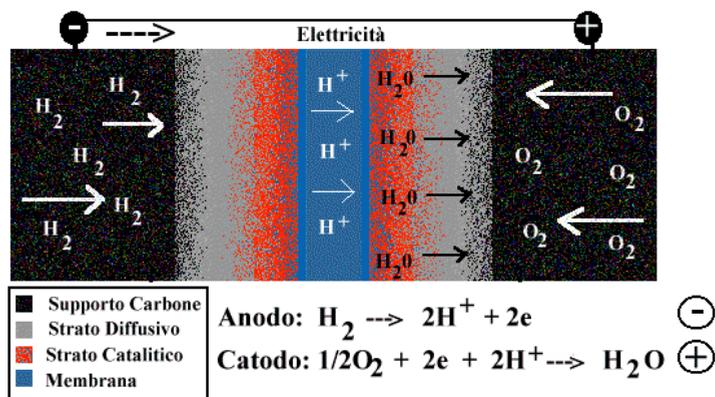


Fig. 9.4 - Assemblaggio membrana/elettrodo (MEA)

Il supporto di carbone rivestito con lo strato diffusivo ha uno spessore che oscilla tipicamente tra 100-300 μm . Il ruolo di questi diffusori di gas è quello di rendere possibile l'accesso dei gas reagenti, idrogeno ed ossigeno, in maniera diretta ed uniforme agli strati catalitici senza dover passare attraverso strati di acqua liquida che potrebbero formarsi in seguito alla reazione elettrochimica. La singola cella è completata da piastre che fungono da collettori di corrente (Fig. 9.5). Le piastre sono lavorate in modo da realizzare canali attraverso cui il gas può diffondere distribuendosi così in maniera uniforme su tutta la superficie degli elettrodi.

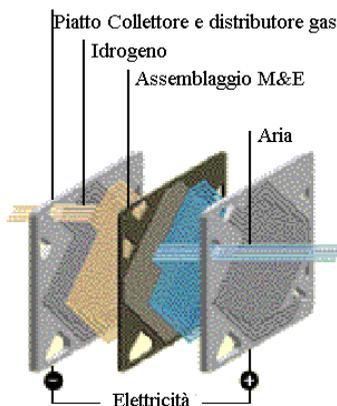


Fig. 9.5 - Schema dell'assemblaggio membrana/elettrodo + collettori

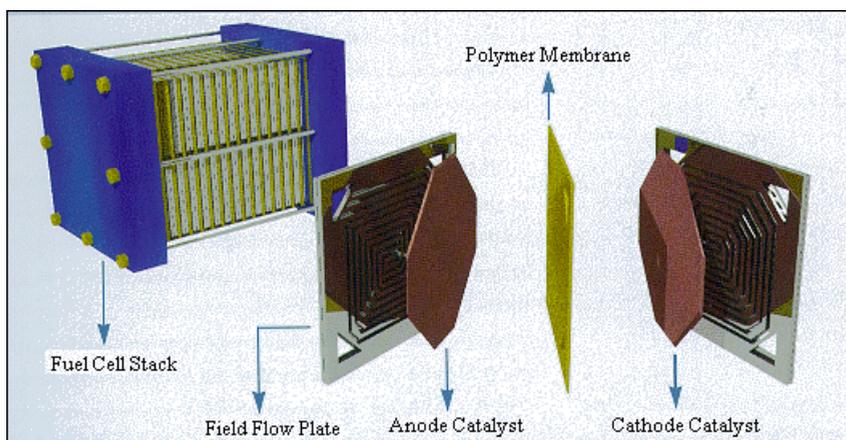


Fig. 9.6 - Stack di SPFC e singolo elemento

Queste piastre, tradizionalmente fabbricate utilizzando grafite ad alta densità, diventano dei piatti bipolari quando invece di avere singoli assemblaggi, si utilizzano moduli composti da molti assemblati MEA (Fig. 9.6). In tal caso i canali di flusso dei gas verranno realizzati su entrambe le facce della piastra.

In uno stack di celle a combustibile vengono accoppiate in serie molte celle singole in modo da generare la tensione richiesta per l'applicazione specifica. Infatti il singolo assemblaggio alimentato con idrogeno ed ossigeno ha una tensione operativa di circa 0,7 V.

9.3.2 L'elettrocatalizzatore

Riprendendo il discorso sull'assemblato MEA, l'ingrandimento di Fig. 9.4 mostra l'elemento centrale di una PEFC che è costituito da una membrana a conduzione protonica con uno strato costituito da un catalizzatore composito su entrambi i lati della membrana stessa.

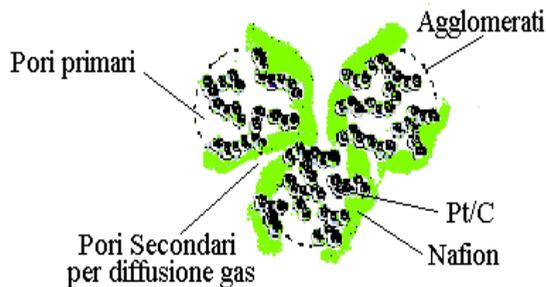


Fig. 9.7 - Struttura dello strato catalitico

Il catalizzatore è costituito da una polvere di carbone con un diametro medio di 10 nm su cui sono adsorbite particelle di Pt di diametro medio di circa $2\div 3$ nm [4]. Il Pt rappresenta un ottimo catalizzatore per le semireazioni elettrochimiche di riduzione dell'ossigeno e di ossidazione dell'idrogeno che avvengono all'interno di una cella a combustibile (1-3). Affinché il catalizzatore sia realmente efficace è necessario che la polvere di Pt/C sia intimamente miscelata con la forma ionomerica della membrana polimerica in modo tale da assicurare una adeguata conduzione ionica tra lo strato catalitico e la membrana stessa. Esiste una ben definita quantità di ionomero necessaria ad ottenere la massima prestazione che è correlata alla quantità di catalizzatore utilizzato [5]. L'elettrocatalizzatore risulta pertanto composto da una miscela di Pt/C/ionomero, in cui ognuno dei tre componenti è uniformemente distribuito nello strato catalitico stesso (Fig. 9.7).

Una PEFC viene alimentata con H_2 ed aria. Per l'applicazione nell'autotrazione l'idrogeno potrebbe essere prodotto con processi di reforming di idrocarburi o alcoli che come sottoprodotto di reazione generano il monossido di carbonio (CO). È noto [6] che la presenza di CO, anche a livelli di ppm, avvelena i siti attivi dell'elettrocatalizzatore Pt (Fig. 9.8). Per tale motivo è necessario prevedere un sistema di purificazione del CO che ne abbassi il livello nel combustibile fino a valori inferiori a 10 ppm, oppure sviluppare catalizzatori anodici tolleranti al CO stesso.

Le caratteristiche di un elettrocatalizzatore anodico per SPFC possono riassumersi nei seguenti punti:

- elevata attività nell'ossidazione dell' H_2 , anche a basso carico di catalizzatore ($0,2\div 0,5$ mg/cm²)
- tolleranza alla presenza di CO (10 \div 100 ppm), anche a basso carico di catalizzatore ($0,2\div 0,5$ mg/cm²)
- stabilità in condizioni operative (3000 h @ 0,7 V & 0,5 A/cm² - T=70 \div 90 °C, P=3 \div 4 bar)
- basso costo (Materiale-Metodo di Preparazione) ≤ 10 \$/g (relativo a Pt/C 20%_p).

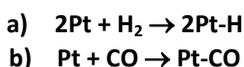
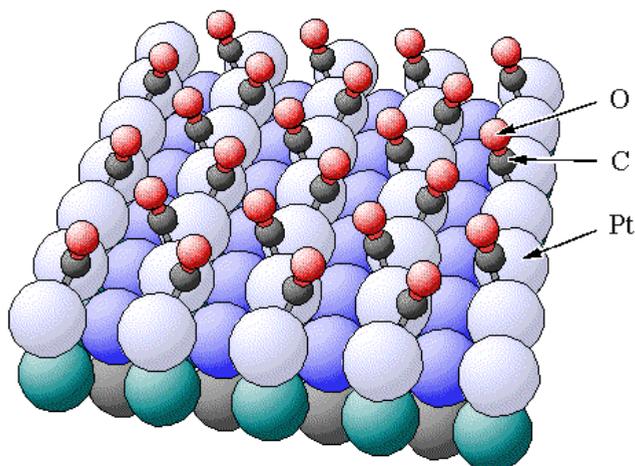


Fig. 9.8 - Meccanismo di avvelenamento del Pt da parte del CO

Il miglior elettrocatalizzatore alternativo presente oggi sul mercato si è dimostrato il Pt-Ru/C 1:1 che tuttavia rispetto al Pt/C mostra una diminuzione in termini di prestazioni del 9% in H_2 puro e del 28% in $\text{H}_2 + 100$ ppm di CO [7]. Le linee di ricerca attuali in relazione allo sviluppo di elettrocatalizzatori anodici tolleranti al CO sono indirizzate verso catalizzatori a base di leghe ternarie Pt-Ru-M (M=Mo,W o WO_3) le quali hanno mostrato di poter ottenere prestazioni superiori alle tradizionali leghe binarie Pt-Ru [8].

9.3.3 La membrana polimerica

Gli ioni H^+ che si formano all'anodo (eq. 1) sono trasportati, attraverso la membrana, al catodo. L'indice membrana sottolinea che per entrambe le reazioni deve essere presente la membrana a scambio ionico, cioè nelle PEFC non esiste elettrolita libero. Inoltre per il principio di elettroneutralità ogni protone deve essere adiacente ad un gruppo carico negativamente ($-\text{SO}_3^-$). L'unica fase elettronicamente conduttiva del sistema elettrodo/membrana è il carbone catalizzato su cui devono reagire i gas. La regione contenente queste differenti fasi (membrana, gas, carbone catalizzato) ha uno spessore minore di $10 \mu\text{m}$ e questo è ciò che comunemente si chiama strato attivo.

La membrana comunemente utilizzata allo stadio di sviluppo attuale della tecnologia, è composta da uno ionomero costituito da un perfluorocarburo solfonato acido (PFSA). Il Nafion, prodotto dalla Du Pont, è il materiale di questo tipo più conosciuto. Materiali dello stesso tipo sono commercializzati o in fase di sviluppo da parte di altre società come la W. L. Gore (USA), e la Asahi Chemical e Asahi Glass (Giappone).

Le proprietà chimico-fisiche delle membrane di perfluorocarburi solfonati PFSA conferiscono loro una superiorità significativa rispetto a qualsiasi altro tipo di membrana come separatore elettrolitico nelle PEFC. Queste membrane infatti possiedono una elevata stabilità chimica a lungo termine in condizioni sia ossidanti che riducenti.

Questo è possibile grazie alla loro struttura tipo Teflon, con una catena idrocarburica fluorurata che funge da spina dorsale. La conducibilità protonica ottenibile in questo tipo di membrane in condizioni di umidificazione è pari a circa 0,1 S/cm alla temperatura operativa di cella [9, 10]. A tale conducibilità corrisponde una resistenza teorica di circa 0,05 ohm cm² per una membrana di 50 µm di spessore. Questo valore di spessore rende la membrana capace di separare in modo ottimale i gas anodici e catodici. La permeabilità dell'ossigeno e dell'idrogeno infatti è dell'ordine di 10⁻¹¹÷10⁻¹⁰ mol/cm-sec-atm, che significa una densità di corrente dovuta al cross-over pari a 1÷10 mA/cm² per una membrana di 100 µm di spessore. Questa corrente persa, è inferiore all'1% della corrente di lavoro in una PEFC, che è tipicamente 0,5 A/cm².

Sebbene il risultato netto delle due semi-reazioni elettrodiche sia la generazione di acqua, a causa della temperatura di funzionamento della PEFC, si ha una progressiva disidratazione della membrana ed una concomitante perdita di conducibilità protonica a meno che non venga ripristinata continuamente la quantità di acqua persa dal sistema. Durante il funzionamento della cella anche l'acqua viene trasportata attraverso la membrana verso il catodo per effetto elettrosmotico. A 100 °C circa 3,5÷4 molecole di acqua vengono trasportate da ogni ione H⁺. Il trasporto di quantità ben definite di acqua attraverso la membrana comporta un problema di bilancio dell'acqua prodotta. L'anodo ha una tendenza alla disidratazione che si ripercuote in una riduzione della conducibilità ionica ed una conseguente diminuzione dell'energia ottenibile dal sistema. Una soluzione a questo problema consiste nell'umidificare il gas combustibile che entra nella cella; tuttavia un'aggiunta eccessiva di acqua può risultare nociva a causa della formazione di un film liquido sull'elettrocatalizzatore che ostacola la necessaria ossidazione rapida del combustibile H₂. Al catodo, al contrario, l'acqua prodotta deve essere rapidamente rimossa per evitare l'"allagamento" dell'elettrodo che sarebbe di ostacolo al trasporto di ossigeno gassoso verso l'interfase catalizzatore/elettrolita.

Ad alte densità di corrente l'effetto migratorio dell'acqua dall'anodo al catodo non riesce ad essere bilanciato dalla retro diffusione dal catodo all'anodo e si crea un elevato gradiente di concentrazione che si traduce in un'elevata sovratensione di diffusione.

La sovratensione totale, somma dei contributi delle componenti reattiva, diffusiva ed ohmica, può essere minimizzata se vengono incrementate le seguenti variabili:

1. Conducibilità protonica della membrana
2. Conducibilità elettronica degli elettrodi
3. Disponibilità del catalizzatore ai reagenti
4. Diffusione dei reagenti verso i siti di reazione
5. Diffusione dei prodotti dai siti di reazione
6. Attività del catalizzatore.

I parametri da 1 a 5 possono essere controllati in una certa misura, attraverso il rapporto dei costituenti elettrodici e le condizioni di lavorazione. In linea di massima incrementando il tenore di carbone nell'elettrodo poroso crescerà la conducibilità elettronica tridimensionale a causa dell'aumento del numero di particelle di carbone in contatto con altre particelle. Tuttavia questo produrrà una diminuzione della conducibilità ionica nell'elettrodo a causa del minor numero di canali di Nafion® che rendono possibile il trasporto dei protoni dall'elettrodo alla membrana.

9.3.4 *Piatto bipolare*

I piatti bipolari (e i collettori finali) racchiudono il MEA ed hanno la funzione di distribuire i gas di alimentazione e di condurre gli elettroni tra le varie celle in serie.

I materiali con cui sono realizzati i piatti, oltre ad avere una bassa resistenza ohmica (conducibilità elettrica $> 10 \text{ S/cm}$), devono presentare anche elevata resistenza alla corrosione in quanto ogni singolo piatto si affaccia su due ambienti chimicamente opposti: l'anodo fortemente riducente ed il catodo ossidante.

Per una distribuzione uniforme del gas occorre che il piatto sia lavorabile per ottenere canali di opportuna geometria. Un altro elemento importante ai fini della disposizione e delle dimensioni dei canali è quello di permettere il deflusso dell'acqua in fase liquida prodotta dalla reazione e ricoprente lo strato diffusivo ed il fondo del canale.

Infine i piatti bipolari devono avere una certa resistenza meccanica in quanto devono sopportare uno sforzo di compressione necessario a garantire la tenuta dello stack, anche in temperatura. Le funzioni principali dei piatti bipolari sono quindi:

1. distribuire il flusso gassoso del combustibile e dell'ossidante ai singoli elettrodi in maniera più uniforme possibile;
2. separare combustibile ed ossidante tra le celle connesse in serie (impermeabilità);
3. fornire una serie di connessioni elettriche tra i singoli assemblaggi (conducibilità elettrica);
4. permettere la rimozione dell'acqua prodotta nella reazione tramite il flusso dei gas;

5. avere caratteristiche meccaniche adeguate alla lavorazione ed utilizzo come resistenza meccanica, basso peso e resistenza alla corrosione;
6. permettere un efficace smaltimento del calore;
7. avere un basso costo.

9.3.5 Geometrie delle canalizzazioni per la distribuzione dei gas

Per la distribuzione dei gas (catodico ed anodico) sono state proposte varie geometrie di piatto, in genere a sezione rettangolare e quadrata, di più semplice lavorazione. Le osservazioni e le caratteristiche di queste sono ad ogni modo applicabili anche ai disegni più innovativi proposti in letteratura (pluricella, celle tubolari, celle circolari).

- *Canali rettilinei paralleli* (Fig. 9.9 a): tra i disegni con canali è quello che permette di ridurre al minimo, a pari portata di gas, le perdite di carico anche se la minore velocità dei gas può provocare problemi nell'asportazione dell'acqua prodotta. La permanenza del gas è minima con un conseguente limitato utilizzo del gas. La versione a canali dritti costituisce un'esigenza nelle celle autorespiranti per i canali sul lato catodico (aria), dove i canali devono rispondere alle stesse esigenze dei camini (minime perdite di carico ed asse verticale), e dove l'acqua prodotta può tranquillamente defluire all'esterno per gravità, essendo i canali aperti all'ambiente. In tali applicazioni il limitato utilizzo dell'aria non costituisce un problema.
- *Serpentina (o meander)* (Fig. 9.9 b): rispetto alla configurazione precedente presenta maggiori perdite di carico, ma maggiore facilità di asportazione dell'acqua prodotta (a parità di superficie attiva). In genere più canali corrono in parallelo per ridurre le perdite di carico e per mantenere una adeguata velocità del fluido con un effetto di trascinamento sull'acqua da parte della corrente gassosa. Appare plausibile esclusivamente la serpentina orizzontale, in quanto quella verticale provocherebbe ristagni d'acqua (a volte anche in serie) eliminabili solo con pressioni elevate.

Un'attenzione particolare dovrà essere posta al numero di curve e alla disposizione dei canali in modo tale da offrire al fluido percorsi di ugual lunghezza. La geometria *meander*, al momento, è la più usata per le taglie medie e grandi.

Il disegno proposto dalla General Motors (Fig. 9.9 c) appare come un compromesso tra il modello a serpentina e quello a canale paralleli: ridistribuendo i gas si evita che le situazioni più critiche (elevata presenza di acqua, bassa concentrazione di ossigeno, elevata temperatura ecc.) si concentrino in una unica area.

- *Interdigitated* (Fig. 9.9 d): tale configurazione presuppone il passaggio dei gas attraverso lo strato diffusivo; i canali non si sviluppano in modo continuo tra ingresso e uscita ma risultano interrotti: alcuni sono collegati all'uscita ed altri all'entrata. Questa soluzione fa sì che il gas, trovandosi ostacolato dalla

spalletta ricavata sul piatto, sia forzato ad entrare nello strato diffusivo sotto di essa, per poi riuscire nei canali contigui collegati all'uscita, rimuovendo l'acqua prodotta dai pori dello strato diffusivo (nel caso del catodo). Questo a scapito di maggiori perdite di carico e di comportamenti instabili ad alte portate ed elevati valori di umidità.

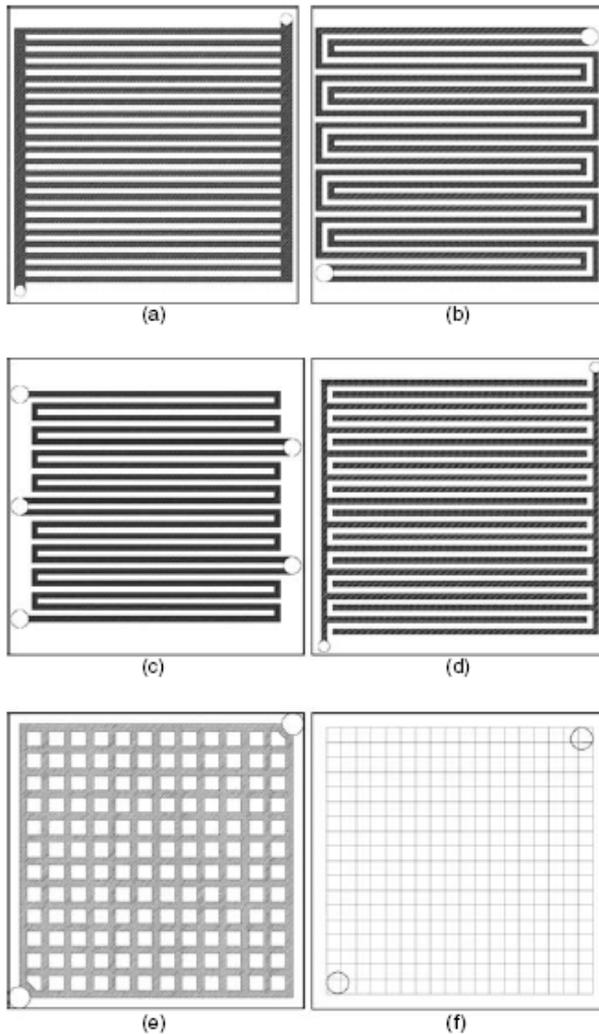


Fig. 9.9 - Geometrie dei canali dei piatti bipolari

- *Canale unico* (Fig. 9.9 e,f): è presente un solo ingresso ed uscita, ed il gas percorre liberamente l'unico canale; può essere presente una struttura di supporto al fine di migliorare la turbolenza, il contatto elettrico e di supportare il MEA. Sempre per lo stesso scopo può essere presente in tale spazio una struttura reticolare metallica (come applicato nelle celle Nuvera). Tali sistemi

sembrano adatti per basse densità di corrente, o piccoli stack in quanto per elevati valori delle portate si potrebbero creare delle zone di ristagno dell'acqua prodotta o dei gas reagenti. Per ovviare a tale inconveniente sono presenti dei distributori di gas in ingresso ed uscita dal piatto e sono richiesti prolungati e frequenti spurghi per ovviare a tali ristagni.

9.3.6 Progettazione del piatto e dettagli costruttivi

Prima di valutare la quantità di canali da realizzare sul piatto, occorre definire quanta superficie vista dal MEA sarà dedicata ai canali e quanta alle alette degli stessi. Queste alette hanno la funzione di condurre elettroni tra il MEA di una cella e quello della cella vicina, e la loro superficie influisce sulla resistenza elettrica al trasporto della corrente. Il rapporto suggerito in letteratura tra superficie dei canali e l'intera superficie attiva è di 0,45-0,50.

Tenendo conto di tale quota di area utilizzabile ed in funzione della portata (in genere la maggiore prevista dal funzionamento stazionario della cella) e delle relative perdite di carico si definisce il numero dei canali.

L'altezza dei canali, oltre a definire la velocità del gas, determina parzialmente l'ingombro ed il peso dell'intero *stack*. Per questa ragione sembra opportuno minimizzarne lo spessore facilitando, oltretutto, la diffusione in fase gassosa. Da tener presente che, nel momento della formazione di una fase liquida, canali troppo piccoli possono facilmente allagarsi e produrre degli effetti di capillarità.

Per quanto riguarda i flussi relativi tra gas reagenti nel compartimento catodico ed anodico la casistica è notevole e l'analisi richiede l'uso di adeguati programmi di simulazione. Infatti il flusso dei gas e dei prodotti di reazione, la loro concentrazione e temperatura influenzano le prestazioni locali della cella in termini di densità di corrente.

A titolo esemplificativo si riporta il lavoro di Yoshikawa [11] per lo studio della distribuzione di densità di corrente, temperatura e concentrazione lato catodico in un piatto con canali paralleli e flussi incrociati e paralleli (Fig. 9.10).

La progettazione dei canali costituisce solo uno degli aspetti che caratterizzano il piatto.

I piatti bipolari sono generalmente realizzati da lastre su cui sono ricavati dei canali aperti con asse parallelo alla superficie dell'elettrodo, che ne costituisce la chiusura. I canali sono realizzati su entrambe le superfici. Per permettere l'afflusso ed il deflusso dei gas sulla superficie sono realizzati fori per l'ingresso ed uscita dei gas ed il loro convogliamento ai canali.

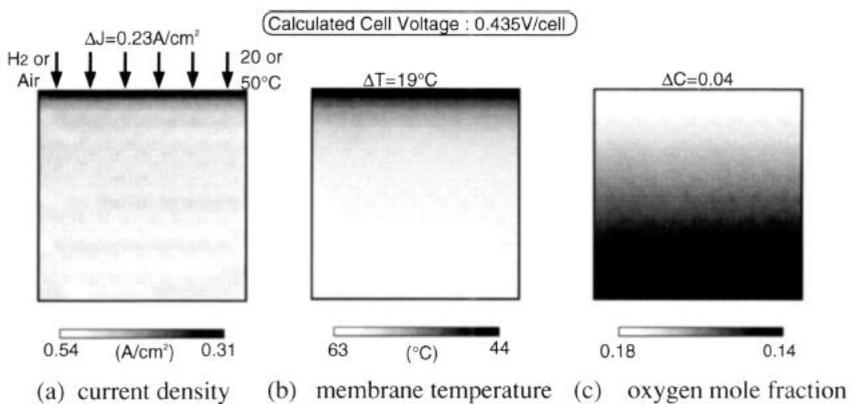
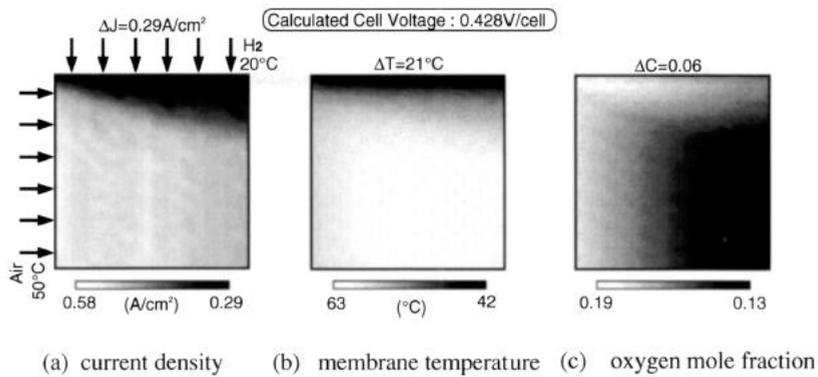
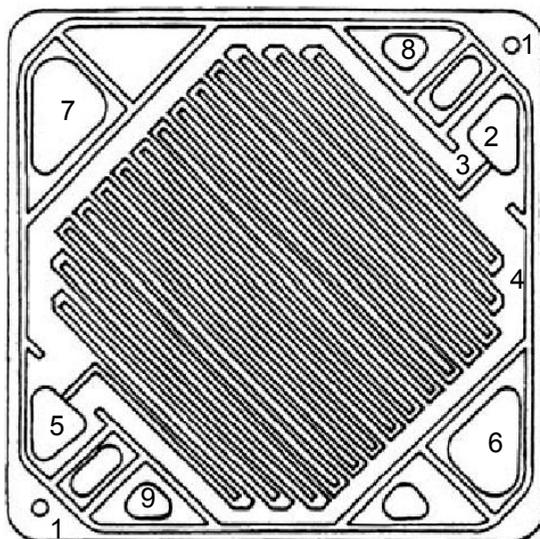


Fig. 9.10 - Profili di densità di corrente, temperatura e concentrazione di O_2 per flussi incrociati (sopra) e per flussi equicorrente (sotto)

Sui piatti quindi sono inoltre realizzate le sedi per l'alloggio delle tenute, i fori per l'allineamento e quelli per l'eventuale passaggio dei tiranti (Fig. 9.11).

In generale il disegno del piatto dipenderà molto dalle scelte progettuali e dalla tecnologia di produzione in possesso dai costruttori.

Fig. 9.11 - Piatto con condotti di passaggio gas e sedi delle tenute



- (1) foro per l'allineamento; (2) ingresso gas A; (3) apertura per il passaggio del gas A;
(4) sede perimetrale della tenuta; (5) apertura per uscita gas A;
(6 e 7) passaggio fluido di raffreddamento; (8) ingresso gas B; (9) uscita gas B

9.3.7 Il materiale

I piatti devono essere realizzati con un materiale in grado di resistere alla corrosione [12], e che abbia buona conducibilità e sufficiente resistenza meccanica alle sollecitazioni imposte dal sistema di assemblaggio (il quale deve comprimere le celle in serie sia per ridurre il più possibile le resistenze di contatto, elettriche e termiche, sia per garantire la chiusura dei canali rispetto le pressioni dei gas di alimentazione).

Per la realizzazione di un piatto bipolare tradizionale (tecnologia Ballard) possono essere utilizzati diversi materiali: grafite monolitica, materiali compositi a base di resine e polvere di carbone o resine e fibre di carbone o grafite impregnata con metalli, materiali metallici o polimerici rivestiti. Ognuno dei suddetti materiali può essere lavorato con diverse metodologie (macchine utensili, stampaggio, pressofusione ecc.).

La scelta del materiale particolare dipende dalle richieste specifiche dell'applicazione: costo, lavorabilità, flussi gassosi, dimensioni, densità di corrente operativa. Il costo del piatto bipolare a base di grafite è elevato principalmente per la necessità di una lavorazione meccanica particolare. Per tale motivo c'è chi persegue strategie diverse, come la Nuvera che realizza piatti bipolari in alluminio utilizzando come distributore del gas retine realizzate in materiale adatto allo scopo.

Questa strategia che in teoria dovrebbe portare ad una riduzione del costo dei materiali, si scontra con una diminuzione delle prestazioni ed un aumento di peso del sistema. Un'altra linea di tendenza è quella perseguita da vari laboratori di ricerca e industrie straniere che si è concentrata sulla realizzazione di piatti bipolari in acciaio rivestiti con strati anticorrosivi.

La Tab. 9.1 riassume le caratteristiche tecniche di piatti bipolari secondo le specifiche impartite dal Department of Energy (DOE - USA) e confrontate con quelle relative a due materiali commerciali (SGL).

Tra le caratteristiche tecniche più importanti da considerare vi è la resistività della grafite in blocco, ovvero la resistenza per unità di spessore caratteristica del materiale. Le specifiche del DOE stabiliscono che tale parametro deve essere inferiore a 10 mΩ cm.

Il motivo si spiega facilmente: se consideriamo un piatto bipolare di 0,3 mm ed uno stack composto da 67 celle otteniamo una resistenza globale pari a 0,2 ohm che si traduce in una caduta di tensione a 0,5 A/cm² di 100 mV.

Tab. 9.1 - Caratteristiche di materiali per piatti bipolari

| <i>Proprietà</i> | <i>DOE Spec.</i> | <i>XM9612</i> | <i>SGL/ BMA5</i> |
|---------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Conducibilità | > 100 S/cm | - | |
| Resistività di bulk (4 punte) | < 10 mΩ cm | 1,6-1,97 mΩ cm | 10 mΩ cm |
| Resistenza superficiale | <20 mΩ cm ² | N.R | N.R |
| Velocità di corrosione | < 16 μA/cm ² | N.R | N.R |
| Permeabilità all'H ₂ | <2x10 ⁻⁶ cm ³ /cm ² sec | 10 ⁻⁶ cm ² sec | 10 ⁻⁵ cm ² /sec |
| Carico a rottura | N.R | 21,8 N/mm ² - 3162 psi | N.R |
| <i>Crush Strenght</i> | N.R | N.R. | N.R. |
| Resistenza alla compressione | N.R | 69 N/mm ² -10000 psi | 60 N/mm ² - 8700 psi |
| Flessibilità (Modulo di Young) | N.R | 11÷13,7 kN/mm ² | 12 kN/mm ² |
| Resistenza alla Flessione | N.R | 36÷43 N/mm ² | 40 N/mm ² |
| Conduktività Termica | N.R | N.R. | 20 W/m °K |
| Coeff. di espansione termica | N.R. | 1,35/ °C*10 ⁻⁴ | 14/K*10 ⁻⁶ |
| Densità in massa | N.R | 1,85 g/cc | 2,1 g/cc |

9.3.8 Componenti ausiliari dello stack

La singola cella costituita dal MEA e da due piatti bipolari è replicata varie volte fino a formare lo stack. Per il raffreddamento della cella sono in genere interposti dei piatti, sempre in grafite, all'interno dei quali circola un fluido refrigerante. L'intero pacco è tenuto insieme mediante la compressione con tiranti di due piatti terminali (Fig. 9.12).

Anche sui piatti terminali esistono varie geometrie diverse come quelle che incorporano parte del sistema di raffreddamento (Fig. 9.13). Essenziale nella progettazione ed installazione del piatto l'omogenea ripartizione della compressione, al fine di evitare sforzi concentrati e danneggiamenti sul MEA, pur garantendo un buon contatto elettrico tra i vari componenti.

La tenuta sul piatto è ottenuta inserendo ai lati del MEA delle guarnizioni, sulle quali sono realizzate delle aperture al fine di permettere il flusso dei gas (e/o del liquido refrigerante) (1) nei canali di adduzione principali di ingresso ed uscita e (2) da questi alle canalizzazioni dei piatti bipolari, evitando mescolamenti.

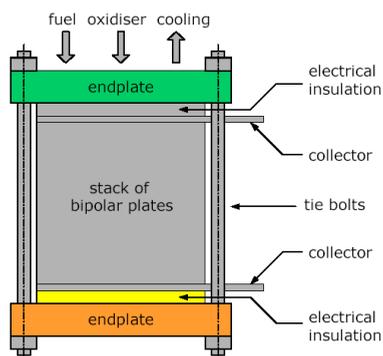


Fig. 9.12 - Schema di stack con componenti ausiliari

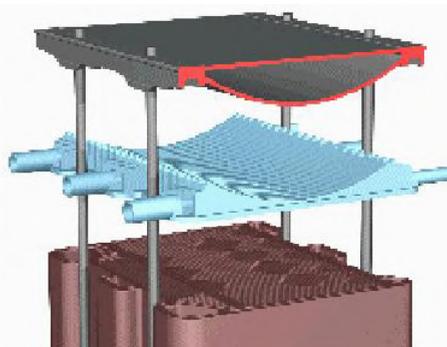


Fig. 9.13 - Flangia e controflangia (sistema Tribecraft)

Anche se complesso, a volte le guarnizioni sono incollate al MEA. Il materiale con cui si realizza la guarnizione deve avere caratteristiche fisiche di elasticità ma anche di resistenza meccanica e chimica. In letteratura sono stati proposti vari materiali e miscele di queste (ad es. EPDM, PTFE, fibra di vetro ecc.) e su questo argomento esiste un notevole interesse industriale.

Una soluzione interessante dal punto di vista industriale, per gli aspetti di facile installazione e manutenzione, è costituito dal cosiddetto MEGA (Membrane Electrode Gasket Assembly (Fig. 9.14) [13, 14] realizzato annegando il MEA in uno speciale materiale siliconico il quale, solidificando, costituisce un unico corpo con l'assemblato stesso.

Al fine di portare la corrente prodotta dallo stack sono presenti, ai lati del gruppo di celle, due collettori di corrente, predisposti per il collegamento (Fig. 9.12). In questo caso i collettori di corrente sono isolati elettricamente dalle testate mediante piatti realizzati in materiale elettricamente isolante, e questo sia per aspetti di sicurezza che per prevenire la corrosione delle testate (generalmente collettori e testate sono di materiale differente).

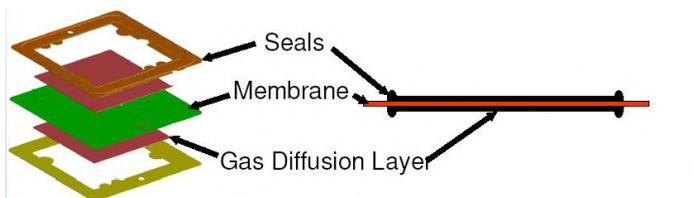


Fig. 9.14 - Schema concettuale del sistema MEGA

Per celle di minore potenza e dimensione la funzione dei collettori può essere svolta direttamente dalle testate, ed in tal caso è essenziale garantire l'isolamento elettrico, oltre che tra testate e masse esterne, anche tra le testate ed i tubi che portano i gas.

Il sistema è completato dai componenti ausiliari del sistema (balance of plant) che ne permettono il funzionamento (compressore o soffiante per l'aria catodica, sistema di raffreddamento e di umidificazione, strumentazione di controllo). A volte si tratta di adattamenti di apparecchiature sviluppati per altre applicazioni, altre volte di prototipi realizzati ad hoc. Le specifiche di tali sistemi dipendono dalle caratteristiche della cella a combustibile utilizzata (principalmente le caratteristiche del MEA) e dalle condizioni operative del sistema scelte dal costruttore (pressione, rapporti stechiometrici dell'anodo e del catodo) (Fig. 9.15).

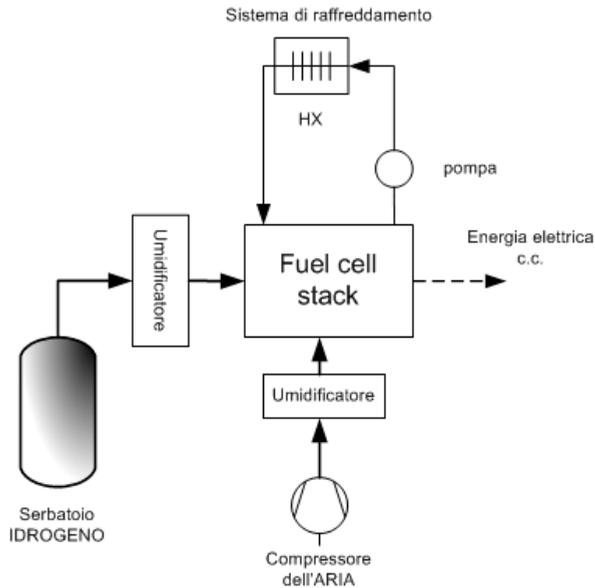


Fig. 9.15 - Schematizzazione del *balance of plant* di una cella a combustibile

9.4 Sistemi di propulsione con celle a combustibile e veicoli dimostrativi

L'attuale impulso alla ricerca sulle celle a combustibile ad elettrolita polimerico è stato principalmente dettato dall'applicazione automobilistica. Vari programmi nazionali ed internazionali, pubblici privati e misti, hanno promosso lo sforzo e la collaborazione delle principali case automobilistica per dimostrare la possibilità di un'applicazione su grande scale delle celle a combustibile nel campo dell'autotrazione.

Le motivazioni principali che hanno mosso le amministrazioni pubbliche a focalizzare l'impegno di ricerca nel campo delle celle PEFC per l'autotrazione sono state da una parte quello ambientalista di una riduzione delle emissioni urbane degli autoveicoli e dall'altra l'idea di poter alimentare la crescente richiesta di combustibili per veicoli con l'idrogeno prodotto non esclusivamente dal petrolio.

Gli approcci seguiti sono stati differenti e motivati da diverse scelte strategiche delle case costruttrici. Se ad esempio la BMW ha sempre visto nella alimentazione diretta in un motore a combustione interna la soluzione più rapida ed efficace all'introduzione per l'idrogeno nell'autotrazione (adattando l'esistente tecnologia del motore ad iniezione e limitando l'uso delle celle - PEFC o SOFC - alle utenze ausiliarie), altre case hanno decisamente puntato alla ricerca e sviluppo delle celle, creando un proprio *know-how* o integrando lo sforzo tecnologico direttamente con i costruttori di celle.

L'introduzione delle celle a combustibile nel veicolo presuppone l'intera riprogettazione dello stesso e dei componenti ausiliari necessari. Per funzionare la cella necessita oltre che dell'integrazione elettrica (analoga a quella con sistemi a batteria), del sistema di accumulo di idrogeno o di produzione dello stesso a bordo dal combustibile di alimentazione. Studi, dibattiti e ricerche sul sistema migliore di alimentare le celle per autotrazione si sono sviluppati per tutti gli anni 90, alla ricerca del sistema di distribuzione più efficace per alimentare un ipotetico parco veicoli alimentato con celle a combustibile.

Soluzioni alternative per produrre e distribuire l'idrogeno necessario (produzione centralizzata, produzione decentralizzata in stazioni di rifornimento, produzione a bordo) sono state studiate e provate. Anche la scelta della sorgente di energia primaria con cui produrre l'idrogeno (energia solare, metano, benzina, metanolo, GPL) ha prodotto la realizzazione di filiere con stazioni di prova e flotte di veicoli (Fig. 9.16).

L'attuale tendenza degli studi, dopo il fermo dei finanziamenti in USA sulle attività finalizzate allo studio di sistemi di produzione di idrogeno a bordo a partire da combustibili fossili (metano e benzina), è orientata verso l'accumulo a bordo di idrogeno (gassoso) e la sua produzione decentralizzata da fonte fossile.

L'obiettivo di un sistema con celle a combustibile è di fornire una fonte di energia elettrica mobile tale da garantire l'alimentazione di un motore elettrico per sostituire od integrare un motore a combustione interna.

Un veicolo con propulsione a cella a combustibile dovrà garantire prestazioni almeno paragonabile a quelle delle tecnologie attualmente in circolazione. La necessità di avere autonomia, tempi di avviamento, sicurezza, affidabilità e, non ultimo, costi paragonabili a quelle degli attuali veicoli, ha posto e pone le case costruttrici di fronte ad un impegno davvero imponente.

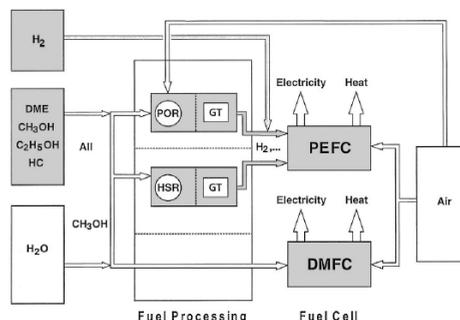


Fig. 9.16 - Varie soluzioni di sistemi integrati con celle a combustibile e combustibili

POR, reformer di ossidazione parziale; HSR, steam reformer; GT, trattamento gas; PEFC, cella a combustibile polimerica; DMFC, cella a metanolo diretto; HC, idrocarburi

D'altra parte i sistemi di propulsione concorrenti stanno ulteriormente affinando le tecnologie, creando difficoltà di competizione all'autotrazione ad idrogeno.

Il sistema propulsore a cella a combustibile, nell'attuale tendenza che vede appunto l'idrogeno a bordo come la soluzione più plausibile, è essenzialmente costituito dalla cella, dall'accumulo di idrogeno, dal sistema di alimentazione dell'aria catodica, dal sistema di raffreddamento e dal sistema di controllo dello stesso (Fig. 9.15). Esula dalla trattazione di questo capitolo l'integrazione elettrica già trattata in altra parte di questa pubblicazione.

La tecnologia di cella presa generalmente in considerazione è stata quella ad elettrolita polimerico per la bassa temperatura di esercizio, la possibilità di frequenti accensione e spegnimenti, i ridotti tempi di avviamento. Ultimamente sono state prese in considerazione anche celle ad ossido solido (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell), per l'alimentazione di ausiliari di bordo (APU: Auxiliaries Power Unit), per la loro capacità di operare direttamente con combustibile di origine fossile, disponibile su un'auto tradizionale.

Finora sono stati esplorati quasi esclusivamente i concetti di generazione elettrica a bordo con solo celle (FCV: Fuel Cell Vehicle) o con integrazione con accumulo elettrico (FCHV: Fuel Cell Hybrid Vehicle). L'approccio diretto prevede una veloce risposta dinamica non tanto della cella, abbastanza rapida ad adeguarsi al carico, quanto dei componenti ausiliari (compressore, pompe, eventuale reformer), specialmente critica nelle fasi di avviamento e di accelerazione. L'ibridazione del propulsore con un sistema di accumulo elettrico (batterie e/o supercondensatori) riduce invece le criticità suddette.

Occorre considerare che l'aspetto peculiare della cella di avere efficienze più elevate a bassi carichi, renderebbe tale funzionamento preferibile nel caso di traffico urbano e di conseguenza l'ibridazione di una cella richiede un approccio opposto rispetto a quello di un motore a combustione interna, come si vedrà di seguito.

Come già illustrato in Fig. 3.5 (pag. 43), i veicoli alimentati a idrogeno si collocano quindi in posizione intermedia tra quelli a batteria e quelli convenzionali.

Per quanto riguarda l'alimentazione della cella, malgrado i notevoli sforzi di ricerca per la realizzazione di generatori di idrogeno (reformer) a partire da vari combustibili (metano, metanolo, benzina, GPL) così da integrarsi con l'attuale rete di distribuzione, l'attuale tendenza è quella di utilizzare idrogeno puro, accumulato nei vari stati fisici (gassoso, liquido, idruri metallici) o sotto forma chimica (ad esempio il NaBH_4).

L'accumulo a bordo di idrogeno, come pure quello della distribuzione, rappresentano indubbiamente punti critici nell'ottica di una ampia diffusione della trazione con celle a combustibile. L'idrogeno può quindi essere accumulare in diversi modi ognuno dei quali ha i suoi vantaggi e svantaggi [15]:

1. gas compresso (Compressed Gas Hydrogen - CH₂),
2. gas liquefatto (Liquified Hydrogen - LH₂),
3. in idruri metallici,
4. in nanotubi di carbonio,
5. in composti chimici (idruri chimici).

L'idrogeno gassoso è caratterizzato, rispetto ad altri combustibili, da una bassa densità volumetrica ma ha un'elevata densità di energia in massa (33,3 kWh/kg), vanificata tuttavia dal peso delle bombole per alte pressioni che lo contengono. Anche in fase liquida la sua densità di energia è inferiore (2,3-2,9 kWh/L) ai combustibili tradizionali.

Un quadro riassuntivo delle principali caratteristiche energetiche dei vari sistemi di accumulo è riportato in Tab. 9.2.

Il metodo più semplice utilizzato è la compressione di idrogeno gassoso in bombole, a temperatura ambiente ed a pressione compresa tra 150 e 200 bar (Fig. 9.17).

Tab. 9.2 - Quadro riassuntivo delle caratteristiche dei sistemi di accumulo

| | <i>Densità di Energia</i> | | <i>Temperatura</i> |
|---------------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|
| | <i>[kWh/kg]</i> | <i>[kWh/L]</i> | <i>[°C]</i> |
| Benzina | 10 | 8.5 | 20 |
| Idrogeno gassoso compresso | | | |
| Stazionario (50 bar) | 0,24÷0,31 | 0,135 | 20 |
| Mobile (200 bar) | 0,50÷0,75 | | 20 |
| Mobile (250 bar) | 1,75÷2,15 | | 20 |
| Idrogeno liquido | | | |
| Stazionario 3800 m ³ | - | 1,70÷2,00 | -253 |
| Mobile 190 L | 4,5 | 2,13 | -253 |
| Idruri metallici | | | |
| A bassa temperatura | 0,60÷1,80 | 2,96÷3,20 | 50÷80 |
| Ad alta temperatura | 1,20÷2,50 | 2,70÷3,37 | 250÷300 |
| Carbonio Attivato a 55 bar | 3,34÷4,34 | 1,17 | -196 |
| Nanotubi di carbonio | 4,67÷6,68 | 4,20÷6,00 | |
| Nanofibre di carbonio (113 bar) | 14,0÷22,7 | 15 | |



Fig. 9.17 - Bombole in composito a 350 bar

Sulla base dei serbatoi attualmente disponibili in commercio, la densità minima pari a 0,5 kWh/kg è consentita dai serbatoi in acciaio a 200 bar, mentre la massima, pari a 2,15 kWh/kg, è raggiunta dai serbatoi in composito a 250 bar. Si può incrementare la densità energetica dell'idrogeno gassoso aumentando la pressione ma in questo caso è necessario utilizzare serbatoi in materiali compositi rinforzati con fibre di carbonio. Gli sviluppi più recenti hanno permesso di raggiungere pressioni fino a 700 bar con una densità di energia di appena 1,3 kWh/L. Inoltre i costi elevati e le problematiche relative alla sicurezza vanno fortemente a gravare su questo tipo di accumulo.

L'*idrogeno liquido* è invece proposto per incrementare la densità di energia; a -253 °C l'idrogeno ha una densità di energia tre volte inferiore a quella della benzina (8,6 kWh/L). A questa limitazione si aggiunge quella relativa alla progressiva perdita dell'idrogeno liquido per evaporazione (circa 1-2% al giorno) anche con particolari accorgimenti tecnologici (Fig. 9.18), ed al notevole dispendio energetico necessario all'intero processo (circa il 30% dell'energia contenuta nell'idrogeno liquefatto).

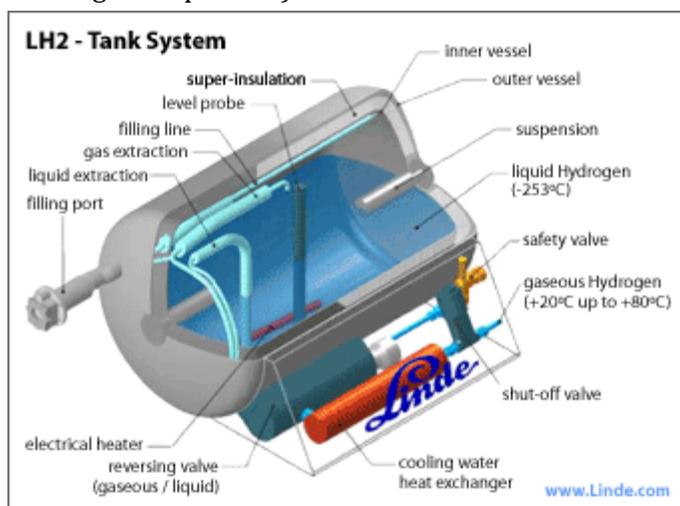


Fig. 9.18 - Serbatoio per l'accumulo di idrogeno liquido (Linde)

Gli *idruri metallici*, su cui è basato il terzo metodo di immagazzinamento, sono leghe di magnesio, alluminio, ferro o lantanio, che contengono all'interno della struttura cristallina composti di nichel, vanadio, titanio, cromo, terre rare, in grado di assorbire idrogeno nello spazio interatomico.

Il processo di carica-rilascio è reversibile e si ottiene attraverso processi di assorbimento esotermico e riscaldamento endotermico (da temperatura ambiente a 300 °C). Inoltre, usando leghe con differenti composizioni, è possibile ottenere sistemi in grado di rilasciare l'idrogeno a differenti pressioni.

Gli idruri si dividono secondo la temperatura di assorbimento/desorbimento in idruri ad alta (150-300 °C) e bassa temperatura (20-90 °C), con la capacità di accumulo maggiore per gli idruri ad alta temperatura. Per questi la pressione di assorbimento varia tra 33 e 55 bar, mentre quella di rilascio tra 0,7 e 10 bar. Utilizzando queste proprietà è possibile, ponendo l'idruro metallico in polvere all'interno di contenitori, accumulare l'idrogeno allo stato "solido" (Fig. 9.19).

I vantaggi dell'accumulo in idruri metallici sono costituiti, oltre alla sicurezza intrinseca, dalla bassa pressione di caricamento e dall'elevata densità di energia in volume raggiungibile (2,7÷3,4 kWh/L). La densità energetica dell'idrogeno accumulato è interessante rispetto ai due precedenti sistemi di accumulo (Fig. 9.20), soprattutto per gli idruri del tipo Mg_2FeH_6 .

Tuttavia i costi di gestione di tali sistemi, il loro peso elevato, la limitata percentuale in peso di idrogeno immagazzinato e la progressiva riduzione della capacità di accumulo in funzione del numero di cicli di adsorbimento/desorbimento ne limitano fortemente la convenienza.

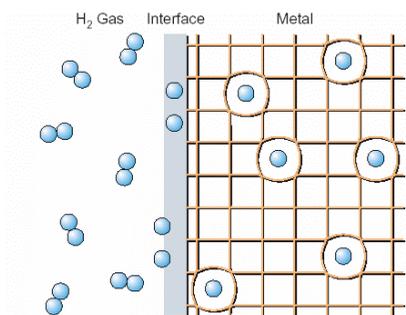


Fig. 9.19 - Schema dell'immagazzinamento dell'idrogeno nel reticolo di un idruro

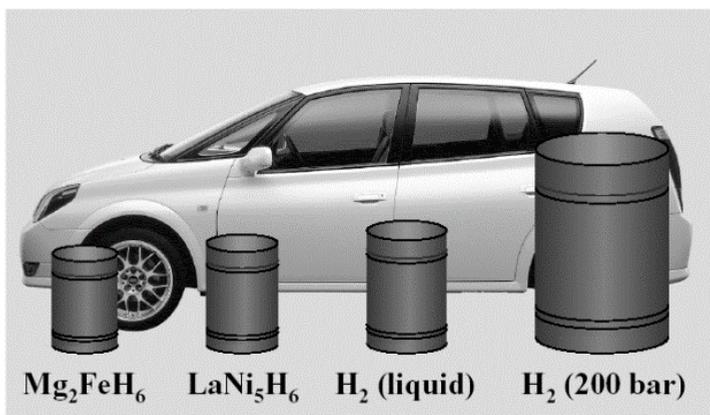


Fig. 9.20 - Confronto volumetrico per l'immagazzinamento di idrogeno a bordo di un'autovettura tra idruri di ferro/magnesio, lantanio/nichel, idrogeno liquido ed idrogeno gassoso compresso

Il quarto metodo basato sui *nanotubi di carbonio* sembra consentire, a parità di peso, un maggior volume di idrogeno accumulato rispetto agli idruri metallici ed anche costi relativi inferiori. Nei micropori di queste strutture (diametro inferiore a 2 nm) l' H_2 può essere assorbito a densità più elevate che in fase liquida. I risultati ottenuti in termini di densità di energia volumetrica non sono del tutto concordi e sono compresi nell'intervallo 4.2÷6.0 kWh/L, senza comprendere il serbatoio di immagazzinamento, con concentrazioni in peso di H_2 accumulato tra 70% in peso e solo il 14% in peso di H_2 . La tecnologia appare promettente per le applicazioni mobili, anche se il meccanismo non è chiaro e di difficile riproduzione.

Ultimamente è stato proposto l'utilizzo di *boroidruri alcalini* [16,17], dapprima proposto dalla NASA come additivo del combustibile per i razzi dello Shuttle. Nel caso dei boroidruri alcalini l'idrogeno è imprigionato nei legami chimici del boro e del metallo alcalino formando un sale.

La reazione catalitica con acqua produce idrogeno gassoso umidificato adatto per l'accoppiamento con celle PEFC. Oltre l'idrogeno, l'altro prodotto della reazione suddetta è il borato di sodio, un composto chimico naturale utilizzato comunemente nei detersivi e nelle colle che può essere ritrasformato nuovamente in boroidruro di sodio.

Considerando che già una soluzione di boroidruro di sodio al 30%p contiene circa il 7% in peso di idrogeno (63 g H_2 /L), tale metodo di immagazzinamento è di sicuro interesse rispetto all'idrogeno compresso in bombole (23 g H_2 /L a 330 bar) o liquido (71 g H_2 /L).

A quanto detto si aggiunga che tale soluzione è stabile in ambiente basico, non infiammabile, non esplosiva, non produce emissioni inquinanti o sottoprodotti

in grado di contribuire all'effetto serra ed infine è l'unico sistema di stoccaggio dell'idrogeno in forma liquida (acquosa) a temperatura ambiente che potrebbe sfruttare facilmente l'attuale sistema di distribuzione alla pompa per l'autotrazione.

Esistono ad ogni modo problemi principalmente dovuti al costo di produzione del boroidruri ed alla riconversione economica del borato in sodioboroiduro.

9.5 Veicoli dimostrativi con cella a combustibile

Risulta estremamente difficile avere una panoramica completa dei dimostrativi realizzati ormai da quasi tutte le marche automobilistiche. Liste dei veicoli realizzati da industrie, esaustive ed aggiornate, si possono trovare in rete [18,19,20] e nel volume ENEA sulle celle a combustibile [21]. Oltre quelli proposti dalla case automobilistiche, esistono inoltre altri prototipi sviluppati presso istituti di ricerca in varie parti del mondo.

Generalmente i prototipi sono realizzati dall'integrazione del *know-how* delle ditte fornitrici di celle (Ballard, Nuvera, UTC, Siemens, Hydrogenics) e di costruttori d'auto. Ad ogni modo alcuni costruttori hanno preferito sviluppare autonomamente la tecnologia della cella (Toyota, GM, Honda, Mazda). Tutte usano ora celle ad elettrolita polimerico, anche se le prime esperienze degli anni 60 e 70 furono effettuate con celle alcaline (alimentazione idrogeno ed ossigeno puro) e ad acido fosforico.

La cella è alimentata nella quasi totalità da idrogeno accumulato sotto forma gassosa (fino alla pressione di 700 bar), liquido e, raramente, su idruri metallici. In alcuni casi (Peugeot e DaimlerBenz) l'idrogeno è prodotto dalla reazione del sodioboroidruri (NaBH_4). Mentre alcuni usano il *reforming* a bordo per il metanolo, l'uso di derivati petroliferi è abbandonato completamente.

Tutte operano con celle in pressione, fatto salvo i veicoli della Hyundai e gli autobus IVECO, equipaggiati con celle UTC che operano a pressione atmosferica. Le potenze, quando utilizzate per la propulsione, sono dell'ordine di 30-100 kW. Il sistema è, come detto, o con solo celle a combustibile o integrato con batterie. Integrazione con supercondensatori è realizzata da Honda, Mazda e VW.

Con le eccezioni delle linee di sviluppo di prototipi Daimler, Toyota e Honda, pervenuti a produzione in piccolissime serie, si tratta in tutti i casi di prototipi dimostrativi realizzati al fine di dimostrarne la fattibilità tecnica e di provarne l'affidabilità e la rispondenza in un ambiente reale. Non ultimo la mancanza di una normativa di sicurezza specifica su questo tipo di veicoli pone problemi all'esercizio reale, anche dimostrativo.

Malgrado l'impegno messo in atto dall'industria automobilistica, e gli ingenti finanziamenti sia pubblici che privati indirizzati su queste attività in tutte le parti del mondo, i risultati, almeno sul piano di applicazioni commerciali stentano a trovare spazio.

I costi per le celle risultano ancora ben lontano dagli obiettivi attesi. Anche lo sviluppo delle tecnologie concorrenti e la difficoltà di una reale rete di distributori di idrogeno rendono ardua la strada.

L'applicazione su bus per il trasporto pubblico urbano appare quindi come la più appropriata e plausibile, per il maggior fattore di utilizzo di tali veicoli nell'area urbana, il maggior volume disponibile per l'accumulo di idrogeno ed il servizio di assistenza e manutenzione normalmente disponibile (con un possibile centralizzazione delle stazioni di caricamento dell'idrogeno).¹

In questa ottica si inquadra l'azione dell'Unione Europea con il programma CUTE [21] che ha messo in esercizio 27 bus nelle maggiori capitali europee, numero in corso di raddoppio con il programma successivo Hy-Fleet-CUTE. La diffusione nel settore del trasporto pubblico potrà fungere da vetrina per una più ampia accettazione e diffusione di veicoli alimentati con celle a combustibile.

Bibliografia

- 1) L. Giorgi, A. Pozio, "Solid Polymeric Fuel Cells (SPFC): state of the art and R&D lines", ENEA Technical Report, 1995, RTI/ERG/TEA/ECHI/95/02.
- 2) E. Antolini, L. Giorgi, A. Pozio, "Development of gas diffusion electrodes for polymer electrolyte fuel cells", *Materials Technology*, 13, 1998, 64-67
- 3) L. Giorgi, E. Antolini, A. Pozio, E. Passalacqua, "Influence of PTFE content in the diffusion layer of low-Pt loading electrodes for polymer electrolyte fuel cells.", *Electrochimica Acta* 43, 1998, 3675
- 4) A. Pozio, M. De Francesco, A. Cemmi, F. Cardellini, L. Giorgi, "Comparison of high surface Pt/C catalysts by cyclic voltammetry", *J. of Power Source* 105, 2002, 13-19
- 5) E. Antolini, L. Giorgi, A. Pozio, E. Passalacqua, "Influence of Nafion loading in the catalyst layer of gas-diffusion electrodes for PEFC", *J. of Power Source* 77, 1999, 136-142
- 6) L. Giorgi, A. Pozio, C. Bracchini, R. Giorgi, S. Turtù, "H₂ and H₂/CO oxidation mechanism on Pt/C, Ru/C and Pt-Ru/C electrocatalyst", *J. of Applied Electrochemistry* 31, 2001, 325-334
- 7) A. Pozio, M. De Francesco, F. Cardellini, R.F. Silva, L. Giorgi, "A novel route to prepare stable Pt-Ru/C electrocatalysts for polymer electrolyte fuel cell", *Electrochimica Acta*, 48/3 2002, 255-262
- 8) A. Pozio, L. Giorgi, E. Antolini, E. Passalacqua, "Electrooxidation of H₂ on Pt/C, Pt-Ru/C and Pt-Mo/C anodes for polymer electrolyte fuel cell", *Electrochimica Acta* 46, 2000, 549-555

¹ Vedi il Capitolo 19, dedicato al trasporto urbano.

- 9) R. F. Silva, M. De Francesco, A. Pozio, "Tangential and normal conductivities of Nafion membranes used in polymer electrolyte fuel cells", *J. of Power Sources*, 134/1 2004, 18-26
- 10) R. F. Silva, M. De Francesco, A. Pozio, "Solution-cast nafion ionomer membranes: preparation and characterisation", *Electrochimica Acta*, 49/19 2004, 3211-3219
- 11) H. Yoshikawa et al. - "Performance of a Polymer Electrolyte Fuel Cell for Automotive Applications" - *Heat Transfer Asian Research*, 31, (6), 2002
- 12) K. Zhukovsky, A. Pozio, "Maximum current limitations of the PEM fuel cell with serpentine gas supply channels", *J. of Power Sources*, 130/1-2 2004, 95-105
- 13) R.F. Silva, D. Franchi, A. Leone, L. Pilloni, A. Masci, A. Pozio, "Surface conductivity and stability of metallic bipolar plate materials for polymer electrolyte fuel cells", *Electrochimica Acta* 51/17 2006, 3592-3598
- 14) A. Pozio, M. De Francesco, A. Danzi, R. Lo Presti, R.F. Silva, L. Giorgi, "Membrane Electrode Gasket Assembly (MEGA) technology for polymer electrolyte fuel cells", *J. of Power Sources*, 112/2, 2002, 491-496
- 15) A. Pozio, S. Galli, M. De Francesco, A. Danzi, R. Lo Presti, R.F. Silva, L. Giorgi, "Membrane Electrode Gasket Assembly (MEGA): a novel technology for PEFCs", *J. of New Materials for Electrochemical Systems*, 6/3, 2003, 157-162.
- 16) A. Pozio, M. De Francesco, G. Monteleone, R. Oronzio, S. Galli, C. D'Angelo, M. Marucci, "Apparatus for the production of hydrogen from sodium borohydride in alkaline solution" *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (2008) 51 – 56
- 17) R. Oronzio, G. Monteleone, A. Pozio, M. De Francesco, S. Galli, "New reactor design for catalytic sodium borohydride hydrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009) 4555-4560
- 18) www.fuelcells.org/info/charts/carchart.pdf.
- 19) <http://www.fuelcells.org/info/charts/AutoCompaniesonFuelCells.pdf>
- 20) <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/>
- 21) M. Ronchetti, "Celle a combustibile. Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia", ENEA, 2008

Parte III

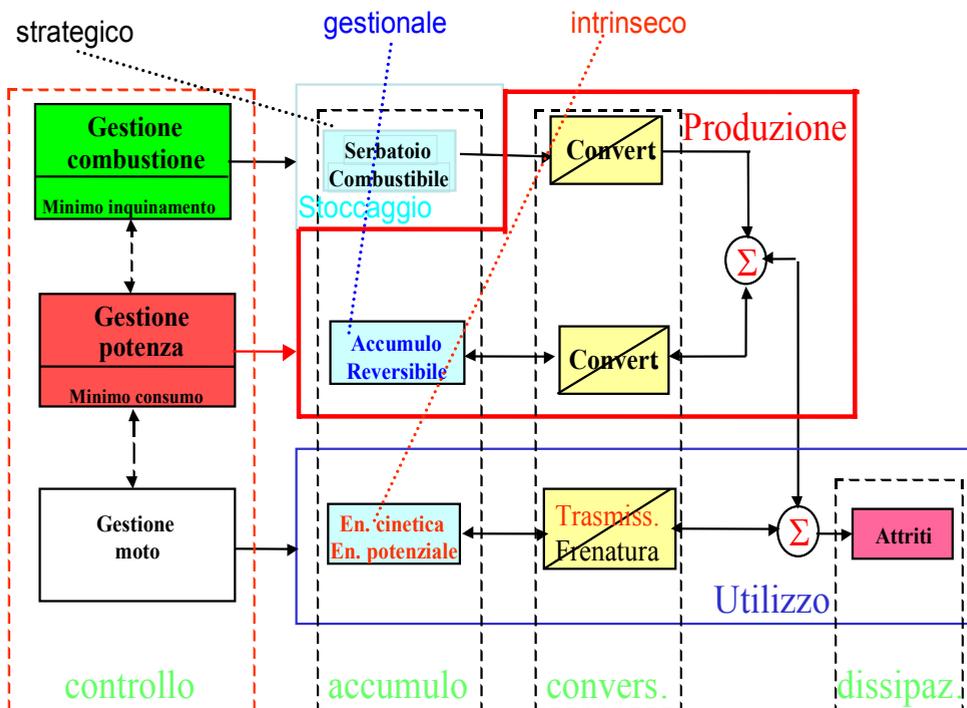
Il progetto di sistema del veicolo ibrido

Introduzione alla parte terza

Come ripetuto più volte nei capitoli precedenti, i sistemi di propulsione ibridi presentano una migliore efficienza energetica poiché, quando correttamente progettata, la struttura del sistema di propulsione permette una gestione ottimizzata dell'energia disponibile a bordo, in relazione al lavoro necessario per realizzare la missione. L'ottimizzazione è resa possibile agendo su:

- la scelta del miglior punto di lavoro del convertitore primario (normalmente un motore a combustione interna) in relazione alla potenza richiesta,
- il recupero dell'energia in frenata (energia cinetica e/o potenziale accumulata nelle masse del veicolo),
- l'annullamento dei consumi dovuti al funzionamento "a vuoto" durante le soste.

Sistemi di propulsione ibridi



Ruolo chiave per l'ottimizzazione della gestione lo giocano gli accumuli di bordo, nella figura che precede il secondo dei quattro blocchi tratteggiati.

In generale in un processo produttivo si possono distinguere le seguenti tipologie di accumulo:

- *strategico*: dispositivi che contengono il bene necessario al funzionamento del processo, se isolato, o al funzionamento in emergenza, se collegato a una rete di alimentazione del bene.
- *gestionale*: dispositivi addizionali inseriti per migliorare la gestione dei processi;
- *intrinseco*: insito nei dispositivi di un processo;

Nel caso del veicolo ibrido "il processo" può essere rappresentato dal diagramma a blocchi in figura, dove sono rappresentate le funzioni del sistema di propulsione nonché gli obiettivi di controllo dei sottosistemi.

Come si può notare il sistema di propulsione presenta tutte e tre le tipologie di accumulo tipiche dei processi produttivi:

- quello intrinseco dovuto alle masse veicolari,
- quello strategico, rappresentato dal serbatoio del combustibile, che contiene l'energia potenziale chimica necessaria per fare la missione di mobilità richiesta,
- quello gestionale che è l'elemento ausiliare appositamente aggiunto (normalmente un accumulatore elettrochimico) per rendere possibile l'ottimizzazione della gestione come sopra detto.

Un obiettivo fondamentale è perciò quello di sviluppare algoritmi e sistemi che realizzino le varie gestioni illustrate in figura, in particolare le gestioni della potenza e della combustione che, con i relativi obiettivi di minimo consumo e minimo inquinamento, hanno importanti ricadute sul piano ambientale in relazione alla missione prevista per il veicolo.

Il tema della definizione delle strategie di controllo sarà quindi oggetto del primo capitolo di questa parte del volume dedicata al progetto di sistema.

L'individuazione delle strategie di controllo e di gestione degli accumuli è poi di fondamentale importanza per il dimensionamento dei sistemi di conversione presenti nel blocco "Produzione", nonché della capacità dell'accumulo gestionale.

Nella progettazione del veicolo ibrido, infatti, il sommatore dei flussi di potenza presente nel blocco "Produzione" consente un grado di libertà aggiuntivo rispetto al veicolo convenzionale, potendo il progettista scegliere, in relazione alla missione del veicolo, una opportuna ripartizione dei flussi di potenza (a somma nulla, con il flusso di potenza verso il motore di trazione imposto dal moto del veicolo).

Tradotto in pratica, questo significa che nell'ibrido "parallelo" si può scegliere come distribuire la potenza totale necessaria alle ruote tra il motore termico e l'elettrico e, nel "serie", tra quella erogata dal convertitore primario e quella fornita dall'accumulo gestionale, specializzando così il sistema di propulsione per ogni particolare profilo di missione.

A questo si aggiunga il fatto che tanto la scelta dell'accumulo gestionale che quella del convertitore alimentato dall'accumulo strategico offre numerose possibilità. Infatti, come già visto nella parte dedicata ai sottosistemi, l'accumulo gestionale può essere di tipo elettrochimico, elettrostatico, cinetico, idraulico e può essere dimensionato per effettuare il servizio di "volano energetico" o di "integratore di potenza", mentre il convertitore primario può avere anch'esso caratteristiche assai diverse da un punto di vista funzionale, potendo scegliere tra motori a combustione interna, microturbine, celle a combustibile ecc.

Per quanto sopra detto, la modellazione dei diversi sottosistemi, la simulazione del sistema e lo studio delle strategie di controllo richiede un dimensionamento di prima approssimazione del sistema di trazione, oggetto del Capitolo 11 perché svolto a partire dai principi di carattere generale, relativi alle strategie, esposti nel Capitolo 10.

Il progetto definitivo è quindi sintetizzato a partire dalle politiche di gestione e dallo schema adottato.

È da ricordare infine che il progetto di un sistema complesso è il risultato anche della sperimentazione di diverse serie di prototipi, sperimentazione di cui saranno esposti alcuni aspetti tecnicamente salienti nel Capitolo 12, l'ultimo della Parte III.

CAPITOLO 10

STRATEGIE DI GESTIONE ENERGETICA DEI VEICOLI IBRIDI

Massimo Ceraolo

Università degli Studi di Pisa

10.1 Acronimi

Nel testo del presente capitolo (e dei due successivi) sono usati gli acronimi di uso generale riportati nell'apposita sezione del volume.

Sono inoltre utilizzati i seguenti acronimi di uso più limitato, definiti dall'autore esplicitamente per ragioni di chiarezza di esposizione del presente capitolo. a partire dalla corrispondente espressione inglese:

| | |
|-----|---|
| EG | Electric Generator (<i>generatore elettrico</i>) |
| EM | Electric Machine (<i>macchina elettrica</i>) |
| Eng | Engine (<i>motore meccanico</i>) |
| LOE | Level Of Energy (<i>Livello Energetico</i>) |
| EPC | Electric Power Converter (<i>convertitore di potenza elettrica</i>) |
| MEM | Main Electric Machine (<i>macchina elettrica principale</i>) |
| AEM | Auxiliary Electric Machine (<i>macchina elettrica ausiliaria</i>) |

Altri acronimi, di significato immediato e uso più limitato, sono definiti e utilizzati localmente nel documento.

10.2 Introduzione

Con estrema semplicità e grande generalità un veicoli ibrido può essere definito come un veicolo in cui l'energia per la propulsione è resa disponibile da due o più fonti energetiche presenti a bordo¹.

Le fonti energetiche possono essere sfruttate separatamente o, più comunemente congiuntamente, in maniera tale che la potenza propulsiva utilizzabile in un certo istante è la somma dei contributi provenienti dalle fonti indipendenti presenti a bordo (Fig. 10.1).

¹ Definizione tradotta liberamente e semplificata a partire da quella presente nella norma europea CEN EN 13447.

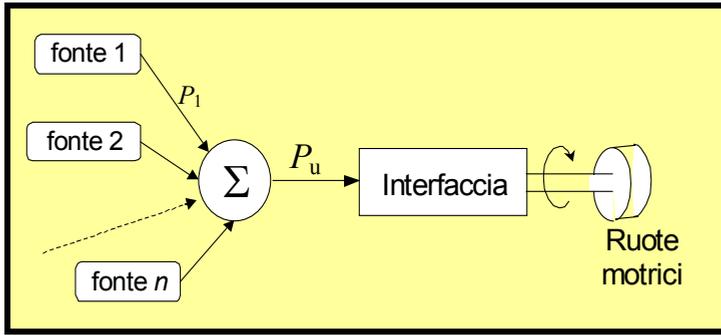


Fig. 10.1 - Schema fondamentale dei flussi energetici di un veicolo ibrido

L'equazione fondamentale di equilibrio energetico di un veicolo ibrido rappresentato nella maniera generale di Fig. 10.1 è, evidentemente:

$$P_u(t) = P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_n(t)$$

che mostra banalmente come ad ogni istante t la potenza utile necessaria per la propulsione P_u sia somma delle potenze provenienti dalle varie fonti; sussiste evidentemente un certo grado di arbitrarietà, che corrisponde a scegliere come ripartire la potenza P_u , che è quanto il nostro carico richiede, fra le varie fonti a disposizione.

Al fine di effettuare considerazioni di valore pratico ed ingegneristico occorre ridurre la generalità espressa dalla Fig. 10.1, e limitare l'attenzione a veicoli che presentano talune caratteristiche peculiari:

- il numero di fonti energetiche è pari a due
- una delle due fonti produce energia elettrica a partire da un combustibile (gas, benzina, idrogeno o altro) e l'altro è invece costituita da un sistema di accumulo di energia elettrica, e quindi può fornire solamente energia in esso preventivamente accumulata.

Utilizzando queste due condizioni, ad oggi sempre verificate in tutti i casi di pratico interesse, lo schema energetico generale di un veicolo ibrido diviene quello rappresentato in Fig. 10.2.

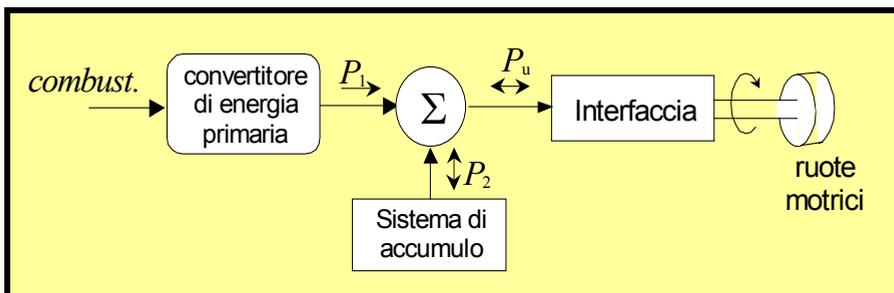


Fig. 10.2 - Schema energetico generale dei veicoli ibridi utilizzati in pratica

Lo schema di Fig. 10.2, seppur molto semplice consente già di enucleare talune importanti caratteristiche dei veicoli ibridi utilizzati in pratica:

- la fonte energetica primaria P_1 preleva energia da un combustibile (fossile o idrogeno); in conseguenza di questo essa è una fonte caratterizzata da grande *abbondanza* energetica e da *unidirezionalità* dei flussi (evidenziata in Fig. con l'utilizzazione di freccia unidirezionale sotto il simbolo P_1);
il sottosistema che converte l'energia del combustibile in energia elettrica, indicato in Fig. 10.2 con la generica espressione "convertitore di energia primaria" è indicato normalmente in campo internazionale con il termine *fuel converter*; nel prosieguo del presente documento ad esso verrà attribuito il nome più compatto: "convertitore primario"
- la fonte energetica secondaria P_2 è in realtà costituita da un sistema di accumulo, tipicamente di tipo elettrochimico, ed è quindi caratterizzata dalla possibilità di prelevare energia solo a seguito di preventivo riempimento del sistema; l'energia disponibile è normalmente molto più limitata di quella ottenibile dalla fonte primaria ed i flussi sono necessariamente bidirezionali (fatto evidenziato in Fig. con l'utilizzazione di freccia bidirezionale sotto il simbolo P_2).

Come sarà discusso in altre parti del presente volume (in particolare il Capitolo 15), il sistema di accumulo può a sua volta essere di tipo cosiddetto *ibrido* o *misto*: costituito cioè da due o più sottosistemi specializzati in differenti funzioni, ad esempio energia e potenza.

La struttura interna del sistema di accumulo ha implicazioni anche sul sistema di gestione energetica, in quanto può essere necessario stabilire ad ogni istante quale quota della potenza richiesta al sistema di accumulo debba essere erogata da ognuno dei sottosistemi che lo compongono. Nel presente lavoro, in via semplificativa, si utilizza un approccio gerarchico al controllo dei flussi di potenza con l'accumulo: le considerazioni che sono qui svolte portano ad individuare la potenza globalmente richiesta all'accumulo, mentre è affidato al gestore interno del sistema di accumulo il compito di definire la suddivisione di tale potenza fra le due (o più) fonti internamente presenti.

In conseguenza di questa scelta, nel prosieguo del presente capitolo il sistema di accumulo sarà considerato monoliticamente come un'unica entità capace di cambiare potenza con il resto del sistema, con dei vincoli di mantenimento del livello energetico interno sopra lo zero e al di sotto del massimo ammissibile.

L'equazione fondamentale di equilibrio energetico in questo caso è estremamente semplice:

$$P_u(t) = P_1^+(t) + P_2(t) \quad (1)$$

Si nota come nell'equazione (1) è stato adottato l'apice "+" per evidenziare come la potenza della fonte energetica proveniente da combustibile possa essere esclusivamente positiva.

Lo schema di Fig. 10.2 mostra in particolare come la potenza utile P_u , necessaria alle esigenze della propulsione possa essere fornita attraverso una combinazione, entro certi limiti arbitraria, della potenza della fonte primaria e secondaria; questa arbitrarietà può essere sfruttata per ottenere degli speciali obiettivi, quale ad esempio la riduzione dei consumi, delle emissioni, la parziale utilizzazione di energia per la ricarica dell'accumulo da parte della rete elettrica fissa ecc.

L'argomento del presente capitolo riguarda per l'appunto le tecniche che si possono adottare per perseguire particolari obiettivi di ottimizzazione, operando sulla ripartizione della potenza propulsiva P_u fra le due fonti disponibili P_1 e P_2 .

La letteratura su questo argomento è molto ampia. In particolare sono state proposte tecniche che possiamo definire convenzionali (spesso facenti uso della programmazione dinamica), quali gli articoli [1-6], altre innovative ad esempio basate su sistemi esperti [7], reti neurali [8] o altro [9].

Nel presente testo vengono privilegiate considerazioni di tipo ingegneristico agli approcci più prettamente matematici o automatici, in modo da evidenziare le problematiche esistenti mantenendo una buona comprensione fisica dei fenomeni interessati. Queste considerazioni derivano fra l'altro da una decennale esperienza svolta dal dipartimento di Sistemi elettrici e Automazione dell'Università di Pisa cui lo scrivente afferisce, e ampiamente documentata da letteratura scientifica [10, 12, 20, 21, 15].

Viene inoltre fornita illustrazione di un approccio particolarmente interessante sviluppato da ricercatori del Center for Automotive Research and Intelligent Transportation dell'Ohio State University [3, 2].

Il lettore che fosse chiamato ad effettuare una progettazione di un sistema nuovo è invitato a consultare anche gli articoli riportati in bibliografia al fine di individuare quale possibilità si attaglia meglio al caso in studio.

10.3 Il modulo di gestione della potenza

Lo schema presentato nella Fig. 10.2, pur essendo molto semplice, è in grado di rappresentare correttamente una grande varietà di *power train* di veicoli a propulsione ibrida.

Per poter affrontare il problema della scelta delle potenze $P_1(t)$ e $P_2(t)$ risulta inevitabile introdurre nell'analisi maggiori informazioni sulla struttura di *power train* effettivamente utilizzata. Sebbene i possibili schemi di realizzazione di *power train* ibridi siano moltissimi [11], molti di essi possono essere ricondotti a due tipologie fondamentali, dette correntemente *power train* ibrido di tipo serie e parallelo, di cui una rappresentazione semplificata è riportata nella Fig. 10.3. Un'altra tipologia molto importante sarà affrontata separatamente nel par. 10.9.

La ragion d'essere e le caratteristiche fondamentali dei vari tipi di drive train ibridi sono state trattate in altra parte del presente volume e non verranno ripetute in questa sede; verrà richiamato solamente quanto essenziale dal punto di vista della individuazione del sistema di gestione energetica.

Nella Fig. 10.3 il generico componente "Generatore Elettrico (o Electric Generator - EG)" è spesso costituito da un motore a combustione interna (Internal Combustion Engine - ICE) di tipo alternativo accoppiato con un alternatore trifase; esso può però benissimo essere di tipo diverso: l'ICE può essere ad esempio costituito da una turbina a gas, o addirittura l'EG nel suo complesso può avere natura totalmente differente, ad esempio essere basato sulla conversione diretta dell'energia chimica in elettrica a mezzo di celle a combustibile.

Analogamente, il dispositivo indicato come "Motore Meccanico (Engine)" è tipicamente ancora un ICE, ma può essere anche di altro genere.

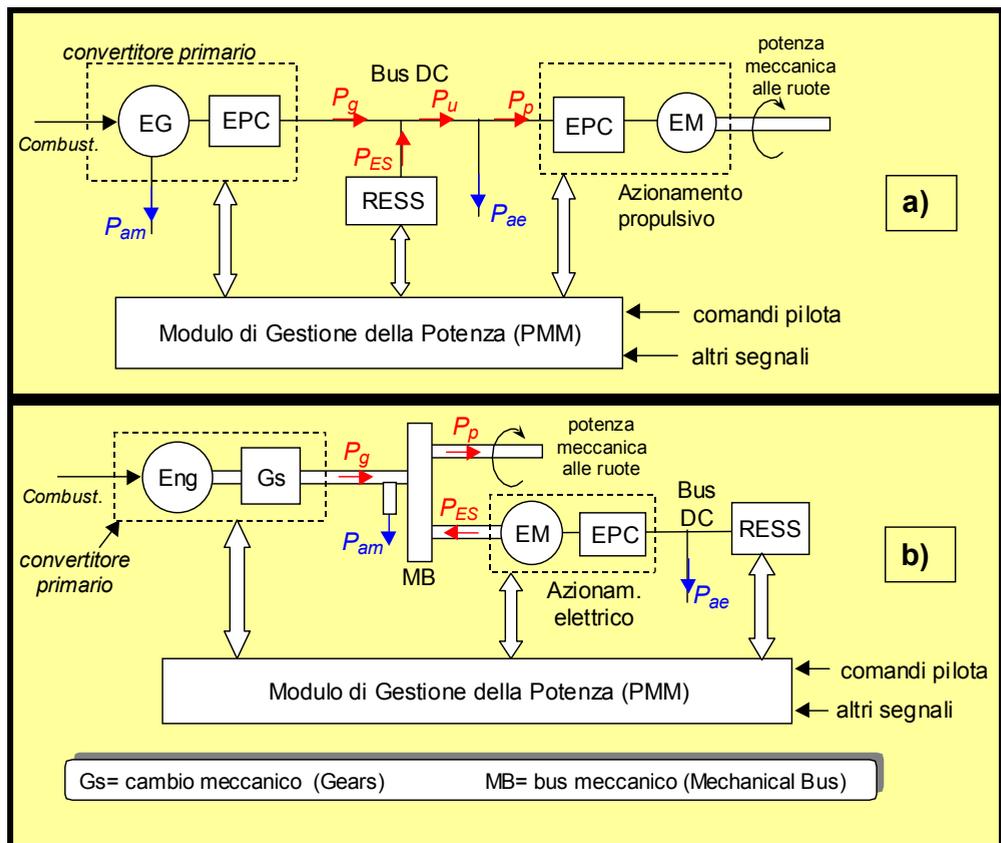


Fig. 10.3 - Disposizione di massima di power train di veicoli ibridi di tipo serie (a) e parallelo (b)

In Fig. 10.3 sono riportati i principali flussi di potenza a bordo del veicolo:

- P_g è la potenza generata, ottenuta per conversione dell'energia potenziale chimica del combustibile;
- P_{ES} è la potenza del sistema di accumulo (presa positiva quando uscente);
- P_{am} e P_{ae} sono le potenze assorbite da dispositivi ausiliari meccanici ed elettrici rispettivamente (cioè tutti i carichi meccanici ed elettrici non utilizzati per la propulsione, quali condizionatore dell'aria, sistemi di *infotainment*, luci ecc.). Nel caso dello schema parallelo P_{am} è considerata prelevata dall'albero primario del MB, ma può ovviamente provenire anche da uno qualunque degli altri alberi ad esso afferente, senza importanti effetti sulla gestione energetica del veicolo.

In caso di EG basato su celle a combustibile, evidentemente P_{am} sarà nullo, mentre l'assorbimento degli ausiliari del sistema a celle a combustibile (compressori, ventilatori, pompe, umidificatori ecc.) sarà conglobato all'interno del blocco EG, e non visualizzato quindi nello schema generale del power train.

- P_p è la potenza di propulsione

Tutte queste potenze poi variano continuamente in funzione del tempo.

Le potenze dei carichi ausiliari, sebbene molto importanti per il funzionamento del veicolo, sono normalmente di modesta entità rispetto alla potenza propulsiva, e molto meno variabili con il tempo. Pertanto esse possono essere trascurate per considerazioni di ottimizzazione di base, come quelle riportate nel presente capitolo. Evidentemente nel caso della progettazione esecutiva di un veicolo ibrido, esse dovranno essere valutate attentamente e il loro effetto potrà essere incluso nelle strategie di ottimizzazione, o quanto meno valutato quantitativamente durante le simulazioni del funzionamento del veicolo che si sta progettando, che inevitabilmente dovranno essere effettuate.

Per quanto detto da questo momento in poi si ometteranno dalle considerazioni che si svolgono le potenze degli ausiliari P_{ma} e P_{ea} , e quello che si è finora denominato *power train* verrà ora indicato con l'espressione *drive train*. Se queste grandezze sono eliminate dai diagrammi di Fig. 10.3, essi si semplificano grandemente.

In particolare si evidenzia chiaramente il ruolo del *modulo di gestione della potenza* (PMM): esso è fondamentalmente quello di interpretare i comandi del pilota e determinare, in funzione di tutte le informazioni a disposizione, quale parte della potenza propulsiva richiesta debba essere fornita dal sistema di accumulo, e quale dal convertitore primario. In altre parole, esso deve determinare come decomporre la quantità $P_p(t)$ in $P_g(t)$ e $P_{ES}(t)$:

$$P_p(t) = P_g(t) + P_{ES}(t) \quad (2)$$

Questo grado di libertà può essere usato per minimizzare una funzione obiettivo che può essere costituita dal consumo di combustibile, le emissioni gassose, o una combinazione di entrambi.

Per quanto riguarda il punto di lavoro del convertitore primario, pensando a un sistema che ha al suo interno una macchina meccanica che trasferisce la sua potenza come prodotto di coppia per velocità, nel caso di drive train di tipo ibrido serie è sufficiente che il PMM determini il valore della potenza che esso deve erogare: potrà essere il controllore interno al convertitore primario a scomporre P_g nella coppia coppia-velocità angolare che risulta ottimale dal punto di vista della funzione obiettivo prescelta.

Un esempio di questo tipo di scomposizione è fornito nel par. 10.8.1, sottoparagrafo "Gestione del segnale P_g^* ".

Nel caso invece di drive train di tipo ibrido parallelo se il cambio meccanico presente all'interno del convertitore primario è del tipo controllato, il PMM definirà individualmente coppia e velocità angolare in quanto il valore della velocità angolare influenza anche il rendimento del flusso di potenza che si ha nell'azionamento elettrico, visto che influenza la velocità angolare della macchina elettrica. Nell'esempio di veicolo con drive train di tipo parallelo riportato nel par. 10.8.2 il cambio meccanico è un cambio a variazione continua non controllata, e quindi il PMM non ha la possibilità di controllare individualmente le due componenti della potenza generata.

La relazione (2) è garantita dalla fisica dell'azionamento; pertanto solo due delle tre grandezze che vi compaiono possono essere esplicitamente determinate mediante azioni di controllo.

Una possibile scelta è la seguente:

1. $P_p(t)$ è determinata in modo da rispondere il più accuratamente possibile alle richieste del pilota. Essa può essere considerata conseguenza diretta delle caratteristiche cinematiche (accelerazione, velocità, pendenza) del percorso che il veicolo sta seguendo, massa e resistenza al moto del veicolo, e potenza perduta nell'azionamento propulsivo;
2. $P_g(t)$ è determinata dal PMM in funzione della ricerca di un funzionamento ottimale (questo verrà discusso nel seguito);
3. $P_{ES}(t)$ è determinata per differenza.

Questa scelta dà la massima focalizzazione sulla potenza utile propulsiva P_p , e la potenza generata per conversione dal combustibile; all'accumulo viene assegnato un ruolo in qualche modo accessorio. Questo corrisponde alla fisica di un veicolo ibrido, è scelta molto frequentemente utilizzata, e viene adottata nella restante parte di questo capitolo.

Si osserva esplicitamente che anche se da un punto di vista logico si predefiniscono nella (2) la P_p e la P_g , e si determina la P_{ES} , all'atto pratico la situazione può essere invertita. Ad esempio nei veicoli ibridi di tipo parallelo vengono fisicamente determinate, attraverso azioni del controllo, P_g e P_{ES} , ed è la P_p che ne viene di conseguenza (cfr. Fig. 10.3b)

Ad ogni modo la quasi totalità di quello che verrà detto nel prosieguo può essere agevolmente usata, con modifiche minimali, in caso vengano effettuate scelte differenti (che porterebbero alla individuazione di P_{ES} a mezzo di azione diretta del controllo). La scelta di determinare P_{ES} per differenza implicitamente comporta di considerare sistemi di accumulo non dotati di capacità propria di determinare la potenza di scambio: tipicamente saranno batterie di accumulatori elettrochimici direttamente connesse alla sbarra “Bus DC” senza interposizione di convertitori²; in tal caso, evidentemente, la freccia indicativa degli scambi fra PMM e RESS riportata nelle Figure 10.3 a) e b) non sarà bidirezionale ma diretta dall’accumulo verso il PMM.

L’ingresso del PMM denominato “altri segnali” è costituito da tutte quelle informazioni disponibili sul tipo di missione in atto. Esempi di questi segnali sono:

- misura della pendenza della strada;
- informazioni note a priori riguardo alle caratteristiche cinematiche del percorso (ad esempio in caso di veicoli stradali di flotta, o, a maggior ragione, veicoli su rotaia, si possono conoscere in anticipo profili attesi di velocità, accelerazione, soste ecc.);
- informazioni provenienti direttamente dal percorso. Ad esempio esse possono essere informazioni sul posizionamento del veicolo provenienti dal sistema GPS o Galileo, dati provenienti dal sistema di segnalamento in caso di veicoli ferroviari ecc.

Le frecce bidirezionali rappresentate in Fig. 10.3 fra il PMM e i vari blocchi di potenza rappresentano in generale scambi bidirezionali di segnali. Il segnale indicato con il simbolo “ON” è un segnale che determina l’accensione e lo spegnimento del motore a combustione interna, rispettivamente quando passa da inattivo ad attivo e viceversa.

Si può però osservare che il principale scambio di informazioni fra PMM e convertitore primario è costituito dal valore desiderato P_g^* della potenza P_g che esso è chiamato ad operare; in caso sia $P_g^*=0$ il PMM può richiedere esplicitamente lo spegnimento del convertitore primario, per evitare l’inutile assorbimento di potenza correlato al funzionamento in *stand by* dei componenti ad esso interni quale ad esempio l’ICE o un una pila a combustibile.

Il principale scambio informativo fra PMM e RESS è costituito da una indicazione della quantità di energia presente nell’accumulatore, indicata qui con il termine LOE (Level Of Energy) Questo indicatore è un valore normalizzato che vale 0 a serbatoio completamente vuoto e 1 a serbatoio completamente pieno.

Nel caso di accumulatori elettrochimici è tradizione indicare la carica immagazzinata, attraverso l’indicatore detto in ambito internazionale SOC (State-Of-Charge). Evidentemente a SOC=1 e SOC=0 corrispondono serbatoio completamente pieno e vuoto rispettivamente. Nel successivo paragrafo 10.4.4 verrà fornito qualche dettaglio sulla maniera di valutare operativamente SOC.

² È il caso dei primi bus dell’ALTRA, vedi Capitolo 19 sul trasporto urbano.

Infine, il principale scambio informativo fra il PMM e l’Azionamento Propulsivo è il valore desiderato T^* della coppia T da applicare alle ruote per soddisfare alle esigenze della propulsione, tenuto conto delle strategie di ottimizzazione adottate.

Con le scelte sopra riportate (omissione delle potenze degli ausiliari dall’analisi, determinazione della potenza dell’accumulo per differenza, e identificazione dei principali scambi informativi) gli schemi di Fig. 10.3 si semplificano e divengono quelli riportati in Fig. 10.4.

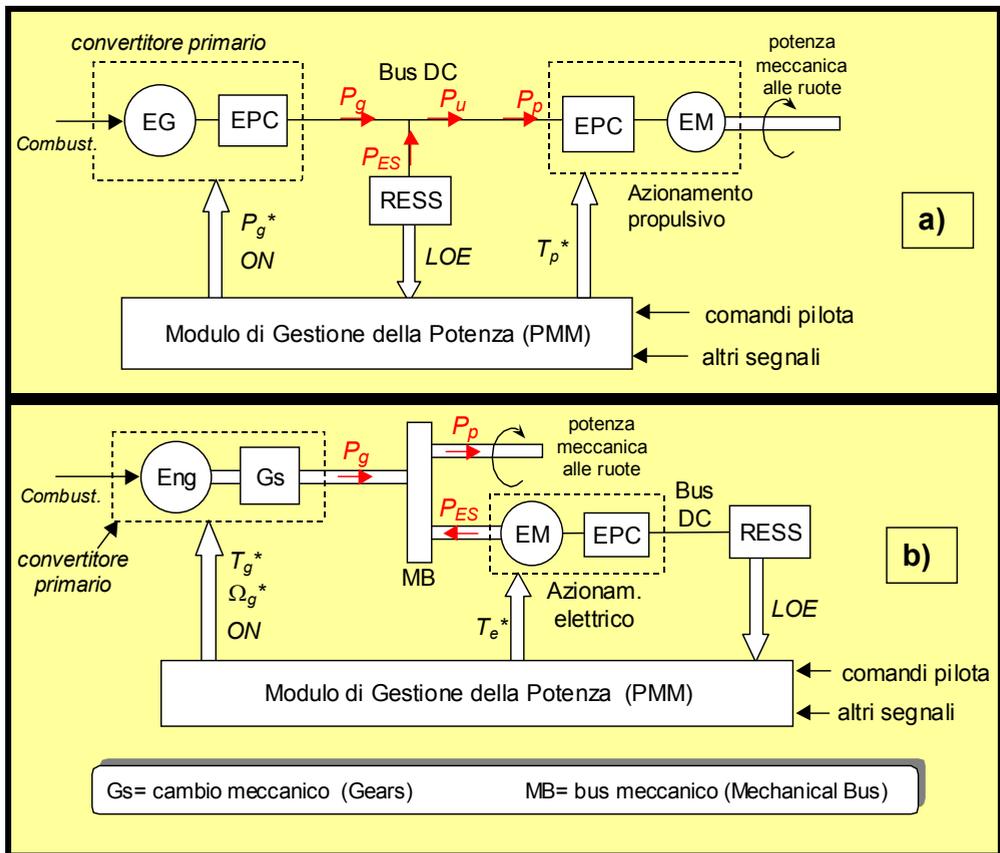


Fig. 10.4 - Schemi di massima di power train di veicoli ibridi di tipo serie (a) e parallelo (b) nell’ipotesi di trascurare le potenze degli ausiliari e determinare la potenza P_{ES} per differenza

10.4 Principali problematiche di ottimizzazione dei flussi energetici

È stato affermato nell'introduzione che l'obiettivo fondamentale del PMM di un veicolo ibrido è quello di determinare la ripartizione della potenza necessaria alla propulsione fra tutte le fonti di potenza disponibili, tenendo conto degli ingressi provenienti dal pilota ed ogni altra possibile informazione disponibile.

Il raggiungimento di questo obiettivo pone complessi problemi di controllo relativi a:

- la scelta della corretta funzione obiettivo da minimizzare
- la necessità di possedere una previsione del carico futuro basata sulle informazioni disponibili durante il funzionamento del veicolo
- le caratteristiche del veicolo considerato, in particolare la possibilità di particolari funzioni quale la marcia in modalità detta "puramente elettrica" (assenza motori meccanici in funzione) o la possibilità di ricaricare l'accumulatore di energia dalla rete elettrica fissa alla fine del percorso in atto.

In questo paragrafo vengono analizzate con un certo grado di dettaglio queste problematiche, e proposto uno schema logico del PMM che, pur semplice, consente di tenere in debito conto tutte queste problematiche

10.4.1 Scelta della funzione obiettivo da minimizzare

Il Sistema di Gestione Energetica di un veicolo ibrido opera in generale con l'obiettivo di minimizzare una certa funzione obiettivo, la quale in generale conterrà il consumo di combustibile e le emissioni dannose per l'ambiente, in maniera da tentare di minimizzare entrambi.

In realtà, se si eccettuano rari casi (come quelli proposti in [15, 9]), normalmente si procede semplicemente a tentare di minimizzare il combustibile, tenendo in conto le emissioni gassose come un *vincolo* del problema di ottimizzazione: in tal modo fintantoché le emissioni dannose rimangono nei limiti di legge, esse non influenzano il processo di ottimizzazione. Questa scelta è giustificata considerando che nella nostra organizzazione sociale i consumi sono direttamente associati a dei costi espliciti, mentre le legislazioni, pur ponendo limiti ai diversi inquinanti, non danno al momento vantaggi economici a quei veicoli che sono capaci di emettere molto al di sotto dei limiti.

Ciononostante si riportano qui alcune considerazioni utili all'effettuazione di una ottimizzazione combinata di combustibile ed emissioni.

Il problema fondamentale consiste nel rendere confrontabili delle quantità che per loro natura sono estremamente differenti. Per far ciò si può ipotizzare che i limiti posti dalla legislazione sui diversi inquinanti siano effettivamente e quantitativamente indicativi della loro pericolosità per l'ambiente e la salute dell'uomo.

Se questo è accettato, si può pensare di conferire lo stesso peso a tutti gli inquinanti che siano numericamente proprio pari ai rispettivi limiti.

Seguendo questo approccio la funzione obiettivo da minimizzare può essere espressa come segue:

$$C_1 = c_1 + U_p (c_{CO} / l_{CO} + c_{HC+NOx} / l_{HC+NOx} + c_{PM} / l_{PM}) \quad (3)$$

dove:

- c_1 è il costo unitario di combustibile in g/km o g/kWh.
- l_{CO} , l_{HC+NOx} , l_{PM} sono i valori massimi consentiti dei corrispondenti inquinanti, espressi in g/km (veicoli stradali, soggetti a normativa EURO IV) o g/kWh (veicoli ferroviari, soggetti a normativa UE Stage III);
- c_{CO} , c_{HC} , c_{NOx} , c_{PM} sono le emissioni effettive, nelle stesse unità dei corrispondenti limiti. Essendo le emissioni dei motori a combustione interna note in termini di g/kWh, in caso si scelga di esprimere c_1 in g/km si può usare per ogni veicolo un valore fisso di km/kWh, ad esempio ottenuto da precedenti simulazioni dello stesso viaggio;
- U_p è un peso, espresso nelle stesse unità di c_1 , che esprime il valore economico attribuito all'inquinamento, e rende l'inquinamento comparabile ai consumi. Esso indica quanto viene valutato in termini monetari l'inquinamento prodotto da inquinanti tutti pari al limite di legge.

L'equazione (3) può essere utilizzata per determinare sia la potenza da attribuire al convertitore primario che, nel caso al suo interno sia presente un motore a combustione interna, come scomporre questa potenza in termini di coppia e velocità.

10.4.2 Orizzonte temporale della ottimizzazione

Per effettuare un'ottimizzazione di una qualsivoglia funzione obiettivo relativa ad un sistema funzionante nel tempo occorre definire l'orizzonte temporale dell'ottimizzazione.

La prima osservazione, pur ovvia, che si può fare è che ogni veicolo, quindi anche un veicolo ibrido ha un funzionamento composto da viaggi intercalati da periodi di riposo. Una prima semplificazione, che appare senz'altro ragionevole, è di pensare di effettuare delle ottimizzazioni indipendenti per ognuno dei viaggi.

Si nota che questo costituisce un'approssimazione. Se ad esempio un veicolo compie due distinti viaggi in cui il primo caratterizzato da richieste di potenza relativamente alte e il secondo da velocità molto basse, ed inoltre l'ICE (come talvolta accade) è caratterizzato da bassi consumi specifici alle alte potenze e alti consumi specifici a quelle basse, un'ottimizzazione integrata consentirebbe di avere alla fine del primo viaggio una elevata quantità di energia nell'accumulo, sfruttabile nel secondo viaggio per avere tratti a propulsione puramente elettrica, evitando di far funzionare l'ICE a basse potenze con consumi elevati. Un'ottimizzazione separata per

i due viaggi non consente evidentemente di concepire questo tipo di logiche.

Naturalmente anche se nell'esempio specifico il problema può essere aggirato considerando "viaggio" l'assieme dei due viaggi parziali prima citati, esso si ripresenta inevitabilmente allorquando una definizione di "viaggio" è consolidata.

L'ottimizzazione del funzionamento all'interno di un singolo viaggio, che può essere anche molto complesso, e comprendere delle pause (ad esempio ai semafori, ma anche di altro genere), richiede una conoscenza aprioristica delle caratteristiche del viaggio stesso. Conoscendo infatti le richieste di potenza istantanee di tutto il viaggio si può scegliere il percorso del drive train ibrido che massimizzi (o minimizzi) un dato obiettivo funzione delle variabili di funzionamento del sistema, ad esempio minimizzi il consumo di combustibile.

Una conoscenza abbastanza precisa del viaggio da effettuare si ha ad esempio nel caso dei veicoli ferroviari. In effetti in questo caso il profilo di velocità in funzione dello spazio percorso è noto a priori con una certa precisione, ed un'ottimizzazione può essere individuata con buona precisione all'inizio del viaggio, o addirittura precalcolata in funzione delle tracce orarie dei convogli.

Un caso ancora relativamente favorevole alla conoscenza a priori delle caratteristiche di richiesta di potenza durante il viaggio si ha nel caso di veicoli appartenenti a flotte di veicoli stradali dedicate a compiti specifici ad esempio per la distribuzione della posta, dei medicinali, o al trasporto persone su linee di autobus. Evidentemente il traffico stradale ha maggiori elementi di aleatorietà del caso ferroviario, ma sussiste ancora una buona prevedibilità del carico.

Nel caso, molto importante, del traffico stradale con vetture private, invece, una conoscenza a priori della potenza richiesta dall'azionamento durante un viaggio è assolutamente difficoltosa e ricca di incertezza. In questi casi può essere ragionevole ridurre l'orizzonte temporale ad una frazione del viaggio e limitarsi, ad esempio, ad una previsione a breve tempo di una media mobile della potenza richiesta dal carico.

In tutti questi casi la gestione energetica deve prevedere un algoritmo di previsione del carico che conterrà elementi noti a priori (ad esempio il profilo di missione nel caso di sistemi ferroviari) ed elementi desunti da misure *on-line*.

Vi sono peraltro tecniche di gestione energetica di veicoli ibridi in cui è possibile eliminare completamente la previsione del carico in quanto si effettua una ricerca di ottimo locale, cioè relativo alle sole variabili attive nell'istante considerato. Importanti studi, in particolare quello in [3] hanno mostrato che anche questo approccio, per così dire, "rinunciatorio" dal punto di vista della previsione del carico, è in grado di produrre gestioni energetiche dei veicoli ibridi di notevole qualità, pur con una considerevole riduzione della complessità del problema da studiare.

In questo capitolo verranno presentati due approcci alla gestione energetica dei veicoli ibridi: la gestione “a filtro di potenza” (par. 10.5) nella quale l’orizzonte temporale dell’ottimizzazione è a breve termine e quindi ci si accontenta di effettuare una previsione della sola potenza media della parte più imminente del viaggio, e la gestione “a ottimizzazione locale” in cui non è necessario effettuare previsione del carico.

10.4.3 Inclusionione nelle logiche della modalità di marcia puramente elettrica e di ricarica dell’accumulo da rete fissa

Molti veicoli a propulsione ibrida vengono progettati per essere in grado di funzionare anche in modalità cosiddetta “puramente elettrica”: si tratta di un modo di funzionamento in cui il motore a combustione interna rimane spento, e quindi la marcia è assimilabile a quella di un veicolo elettrico a batteria, con emissioni inquinanti nulle e marcia estremamente silenziosa.

Evidentemente per avere autonomie accettabili, anche se non comparabili con quelle dei veicoli solo elettrici, è necessario prevedere delle batterie di capacità (in termini di energia accumulabile) maggiorata rispetto a veicoli previsti soltanto per il funzionamento ibrido.

Un’altra importante opzione che può essere aggiunta, e che di recente è sempre maggiormente considerata, consiste nella possibilità di ricarica dell’accumulo di bordo da rete fissa: quando il veicolo rientra alla base (appartamento, parcheggio di flotte ecc.), può essere connesso alla rete elettrica che ne ricarica la batteria di accumulatori.

Questa funzione può presentare notevoli vantaggi economici in quanto in molti casi, sia per ragioni tecniche che fiscali, può convenire acquistare energia elettrica dal distributore della rete fissa, piuttosto che generarla a partire dal combustibile attraverso il motore a combustione interna e il generatore elettrico presenti a bordo.

Le funzioni di marcia in modalità puramente elettrica e di *plug-in* sono spesso associate in un veicolo in quanto entrambe traggono profitto da sistemi di accumulo maggiorati, e quindi una volta che si è deciso di utilizzare un sistema di accumulo particolarmente capiente è conveniente utilizzarlo per più funzioni.

Quando un veicolo ibrido ha accumulo dimensionato sulle funzioni di marcia puramente elettrica e/o *plug-in*, capita che nel normale funzionamento il livello energetico dell’accumulo oscilla in maniera modesta, ad esempio del 5% rispetto alla totale capacità. Accade quindi che il sistema di gestione energetica sia chiamato a determinare dove posizionare la banda di oscillazione all’interno dell’intero campo del LOE.

Su questo punto si possono svolgere le seguenti considerazioni:

- quando il drive train ibrido opera in modalità ibrida e non sono previste a breve né marcia puramente elettrica né ricarica da rete, si insegue il criterio di ottimo scelto;
- se prevista a breve una marcia puramente elettrica è importante operare in modo che il serbatoio sia pronto (cioè sostanzialmente pieno) quando il veicolo inizia questo tipo di marcia;
- se è prevista a breve ricarica da rete può essere utile avere il serbatoio prossimo ad essere vuoto all'arrivo in prossimità del punto di ricarica per aumentare l'energia che attraverso di esso viene introdotta, in modo da sfruttarne al massimo i vantaggi economici³.

10.4.4 Misura del livello energetico dell'accumulo

La misura, o la stima del livello energetico dell'accumulo richiede tecniche che dipendono dal tipo di accumulo considerato.

L'energia accumulata in un volano o in un condensatore, ad esempio, è infatti semplicemente ottenibile attraverso le semplici relazioni $E_v = (1/2)J\Omega^2$ o $E_v = (1/2)CV^2$

Nel caso invece, di gran lunga più frequente, di accumulatori di tipo elettrochimico, questa misura può essere molto difficoltosa in quanto l'energia accumulata non è direttamente associabile con una variabile misurabile dall'esterno, come invece è nei due casi appena citati.

Per avere un'indicazione il più possibile accurata dell'energia erogabile da un accumulatore elettrochimico è opportuno partire dalla stima del cosiddetto *stato di carica* (o State Of Charge - SOC) della batteria in luogo del livello energetico, esprimerlo in maniera normalizzata (0= batteria scarica, 1= batterie piena), e utilizzare questo indicatore come indicatore anche del livello energetico dell'accumulo, previo eventuale correttivo per tener conto del fatto che l'energia erogabile da una batteria dipende dalla corrente di scarica più fortemente della carica erogabile.

³ Lo svuotamento del serbatoio per favorire la ricarica da rete è spesso indicato nella letteratura internazionale con l'espressione "charge depleting operation".

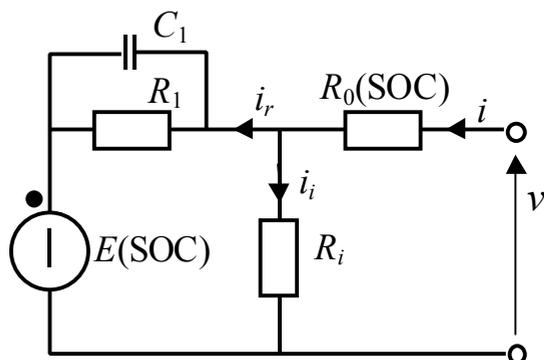


Fig. 10.5 - Rappresentazione circuitale del modello considerato di accumulatori elettrochimici

Ai fini di comprendere come effettuare la stima del SOC della batteria si fa riferimento ad un semplice modello elettrico equivalente dell'accumulatore (Fig. 10.5)

Questo modello, presentato in bibliografia per vari tipi di accumulo [4, 5, 12] consente di utilizzare per l'analisi un circuito equivalente, seppur a parametri dipendenti dal SOC.

Nel circuito il fenomeno di accumulo della carica è associato alla corrente che attraversa la forza elettromotrice E :

$$Q_e = \int_0^t (-i_r) dt$$

Con il simbolo Q_e si è indicata la "carica estratta": un'indicazione della carica accumulata nella batteria, misurata positivamente quando uscente, e alla quale viene attribuito convenzionalmente il valore $Q_e=0$ a batteria completamente piena. La ragione per cui si è scelta la carica estratta e non quella entrante consiste nel fatto che la condizione di batterie completamente piena è più chiara e ripetibile di quella di batteria completamente scarica.

La corrente i_i invece modella fenomeni irreversibili che occorrono all'interno dell'accumulatore, e quindi fa sì che non tutta la carica che entra nella batteria (integrale di i) è accumulata all'interno (carica Q_e).

Se la corrente i_i è modesta o trascurabile, una buona stima di Q_e può essere ottenuta, per durate relativamente modeste dell'integrale, approssimando i con i_r e scrivendo quindi:

$$Q_e = \int_0^t (-i) dt \quad (4)$$

È evidente che a lungo andare, per gli inevitabili errori di misura di i , di calcolo di Q_e , e per effetto della non perfetta uguaglianza di i con i_r , la valutazione di Q_e tramite la (4) tende ad essere sempre meno attendibile, fino ad essere completamente inutilizzabile.

Gli errori indotti dall'uso della (4) possono essere eliminati, almeno parzialmente, se periodicamente la batteria attraversa lunghi periodi di riposo. È stato infatti mostrato in molti studi, fra cui quello in [22], come esista una buona correlazione, almeno per le batterie al piombo e al litio, fra la tensione di riposo

so della batteria, spesso detta OCV (Open Circuit Voltage) e lo stato di carica interno; analoga correlazione può quindi essere scritta, secondo le nostre convenzioni, fra OCV e Q_e .

Per quanto riguarda le batterie NiMH la situazione è più problematica, sia perché per ampi tratti dello stato di carica il'OCV varia in maniera troppo modesta perché la misura di quest'ultima possa essere utilizzabile per la stima dello stato di carica, sia perché sono stati osservati da taluni fenomeni di isteresi della curva OCV rispetto allo stato di carica [23].

Supponendo di possedere, attraverso le tecniche appena discusse, una misura sufficientemente affidabile di Q_e , essa può essere utilizzata per ricavare il SOC

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_m, \theta)}$$

in cui la grandezza C è la "capacità della batteria".

Come osservato in precedenza, la definizione del SOC è formulata in maniera tale che alle condizioni di batteria totalmente carica e scarica corrispondono SOC=1 e 0 rispettivamente.

Purtroppo la stessa capacità della batteria, intesa come carica erogabile a partire da piena carica in condizioni prefissate di scarica, non è caratterizzata da un unico numero, ma da una funzione della temperatura della batteria θ e dalla corrente media di scarica I_m . Di conseguenza lo stesso SOC è funzione delle condizioni termiche della batteria (approssimativamente misurabili attraverso una misura della temperatura dell'involucro della batteria stessa) e della corrente media di scarica. Per approfondimenti su questo argomenti si suggerisce l'articolo [23].

Se ad esempio si considera la scarica con la corrente costante I , la relazione fra carica ed energia è:

$$E_e = \int_0^T v I dt = I \int_0^T v dt = ITV_m = V_m Q_e \quad (5)$$

essendosi ovviamente indicata con V_m la tensione media di scarica.

Si osserva sperimentalmente con tutti i tipi di accumulatori che la tensione media di scarica decresce al crescere della corrente di scarica dalla (5); pertanto al crescere della corrente di scarica il rapporto fra E e Q_e di riduce; quindi stime dell'energia basate solo sulla Q_e sono tanto più ottimistiche quanto più elevata è la corrente di scarica.

Come già osservato, il valore di SOC può poi essere utilizzato, in via approssimativa, tal quale come stima del LOE, oppure essere corretto (con tecniche su cui non ci si sofferma) per tener conto del differente andamento delle due grandezze, in particolare il fatto sperimentale che l'energia erogabile da un accumulatore è più variabile con l'entità della corrente di scarica della carica erogabile.

10.5 Gestione a filtro di potenza e ON/OFF del convertitore primario

Qualunque sia la tipologia di veicolo ibrido in esame (serie, parallelo, complesso), e qualunque sia il dimensionamento dei singoli componenti il drive train, si può in generale dire che la potenza “utile” P_p che viene assorbita per la propulsione può essere immaginata costituita da un valor medio a cui si sovrappone un “ripple”; in questo modo l’eq. (2) si modifica come segue:

$$P_p(t) = P_{pm} + r(t) \quad (6)$$

dove, ovviamente, $r(t)$ è a valor medio nullo.

Appare ragionevole pensare di controllare il sistema in modo che la quantità $r(t)$ sia parte di $P_{ES}(t)$ e non penetri nel convertitore primario:

$$P_{ES}(t) = P_{ESm} + r(t) \quad P_g(t) = P_{pm} - P_{ESm} \quad (7)$$

In tal modo la potenza erogata dal convertitore primario P_g , sebbene ancora in generale funzione del tempo, si intende dotata di un’evoluzione molto più lenta di quella del carico P_p , essendo quest’ultima stata depurata del ripple $r(t)$. In questa maniera, pertanto, si fanno erogare al generatore soltanto le componenti più lente della potenza richiesta dal carico (P_a) più un eventuale termine aggiuntivo, positivo o negativo, P_{ESm} , che può essere utilizzato per scopi speciali come si vedrà in seguito.

Questa scelta, proposta ad esempio in [6, 12, 21], è alla base della gestione energetica *a filtro di potenza*⁴ e può essere giustificata come segue:

- la scelta di far gravare il ripple sulle batterie invece che sul convertitore primario nasce dall’ipotesi di fondo che il rendimento di ciclo del trasferimento di energia all’accumulo sia sufficientemente elevato da sovracompendere l’eventuale utilizzazione del convertitore primario in zone a bassa efficienza; questa ipotesi trae origine da considerazioni quantitative svolte in casi specifici sulle mappe di rendimento dei motori a combustione interna
- in caso di convertitore primario basato su ICE, per ridurre consumi ed emissioni è importante ridurre i transitori a cui esso è sottoposto;
- la relativa arbitrarietà che si ha nella scelta di P_{ESm} fa sì che P_g può essere scelto, entro certi limiti, in maniera da far lavorare il convertitore primario in condizioni di alto rendimento;
- in caso di convertitore primario basato su celle a combustibile (ovviamente utilizzabili sono nel caso di veicoli ibridi di tipo serie) l’elevato costo di queste ultime rende molto importante ridurre il più possibile la potenza di dimensionamento; tenendo conto che esse sono sovraccaricabili molto po-

⁴ Questo tipo di gestione è spesso indicata nella letteratura internazionale con il nome di “load following”.

co la scelta (6)-(7) consente di evitare di far loro erogare le componenti veloci della potenza propulsiva $r(t)$, evidentemente contribuisce a limitare la loro potenza; ad esempio se viene scelto $P_{ESm}=0$, il generatore sarà dimensionato solo per la potenza media di propulsione.

Per quanto riguarda il valore della grandezza P_{ESm} , esso può essere scelto in maniera da mantenere costante il Livello Energetico dell'Accumulo (salvo ovviamente le modeste fluttuazioni dovute alla presenza di $r(t)$). In questo caso, ovviamente, esso sarà un valore negativo, che servirà a compensare le perdite di energia che avvengono all'interno dell'accumulo per effetto del transito di $r(t)$. Il sistema di gestione energetica potrà banalmente imporre che il generatore eroghi una potenza P_g pari a:

$$P_g(t) = P_{pm} - P_{lcost} \quad (8)$$

essendo P_{lcost} una potenza calcolata mediante un controllo in retroazione che tenda a mantenere costante il LOE.

In tal caso lo scrivente propone il nome di controllo a filtro di potenza puro e non si prevede lo spegnimento del convertitore primario durante il viaggio.

In altri casi la batteria può essere utilizzata per aiutare l'ICE a lavorare in zone ad alta efficienza; ad esempio quando sono richieste potenze propulsive molto basse che implicherebbero funzionamento dell'ICE a basso rendimento con taluni drive train risulta possibile fermare l'ICE e operare il veicolo con l'energia della batteria scaricandola progressivamente ($P_{ES}=P_p$, $P_{ESm}=P_{pm}$); in un secondo momento l'ICE può essere riaccessibile in modo da ricaricare la batteria e fornire potenza propulsiva operando a potenze più elevate e zone a miglior rendimento. Tecniche di questo tipo sono proposte ad esempio in [6, 7, 19] (⁵).

Nell'adottare la tecnica di spegnere il motore a combustione interna durante la marcia del veicolo occorre naturalmente tenere in considerazione che alla riaccensione il motore potrebbe essersi raffreddato, e quindi lavorare inizialmente con efficienze peggiorate; inoltre ripetuti avviamenti potrebbero causare eccessivo logorio dei cuscinetti di strisciamento che, nei primissimi istanti del transitorio di avviamento come è noto non vengono lubrificati correttamente.

Il sistema di gestione energetica può essere progettato per tenere in considerazione anche gli oneri aggiuntivi connessi con il singolo avviamento, in maniera che durante la gestione venga scelto di spegnere l'ICE soltanto quando si valuta che il beneficio supera l'onere connesso al successivo riavviamento [10].

⁵ Quando si prevede di accendere e spegnere il convertitore primario nella letteratura internazionale si parla spesso di gestione "ON/OFF", intendendosi normalmente che quando il convertitore è acceso esso lavori a potenza costante. La logica proposta nel presente paragrafo, quindi, integra le gestioni di tipo "load following" e "ON/OFF".

Che P_{ES} sia nullo o meno, deve comunque essere presente un sistema per controllare il livello energetico dell'accumulo (LOE), come specificato nei precedenti paragrafi.

In particolare si può definire una zona operativa di normale funzionamento con LOE all'interno di un campo predeterminato $LOE_l \div LOE_u$ (ad es. fra il 0,25 e 0,9) in modo che sussistano sempre margini per contribuire alla propulsione utilizzando energia elettrica o recuperare energia durante le frenate anche quando LOE è vicina rispettivamente al minimo o al massimo di normale funzionamento. Se la misura del LOE mostra deviazioni eccessive rispetto al valore desiderato, esse possono essere compensate aumentando o riducendo il valore desiderato di P_{ESm} .

All'interno della zona operativa di normale funzionamento è opportuno scegliere la posizione del LOE in maniera tale da minimizzare le perdite nell'accumulo energetico.

Questo implica sostanzialmente far lavorare il sistema di accumulo intorno a punti di lavoro che abbiano un'elevata efficienza incrementale, ricavabile anche sperimentalmente come ad esempio è mostrato nell'articolo [20].

Vale la pena di menzionare che P_{pm} della (6) è essa stessa una funzione del tempo, ma avente un'evoluzione molto più lenta di $P_p(t)$ e $r(t)$. Ad esempio P_p ha normalmente forti variazioni in intervalli di durate di alcuni secondi: l'accelerazione tipica di un veicolo stradale, richiedente alti valori di P_p , dura pochi secondi e può essere seguita da una frenata, che è normalmente più breve; all'opposto P_{pm} può variare in maniera sensibile se osservata in intervalli di durata di minuti, ad esempio quando un veicolo si muove da un'area urbana, che implica bassi valori di P_{pm} verso una strada suburbana di grande comunicazione.

La gestione a filtro di potenza, così come illustrata nel presente paragrafo, ha il difetto di tenere in conto ai fini dell'ottimizzazione le perdite energetiche dovute agli scambi con il sistema di accumulo, in maniera non integrata in una funzione di ottimo, ma semplicemente selezionando, quando possibile, valori del LOE di riferimento che comportino alti valori dell'efficienza incrementale dell'accumulo, concentrandosi essa nella ricerca del punto di lavoro ottimale del convertitore primario. Peraltro presenta elementi di notevole flessibilità in quanto consente:

- di gestire l'accumulo a LOE anche ampiamente variabile nel tempo;
- di facilitare il raggiungimento di alti livelli di accumulo per far fronte alle zone da percorrere in marcia solo elettrica o bassi per utilizzare appieno l'opzione plug-in;
- di consentire una valutazione energetica degli effetti di spegnimento temporaneo del convertitore primario.

10.5.1 Previsione del carico

Per poter effettuare la gestione energetica proposta in questo paragrafo, è necessario possedere quanto meno una stima della potenza media della parte restante del viaggio, o quanto meno della parte immediatamente a venire della parte restante del carico.

Nel momento di formulazione della previsione, l'algoritmo di previsione può sfruttare in generale non soltanto i precedenti valori di $P_p(t)$, ma anche altre informazioni sia a priori (ad es. informazioni sulla tipologia di percorso nel caso di veicoli appartenenti a flotte con profilo di missione noto) che misurate (pendenza della strada) che ricevute *on-line* da sistemi evoluti di telecomunicazione (informazioni sul traffico stradale o su lavori in corso) e correlate con la posizione del veicolo (conosciuta attraverso sistemi di posizionamento tipo GPS o Galileo).

In primissima approssimazione la previsione P_{pmp} (potenza di propulsione media prevista) può essere ottenuta utilizzando un semplice filtraggio della storia recente di $P_p(t)$, nell'ipotesi che il linea di massima a breve il viaggio proceda come è finora stato, ad esempio si può porre: $P_{pmp}(t)$ è l'uscita di un filtro avente come ingresso $P_p(t)$ e funzione di trasferimento $1/(1+sT)$

$$P_{pmp}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t P_p(\tau) d\tau$$

In entrambi i casi è molto delicata la scelta del tempo caratteristico T .

La definizione dell'algoritmo di previsione è di grande importanza e pertanto appare utile sviluppare l'argomento con ricerche ad hoc. Potrebbero essere considerati ad esempio strumenti avanzati di previsione del carico che facciano uso di logica *fuzzy* o reti neurali.

10.6 Gestione a ottimizzazione locale

In tutti i casi in cui si voglia gestire un veicolo ibrido a stato di carica sostanzialmente costante (salvo oscillazioni locali di modesta entità intorno al valore desiderato) e quindi, fra l'altro, in cui non sia previsto lo spegnimento temporaneo del motore a combustione interna nei casi in cui si troverebbe, se acceso, inevitabilmente a funzionare in zone a basso rendimento, si può attuare la logica di gestione ad ottimizzazione locale, come descritta negli articoli [2, 3].

Questa logica, rispetto a quella descritta nel precedente paragrafo, presenta il vantaggio di tenere adeguatamente in conto, sia pur con ottimizzazione locale, sia del rendimento di conversione del convertitore primario che del sistema di accumulo elettrochimico, nonché di non richiedere la presenza di un sistema di previsione del carico.

Per descrivere questo tipo di logica immaginiamo innanzitutto di discretizzare il tempo del viaggio considerato in un set di istanti t_1, t_2, \dots, t_N . e facciamo riferimento, come grandezza da ottimizzare, al consumo di combustibile del convertitore primario.

In tal modo l'ottimizzazione *globale* può essere espressa dalla ricerca del seguente minimo:

$$\min_{\{P_g(t_k), P_{AE}(t_k), i \in \{1, 2, \dots, N\}\}} \sum_{i=1}^N \dot{m}_c(t_i) \quad (\text{ottimizzazione globale})$$

in cui $\dot{m}_c(t_i)$ è il flusso di combustibile (massa nell'unità di tempo) all'istante t_i . In sostanza si analizzano tutte le combinazioni possibili di P_g e P_{ES} nel tempo t_N e si sceglie la combinazione più favorevole dal punto di vista del consumo di combustibile nel viaggio.

Nell'approccio proposto di ottimizzazione locale, invece, il problema è grandemente semplificato passando alla ricerca del più semplice minimo, da ricavare al generico istante t_i :

$$\min_{\{P_g(t_i), P_{AE}(t_i)\}} \dot{m}_{ceq}(t_i) \quad (\text{ottimizzazione locale})$$

in cui $\dot{m}_{ceq}(t_i)$ è il flusso di combustibile equivalente all'istante t_i . Questa grandezza p definita come la somma del consumo effettivo del convertitore primario $\dot{m}_c(t_i)$ più il tasso equivalente di utilizzo di combustibile dovuto al flusso di energia con l'accumulo $\dot{m}_{cES}(t)$:

$$\dot{m}_{ceq}(t) = \dot{m}_c(t) + \dot{m}_{cES}(t)$$

L'introduzione del termine dovuto al flusso di energia con l'accumulo è connesso con l'ipotesi di base di questo tipo di gestione che l'utilizzo dell'accumulo sia a bilancio netto di energia: quella utilizzata durante la fase di scarica verrà recuperata in una fase successiva utilizzando combustibile proveniente dal convertitore primario, o direttamente, o indirettamente attraverso una frenatura a recupero. In altre parole ogni uso istantaneo dell'accumulo energetico è convertito in termini di un costo futuro di combustibile.

Per far ciò verrà utilizzato un valore medio o tipico di efficienza energetica per convertire questi percorsi energetici in consumo di combustibile equivalente. Questo valore di efficienza terrà conto non solo dell'efficienza della macchina elettrica e del suo convertitore di interfaccia con il drive train, ma anche dell'efficienza di carica/scarica della batteria.

L'obiettivo del mantenimento dello stato di carica in un ristretto intorno di un valore desiderato è ottenuto correggendo la ripartizione delle potenze considerata ottimale nel senso di caricare o scaricare l'accumulo rispettivamente nei casi in cui esso si trova al di sotto o al di sopra rispettivamente del valore desiderato di SOC.

L'entità della correzione dipende ovviamente dalla deviazione riscontrata; si è scelta una legge di correlazione non lineare del tipo di quella riportata in Fig. 10.6, in modo da avere correzioni trascurabili se le deviazioni dal SOC rimangono modeste, affinché in questi casi l'algoritmo di ottimo locale possa operare efficacemente.

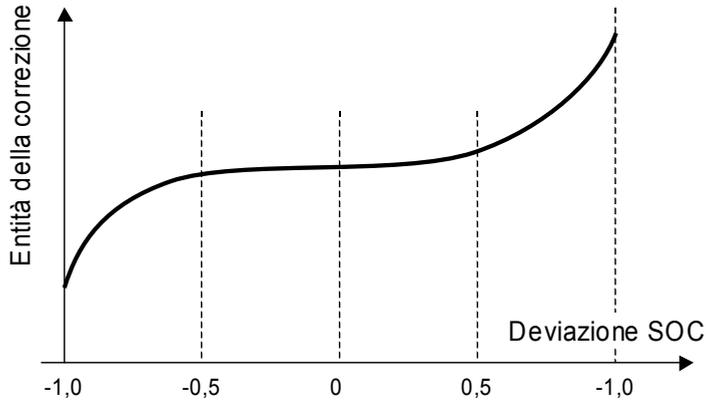


Fig. 10.6 - Correzione dell'ottimo locale in funzione della deviazione dal valore desiderato di SOC

Il metodo dell'ottimizzazione locale è stato utilizzato su di un prototipo di veicolo ibrido a drive train parallelo con motore a combustione interna dotato di trasmissione automatica a 4 rapporti. Nell'applicazione a questo caso studio, ad ogni istante venivano determinati dal PMM sia la potenza della macchina elettrica (e quindi anche dell'ICE) che il valore del rapporto del cambio da utilizzare.

La sperimentazione effettuata sul prototipo ha prodotto eccellenti risultati in termini di riduzione dei consumi rispetto al veicolo di partenza non ibridizzato [3].

Se è noto che il veicolo si sta avvicinando ad una zona nella quale è prevista marcia puramente elettrica oppure ad un punto dove sia prevista la ricarica da rete, il valore considerato ottimale del SOC può essere temporaneamente modificato in maniera da tendere ad avere nei due casi, rispettivamente, accumulo particolarmente pieno o vuoto di energia.

È interessante notare che la tecnica di gestione energetica descritta in questo paragrafo differisce solo marginalmente da quella descritta nel par. 4, se ci si limita a veicoli per i quali lo spegnimento del convertitore primario durante la propulsione ibrida non sia possibile o previsto (controllo a filtro di potenza puro).

Infatti si consideri l'equazione base di ogni veicolo ibrido:

$$P_p(t) = P_g(t) + P_{ES}(t) \quad (2)$$

Prendendo il valor medio di ambo i membri e riordinando:

$$med(P_g) = med(P_p) - med(P_{ES})$$

Se si usa l'ottimizzazione locale con mantenimento del SOC (quindi del LOE), salvo piccole oscillazioni nell'intorno di un valore di riferimento, $med(P_{ES})$ è pari alle perdite dovute al transito di potenza nell'accumulo.

Questa equazione coincide quindi con la (8).

10.7 Una possibile architettura generale del PMM

Gli svariati problemi, commentati nei precedenti paragrafi, da risolvere in occasione della definizione della struttura e delle logiche operative del PMM possono essere affrontati facendo riferimento ad una struttura abbastanza generale di quest'ultimo; essa può essere descritta con riferimento agli schemi di Fig. 10.7 a) e b), relativi rispettivamente ai veicoli ibridi serie e parallelo. Come si vede, le due strutture sono molto simili fra loro, l'unica differenza essendo che nella architettura serie la coppia richiesta dal pilota è direttamente inviata all'azionamento, mentre nel caso dello schema parallelo essa è il risultato di ottimizzazione in quanto il PMM deve decidere quale parte della coppia (e potenza) richiesta deve essere fornita dall'ICE e quale dall'azionamento propulsivo.

Questi schemi, pur molto semplici, mettono insieme vari elementi sopra discussi:

- l'interpretazione dei comandi fondamentali del pilota (acceleratore, freno) al fine di determinare la coppia propulsiva desiderata T_p^* , che uguaglia la coppia elettrica T_e^* richiesta all'azionamento propulsivo soltanto nel caso di schema ibrido serie;
- l'interpretazione dell'intenzione del pilota di entrare nel prossimo futuro in marcia puramente elettrica (quindi con richiesta di alto valore di LOE) o di dirigersi ad un punto per la ricarica da rete (quindi richiedendo un basso valore di LOE);
- la presenza di un'unità di previsione del carico che basa la sua previsione prevalentemente sulla storia passata di P_p^* , ma anche su altri segnali; questa unità sarà evidentemente assente se si usa una logica ad ottimizzazione energetica locale (par. 10.6).
- la possibilità di controllare il convertitore primario sia richiedendogli l'erogazione di una data potenza P_g^* , che accendendolo o spegnendolo attraverso il segnale ON.

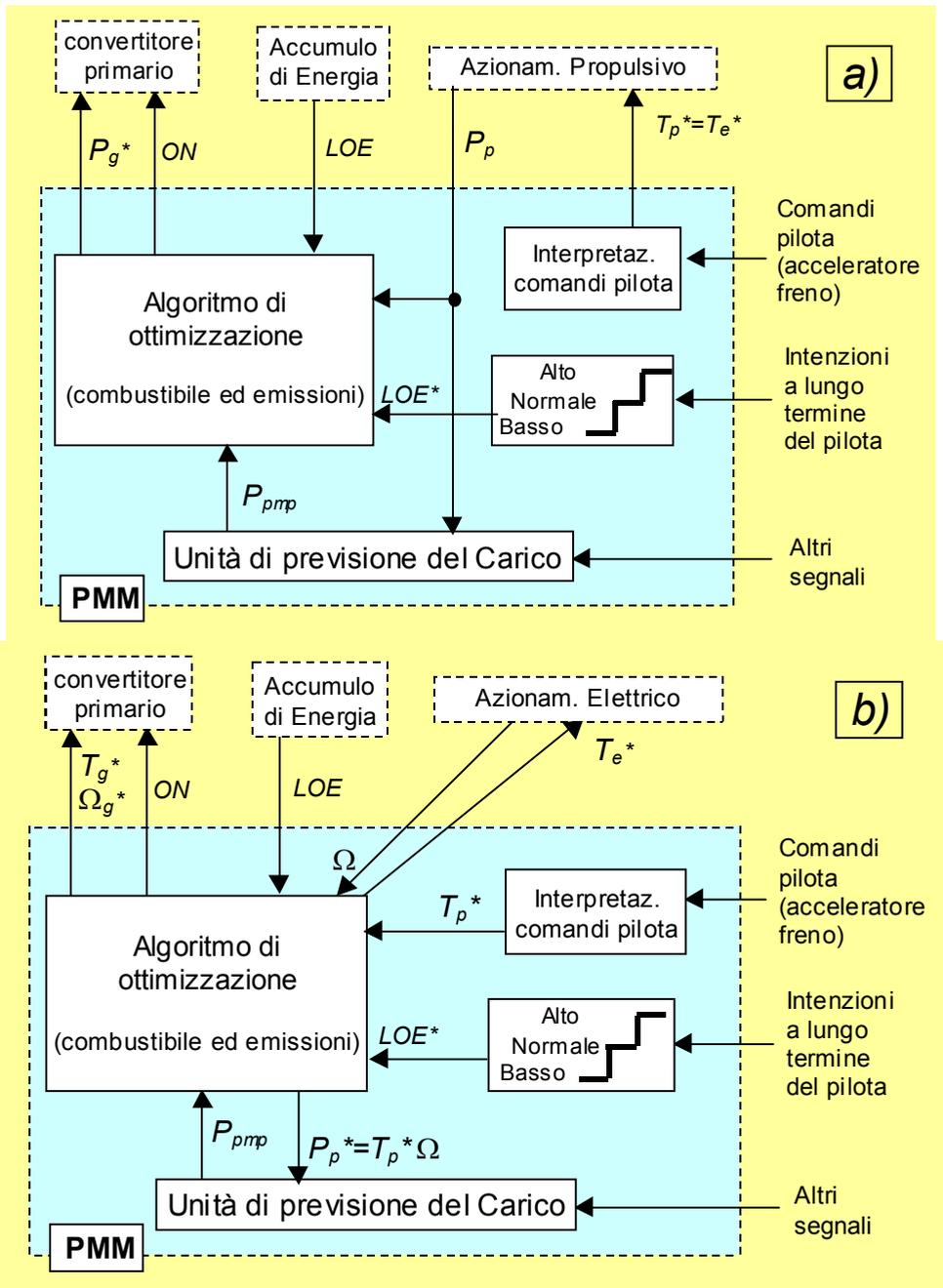


Fig. 10.7 - Schemi generali mostrand i principali flussi di informazioni all'interno del PMM e fra il PMM e il mondo esterno

10.8 Applicazioni di strategie di controllo ad ibridi serie e parallelo

In questo paragrafo vengono riportate alcune esperienze di definizione del sistema di generazione energetica a cui l'autore ha partecipato direttamente. Esse vengono fornite con l'obiettivo di fornire elementi di concretezza alle considerazioni sopra svolte, e per mostrare come esse possano essere agevolmente calate in casi pratici di determinazione di PMM.

10.8.1 Autobus ibrido serie

Questa sezione fa riferimento ad uno studio per definire la strategia di gestione energetica di un autobus ibrido serie, presentata in dettaglio nel riferimento [10].

Lo schema logico del power train considerato è del tipo di quello mostrato in Fig. 10.4 a), con le seguenti precisazioni:

- il convertitore primario è basato su un ICE di tipo diesel
- l'accumulo elettrico è costituito da una batteria al piombo-acido.

In questo studio è stato scelto di progettare il PMM in modo che ottimizzasse soltanto i consumi di carburante, mentre le emissioni sono state considerate come vincoli da rispettare. Questa è una scelta piuttosto frequente come si è già osservato nel par. 4, dove se ne è fornita anche una giustificazione.

La principale peculiarità di questo studio consiste nell'aver mostrato come gestire congiuntamente i segnali P_g^* e ON. Questa tecnica può essere riassunta come di seguito descritto.

*Gestione del segnale P_g^**

Il convertitore primario per questo sistema è composto da un ICE, un alternatore, un convertitore a commutazione forzata (Fig. 10.8).

Quando il convertitore primario è acceso, l'ICE può erogare P_g^* con infinite scelte di coppia T e velocità angolare Ω : $P=T\Omega$. La ricerca di ottimi valori di questi due fattori può essere fatta trascurando le perdite all'interno di alternatore e inverter, essendo l'ottimo abbastanza piatto.

Considerando il consumo specifico dell'ICE come funzione di T e Ω , per ogni P_g^* si possono determinare i valori ottimali (che minimizzano il consumo specifico) T_{ott} e Ω_{ott} ; una possibile maniera di imporre all'ICE di operare nel punto di lavoro (T_{ott}, Ω_{ott}) è di usare un regolatore di velocità angolare sull'ICE, che abbia come riferimento proprio Ω_{ott} , e richiedere all'inverter di erogare la potenza P_g^* .

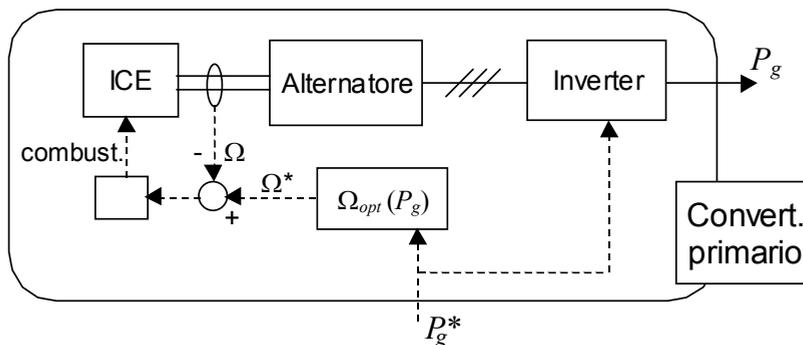


Fig. 10.8 - Tecnica per gestire l'erogazione della potenza P_g^* del convertitore primario utilizzando la velocità di rotazione ottimale Ω_{opt}

Se si trascurano le perdite di alternatore ed invertitore, e Ω è considerata essere uguale al relativo riferimento $\Omega^* = \Omega_{ott}$, è:

$$T_{MCI} = P_{MCI} / \Omega^* \cong P_g^* / \Omega^* = T_{ott}$$

Gestione del segnale di ON

Quando la potenza richiesta dalle condizioni operative del veicolo (così come determinate dai comandi del pilota e dalle caratteristiche del percorso) è molto bassa può non essere conveniente mantenere l'ICE acceso e funzionante in zone di bassa efficienza, e può quindi essere conveniente spegnerlo temporaneamente.

Questa considerazione elementare non si converte facilmente in un algoritmo operativo. Sebbene una descrizione dettagliata del problema esula dai limiti di questa pubblicazione (ed è riportata nel riferimento [10]) si riportano qui le seguenti considerazioni:

- è opportuno che l'algoritmo che determina accensione e spegnimento includa un elemento di penalizzazione per ogni evento di accensione che corrisponda al "costo" di ognuno di essi, conseguenza sia del combustibile utilizzato per portare in rotazione il motore ed assicurare una combustione regolare, sia del logorio aggiuntivo dovuto alla modesta lubrificazione dei cuscinetti durante le fasi di messa in moto delle parti rotanti. Questa soluzione è preferibile alla soluzione realizzativamente più semplice, proposta da alcuni, di prefissare un intervallo di tempo minimo fra due successivi cambiamenti di stato (da *on* a *off* e viceversa)
- il ruolo della previsione del carico del power train è molto importante, in quanto la necessità di accendere o spegnere dipende fortemente da quello che accadrà al carico nel futuro prossimo.

10.8.2 Scooter ibrido parallelo

Questa sezione fa riferimento ad uno studio per definire la strategia di ottimizzazione di uno scooter ibrido parallelo, presentato in dettaglio nell'articolo [14]. Lo studio è stato realizzato con l'obiettivo di realizzare un drive train ibrido a partire da uno scooter esistente, con modifiche minimali.

Lo schema logico del drive train è mostrato in Fig. 10.9 a tratto continuo.

La principale peculiarità di questo drive train consiste nel fatto che l'ICE è direttamente accoppiato alla Trasmissione a Variazione Continua e, di conseguenza, non è possibile avere un diretto controllo dei due fattori della potenza erogata dall'ICE: $P_{ICE} = T_{ICE} \Omega_{ICE}$. È pertanto presente un grado di libertà in meno di quanto usuale, e nel caso discusso nel par. 10.8.1.

La soluzione scelta per l'effettuazione delle modifiche è stata di aggiungere una macchina elettrica a valle della frizione centrifuga, in quanto questa posizione, pur implicando un impatto veramente modesto sulla struttura attuale dello scooter, consentiva importanti funzioni:

- rendere possibile di ridurre le variazioni di erogazione di potenza da parte dell'ICE in quanto esse possono essere assorbite dalla parte elettrica del drive train (cfr. eq. 2)
- rendere possibile la frenatura a recupero di energia in batteria
- rendere possibile la marcia puramente elettrica e la ricarica dell'accumulo da rete fissa.

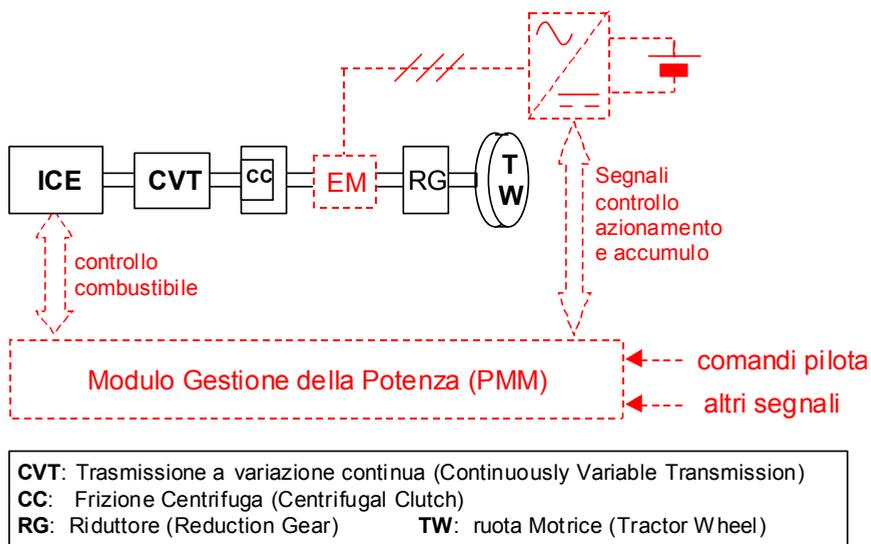


Fig. 10.9 - Schema logico del drive train di uno scooter ibrido parallelo: in tratto continuo la soluzione originale, in tratteggiato le modifiche per l'ibridizzazione

Occorre rilevare che lo schema utilizzato, contenendo fra l'ICE e la parte terminale del drive train soltanto una frizione centrifuga, quindi non direttamente controllabile dal PMM, non consente di connettere a richiesta l'ICE all'azionamento; questo di conseguenza non consente lo spegnimento del motore a combustione interna durante la marcia⁶ e quindi non si possono realizzare interessanti funzioni quale ad esempio l'avviamento in marcia puramente elettrica e il passaggio a marcia ibrida solo oltre una certa velocità del veicolo e/o richiesta di potenza.

Nonostante queste limitazioni la soluzione che è stata ottenuta sembra essere competitiva in quanto è economica, e comunque consente i seguenti vantaggi rispetto al veicolo di partenza:

- autonomia in marcia puramente elettrica intorno ai 15-20 km che è adeguata per l'attraversamento ad emissioni nulle dei centri storici urbani;
- un incremento della potenza di 1 kW, ovvero intorno al 40%;
- importanti risparmi dei costi di esercizio quando si sfrutta l'opzione della ricarica da rete.

La scelta della logica di gestione energetica deve essere fatta considerando i seguenti vincoli funzionali che sono stati aprioristicamente posti:

- l'impossibilità, già richiamata, di spegnere l'ICE durante la marcia ibrida;
- se le richieste del percorso da superare, e quindi del pilota, non possono essere superate con l'utilizzo del solo ICE, la coppia da esso fornita viene integrata dalla macchina elettrica, a prescindere da considerazioni di ottimizzazione (funzione di *boosting*);
- se viene comandata una frenatura, essa si effettua per quanto possibile recuperando energia nell'accumulo (funzione di *regenerative braking*).

In tutte le fasi di funzionamento in cui non si attuano boosting e regenerative braking sussiste la possibilità di attuare strategie di gestione energetica.

La strategia adottata consiste nella gestione della macchina elettrica in maniera tale da mantenere il LOE ad un valore prefissato considerato ottimale.

⁶ È ovviamente possibile decidere di non inviare combustibile né tensione di accensione alla candela, ma questo non preclude che il motore rimanga connesso alla trasmissione, e da essa trascinato, con generazione di perdite energetiche.

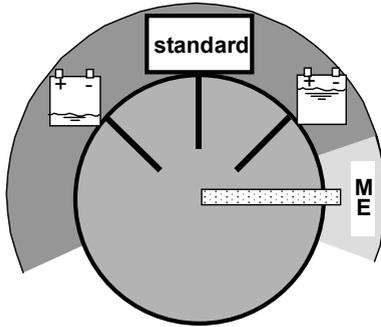


Fig. 10.10 - Possibile disposizione per la scelta delle modalità operative (ME= Marcia elettrica)

Il valore ottimale viene a sua volta scelto come segue:

- al valore pari al 50%, che è quello ottimale per il sistema di accumulo adottato dal punto di vista dell'efficienza incrementale (cfr. par. 10.5);
- al valore pari al 10% quando l'utente seleziona la condizione di "bassa carica" in quanto prevede di ricaricare a breve le batterie da rete;
- al valore pari al 95% quando l'utente seleziona la condizione di "alta carica" in quanto prevede di entrare a breve in zona dove intende marciare in modalità puramente elettrica.

Questo tipo di strategia può essere considerata un caso particolare di quella discussa nel par. 10.5 che nel par. 10.6, in quanto esse, come già osservate, quando non è possibile lo spegnimento del convertitore primario si differenziano poco l'una dall'altra.

In particolare questa strategia non prevede l'utilizzazione del sistema di gestione energetica di una unità di previsione del carico.

10.8.3 Veicoli ferroviari con azionamento di tipo ibrido serie

Drive train ibridi sono stati proposti non solo per veicoli stradali, ma anche in altri sistemi di trasporto. L'articolo [13] considera questa possibilità per veicoli ferroviari, in particolare locomotori di manovra e automotrici. In entrambi i casi l'azionamento proposto può trarre profitto dall'ibridizzazione, in quanto i tipici profili di missione di queste due applicazioni richiedono frequenti avviamenti.

Vale la pena di menzionare che i drive train ibridi proposti sono di due differenti tipologie di convertitori primari: una basata su ICE, l'altra su celle a combustibile; a dispetto di questa forte differenza tecnologica, la struttura del PMM proposto è nei due casi molto simile.

Nel caso di convertitore primario basato su ICE la suddivisione della potenza ad esso richiesta è effettuata secondo logica analoga a quella descritta nel paragrafo 10.8.1; l'ottimizzazione è effettuata tenendo in conto sia i consumi di combustibile che le emissioni secondo la logica descritta nel par. 10.4.1.

Nel caso di drive train basato su celle a combustibile, l'ottimizzazione è fatta ovviamente solo con l'obiettivo di minimizzare il consumo di combustibile (idrogeno in questo caso) essendo le emissioni locali sostanzialmente nulle in questo caso.

In tutti i casi, la peculiarità più importante dell'applicazione ferroviaria consiste nel fatto che si ha una conoscenza molto precisa del percorso da effettuare e delle sue caratteristiche cinematiche e dinamiche.

Questo consente di introdurre un'unità di previsione del carico molto efficace. In particolare quando il treno è in stazione, a convertitore primario spento nel caso di ICE, la conoscenza del profilo di assorbimento richiesto dalla tratta successiva può consentire di decidere a priori se sarà necessario affrontare la tratta in modalità ibrida (con ICE acceso), o in modalità puramente elettrica.

Bibliografia

- [1] A. Brahma, Y. Guezennec, and G. Rizzoni, "Dynamic optimization of mechanical electrical power flow in parallel hybrid electric vehicles," *5th Int. Symp. Advanced Vehicle Control*, Ann Arbor, MI, 2000.
- [2] G. Paganelli, G. Ercole et al.: "A general formulation for the instantaneous control of the power split in charge-sustaining hybrid electric vehicles", Proc. AVEC 2000, 5th Int. Symp. on Advanced Vehicle Control, Ann Arbor, MI (2000)
- [3] G. Paganelli, G. Ercole, A. Brahma, Y. Guezennec, G. Rizzoni, "General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles" *JSAE Review*, 22 (2001) pp. 511-518.
- [4] M. Ceraolo: "New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries", IEEE Transactions on Power Systems, November 2000, Vol. 15, N. 4, pp. 1184-1190.
- [5] M. Ceraolo, C. Miulli: "A Dynamic Model of Nickel-Zinc Batteries", Electric Vehicle Symposium (EVS.19), Busan (Korea), 19-23 October 2002, paper P7D01_182.pdf.
- [6] C. Lin, H. Peng, J. Grizzle, J. Kang: "Power management strategy for a parallel hybrid electric track", IEEE Transactions on control systems technology, Vol. 11, N. 6 Nov. 2003, pp. 839-849
- [7] X. He, M. Parten, T. Maxwell: "Energy management Strategies for a Hybrid Electric Vehicle", *Symposium IEEE VPPC'05*, Chicago (USA), 7-9 September 2005, pp. 536-540.
- [8] J. Moreno, J. Dixon, M. Ortuzar: "Energy management system for an electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 53, N. 2, April 2006 pp 614 - 623
- [9] A. Soltis, X. Chen: "A new Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Proceedings of the American Control Conference*, Denver, Colorado, June 4-6 2003, Vol. 2, pp. 1398-1403.
- [10] S. Barsali, M. Ceraolo, A. Possenti: "Techniques to Control the Electricity Generation in a Series Hybrid Electrical Vehicle, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, No 2, June 2002, pages 260-266.
- [11]: C. C: Chan: "The state of the art of electric and hybrid vehicles", *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, N. 2, February 2002.
- [12] M. Ceraolo, C. Miulli, P. Cravini: "A Comparison of different fuel-cell based drive train typologies to be used on two-wheel vehicles", 2004 European Ele-drive Transportation Conference & Exhibition", Estoril (Portugal) 17-20 March 2004, paper n.°19_2004eet.pdf.
- [13] M. Ceraolo, R. Giglioli, G. Pede, R. Cheli, E. Mingozzi: "Use of series-hybrid drive trains for railway traction", *SPRTS - Ship Propulsion and Railway Traction Systems Conference*, Bologna, Italy, 4-6 October 2005, pp. 258-265, paper s6.p1.pdf

- [14] M. Ceraolo, A. Caleo, P. Capozzella, M. Marcelli, L. Carmignani, A. Pallottini: "A Parallel-Hybrid Drive train for Propulsion of a Small Scooter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 21, N. 3, May 2006, pp768-778.
- [15] R. Cheli, G. Grande, R. Giglioli, R. Manigrasso, G. Pede: "Rail-car hybrid trains to reduce fuel consumption and emissions", *7th World Congress on Railway Research*, Montreal, 4-8 June 2006.
- [16] M. Koot, J. Kessels, B. de Jager: Fuel Reduction of Parallel Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference VPPC'05*, Chicago (USA), 7-9 September 2005, pp. 99-104.
- [17] M. Salman, M. Chang, J. Chen: "Predictive Energy Management Strategies for Hybrid Vehicles", *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference VPPC'05*, Chicago (USA), 7-9 September 2005, pp. 21-25.
- [18] J. Chen, M. Salman: Learning Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference VPPC'05*, Chicago (USA), 7-9 September 2005, pp. 68-93.
- [19] L. Chu, Q. Wang, M. L. J. Li: "Control algorithm development for parallel hybrid transit bus," *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference VPPC'05*, Chicago (USA), 7-9 September 2005, pp. 126-130
- [20] M. Ceraolo, A. Di Donato, C. Miulli, G. Pede: "Microcycle-based Efficiency of Hybrid Vehicle Batteries", *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference VPPC'05*, Chicago (USA), 7-9 Sept. 2005.
- [21] M. Ceraolo, A. di Donato, G. Franceschi: "Energy optimisation of hybrid-electric vehicles The Pisa Experience", M. Ceraolo, A. Di Donato, G. Franceschi: "Energy optimisation of hybrid electric vehicles", *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference VPPC'06*, Windsor (U.K.), 6-8 September 2006
- [22] M. Ceraolo, A. di Donato, G. Franceschi: "Experimental evaluation of energy efficiency of batteries for hybrid - electric vehicles", *EVS22 Symposium*, 23-28 Ottobre 2006, Japan articolo P10310-001.pdf
- [23] M. Thele, M. Radin-Macukat, D. U. Satter, O. Bohlen, D. Linzen: Impedance-based modeling of electrochemical energy storage devices - A successful implementation for NiMH batteries used in design tools for hybrid electric vehicles", *EVS22 Symposium*, 23-28 Ottobre 2006, Japan articolo P10310-001.pdf
- [24] J. Park, J. Oh, Y. Park, K. Lee: Optimal Power Distribution Strategy for Series-Parallel Hybrid Electric Vehicles", *The 1st International Forum on Strategic Technology*, 18-20 Ottobre 2006, Ulsan Korea.

CAPITOLO 11

IL DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DEL SISTEMA

Manlio Pasquali, Giovanni Pedè

ENEA, Tecnologie per l'Energia, Fonti Rinnovabili e Risparmio Energetico

11.1 Introduzione

Nella progettazione del sistema di propulsione di un veicolo, tra tutte le grandezze definite in sede di "specificata" (che corrispondono alle prestazioni richieste dalla macchina) alcune vengono scelte preliminarmente e diventano dati di progetto, le altre si usano in sede di verifica.

In un veicolo convenzionale, note massa a pieno a carico e accelerazione massima desiderata, nonché massima pendenza superabile, si trova di conseguenza la potenza del motore termico. Proseguendo nella progettazione, si calcolano le velocità massime, si stimano consumi e le emissioni nella marcia a diverse velocità e solo alla fine si verificano le prestazioni del veicolo nell'esecuzione di una prefissata missione, p.e., nel caso di un autobus, la percorrenza di una tratta urbana con modalità prefissate. In un veicolo elettrico a batteria si procede analogamente per il dimensionamento dell'azionamento elettrico e dell'accumulo, unica sorgente di energia a bordo, la cui potenza corrisponderà perciò alla potenza dell'azionamento mentre il suo contenuto energetico dipenderà da un altro dato di progetto, l'autonomia richiesta per la missione del veicolo.

Nel caso di un sistema di propulsione "ibrido" l'approccio progettuale è invece diverso perché comporta una diversa scelta preliminare dei dati di progetto [1], vedi Tabella 11.1.

Tab. 11.1 - Criteri di progettazione dei veicoli convenzionali ed ibridi

| <i>Veicoli termici o elettrici a batteria</i> | | <i>Veicoli ibridi</i> | |
|--|--|---|--|
| <i>Progetto</i> | <i>Verifica</i> | <i>Progetto</i> | <i>Verifica</i> |
| <ul style="list-style-type: none">•Dati Veicolo (massa, sezione trasversale ecc.)•Velocità, accelerazione, pendenza mass. | <ul style="list-style-type: none">•Prestazioni e consumi sui cicli specifici | <ul style="list-style-type: none">•Dati Veicolo•Prestazioni su missione specifica (su profilo di missione richiesto) | <ul style="list-style-type: none">•Velocità•Accelerazione•Pendenza massima•Velocità in salita |

Infatti, nella progettazione di un veicolo ibrido si dispone di un grado di libertà in più rispetto al progetto di un veicolo convenzionale, (nell'ibrido "parallelo" può scegliere come distribuire la potenza totale necessaria alle ruote tra il motore termico ed il motore elettrico, nel "serie", tra quella erogata, al motore elettrico, dal convertitore primario e quella fornita dall'accumulo elettrico) e si può così specializzare il sistema di propulsione per un particolare profilo di missione.

Si passa perciò dai micro ibridi, dove l'accumulo è progettato per lo "start&stop", all'ibrido "full performance", dove è prevista anche la marcia in solo elettrico, seppur per distanze ridotte, ai cosiddetti ibridi "range extender", nei quali il convertitore primario è molto piccolo e serve in pratica ad estendere il raggio d'azione delle batterie, dimensionate per erogare la potenza massima continuativa. I "mild hybrid", infine, sono sistemi intermedi tra i micro ibridi ed i "full performance", nei quali l'accumulo svolge anche funzioni di assistenza al motore nelle fase di accelerazione, il così detto "motor assist" o "power assist".

Il "range extender" è infatti un veicolo specializzato per usi urbani, dove è prevalente la marcia in solo elettrico, mentre micro ibridi, "mild hybrid" e "full performance", sono evoluzioni del veicolo convenzionale, multi uso per definizione. Quanto sopra detto è illustrato in Fig. 11.1, rielaborata da una presentazione della Toyota. L'altezza crescente delle barre rappresenta, in modo non proporzionale, volume e peso crescenti dell'accumulo elettrico.

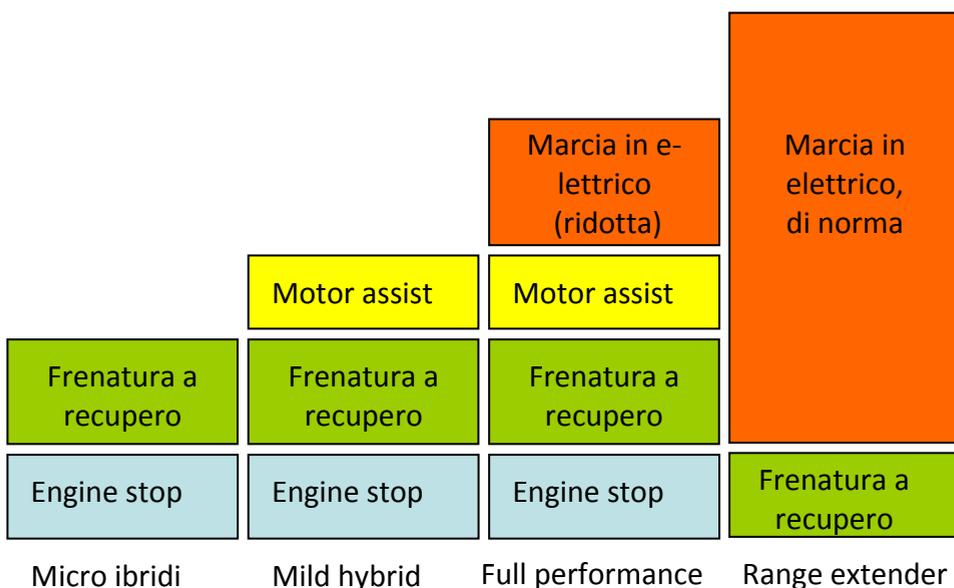


Fig. 11.1 - Funzioni dell'accumulo elettrico nelle diverse tipologie di veicoli ibridi

In Fig. 11.2 è quindi schematizzato il problema del progettista nel dimensionamento di un sistema di propulsione elettrico-ibrido. L'ordinata costante per ogni punto in ascisse (punto che rappresenta una delle infinite scelte progettuali possibili) rappresenta la potenza propulsiva massima, è un dato di progetto ed è la somma di due segmenti che corrispondono il primo alla potenza (massima) di progetto dell'accumulo (al solito indicata con P_{ESmax} - Fig. 10.3), ed il secondo a quella (massima) del convertitore primario (indicata con P_{gmax}). Fissata l'una, resta univocamente definita l'altra.

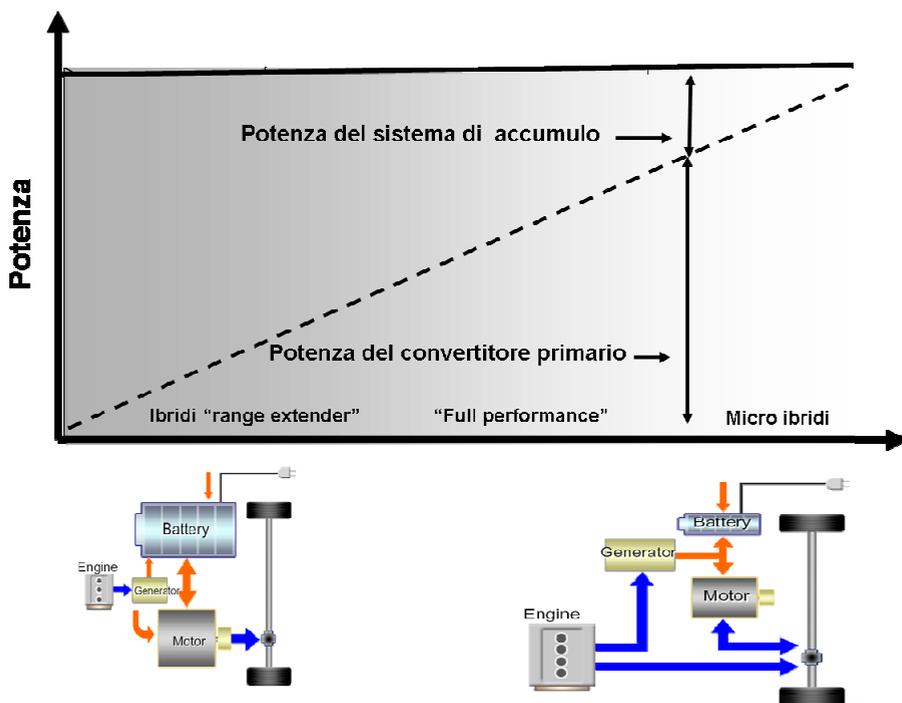


Fig. 11.2 - Dimensionamento delle due sorgenti in un ibrido

Il diagramma rappresenta quindi la traduzione grafica dell'equazione fondamentale di equilibrio energetico dell'ibrido (vedi il capitolo sul controllo):

$$P_u(t) = P_1^+(t) + P_2(t) \quad (1)$$

dove l'istante considerato non è più quello t generico ma è quello t_{picco} di massima richiesta assoluta, la cosiddetta "potenza di picco" P_{picco} :

$$P_{picco} = P_{gmax} + P_{ESmax} \quad (2)$$

Nel bilanciamento progettuale di P_{gmax} e P_{ESmax} intervengono una serie di considerazioni che rimandano al profilo di missione richiesto (come l'autonomia eventualmente richiesta in solo elettrico, la capacità di superamento lunghe salite ecc.), alle caratteristiche del convertitore primario, ed in generale alla specifica di progetto.

Ad esempio, un motore diesel ed una turbina a gas hanno curve di rendimento, in funzione della potenza richiesta, ben diverse e quindi richiedono una diversa gestione dei flussi di potenza, che si riflette in un diverso dimensionamento dell'accumulo. Si anticipa che la maggiore "elasticità" del diesel, che tollera maggiori scostamenti dal punto di massima efficienza, consente in effetti di ridurre il contenuto energetico dell'accumulo, facilitando la scelta di accumuli "di potenza" come i supercondensatori.

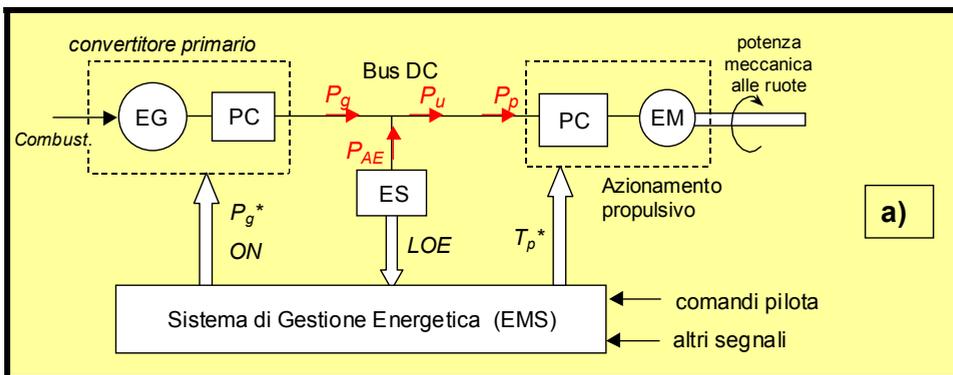
Riassumendo, la libertà di svincolare la funzione di generazione dell'energia necessaria alla missione dalla funzione di soddisfacimento della potenza istantanea richiesta dal conducente dà al progettista la possibilità di dimensionare il sistema di trazione in base alla missione da compiere, che viene rappresentata da profili di missione specifici, prefissandosi il raggiungimento di livelli di consumi ed emissioni scelti in base a considerazioni di carattere economico, per i consumi, e normativo, per le emissioni.

Il criterio di dimensionamento su profilo di missione è, in pratica, raramente applicabile da solo e nel tempo sono state proposte altre metodologie di progetto per un ibrido serie, di cui si dirà di seguito, ma nell'esposizione conviene partire da questo metodo per il bilanciamento delle due sorgenti di potenza.

11.2 Il dimensionamento su profilo di missione richiesto

Un profilo di missione è rappresentato dall'andamento nel tempo delle velocità e dei carichi rappresentativi della missione stessa, ed insieme ad altri parametri quali il rendimento di generazione, quelli di carica e scarica dell'accumulo elettrico ecc., è un elemento essenziale per il dimensionamento del sistema di trazione ibrido.

Nei casi in cui è possibile individuare una profilo di missione di riferimento, dal profilo di missione (e dalle caratteristiche del veicolo) dipende l'andamento delle potenze istantanee; di conseguenza è possibile calcolare i bilanci energetici, valutare le potenze da sviluppare e dimensionare i singoli componenti del sistema. Lo schema del power train è quello di Fig. 10.4 del capitolo sul controllo, che per comodità del lettore si riporta di seguito.



Schema funzionale di un sistema di trazione ibrido serie

Integrando l'equazione fondamentale dell'ibrido per la durata T della missione:

$$\int_0^T P_p(t)dt = \int_0^T P_g(t)dt + \int_0^T P_{ES}(t)dt \quad (3)$$

si ottiene l'equazione di bilancio energetico riferita alla missione:

$$E_p = E_g + E_{ES} \quad (4)$$

dove E_p è l'energia utile necessaria alla propulsione, E_g è l'energia complessivamente generata, E_{ES} è l'energia transitata per l'accumulo, che può essere considerata come somma di tre termini:

- il contributo offerto dall'accumulo alla propulsione, grazie alla frenatura a recupero;
- le perdite di funzionamento;
- le variazioni del suo contenuto energetico.

Se, come in genere avviene¹, si impone nulla la variazione del contenuto energetico dell'accumulo tra l'inizio e la fine della missione ed il contributo dell'accumulo alla trazione è maggiore delle perdite ad esso relative, la (4) esprime analiticamente uno delle ragioni della riduzione dei consumi energetici ottenibili grazie all'affiancamento di un accumulo al convertitore primario, perché risulta evidentemente:

$$E_g < E_p$$

e quindi l'energia generata dal convertitore primario è minore che in un veicolo convenzionale, per il quale vale evidentemente l'uguaglianza:

$$E_g = E_p$$

Nell'ipotesi di un controllo a filtro di potenza puro (dove non è previsto lo spegnimento del motogeneratore durante il viaggio, vedi il capitolo sul controllo), il valore minimo della potenza media del convertitore primario, per il profilo di missione richiesto, è dato da:

$$med(P_g) = E_g / T \quad (5)$$

È quindi possibile scegliere la potenza del convertitore primario P_G nell'ottica di ridurre al minimo i consumi energetici, il che corrisponde alla scelta di un motogeneratore che offra il consumo specifico minimo in corrispondenza alla potenza media individuata dalla relazione (5):

$$P_G = med(P_g) \quad (6)$$

In questo caso, infatti, il motogeneratore funziona sempre in condizioni ideali e garantisce il bilancio energetico della missione con i minori consumi possibili. Il valore di consumo così ottenuto può rappresentare un limite inferiore cui tendere nella progettazione, che deve tener naturalmente conto di altri fattori come i costi del sistema, la sua flessibilità d'utilizzo ecc.

¹ Fanno eccezione i cosiddetti "plug-in hybrids", dove è prevista, anzi richiesta, la scarica dell'accumulo elettrico durante l'esercizio del veicolo e la ricarica alla rete durante la notte

Nota la potenza di picco richiesta dal veicolo, la potenza (massima) del sistema di accumulo P_{ES} si trova quindi per differenza,

$$P_{ES} = P_{picco} - P_G \quad (7)$$

mentre il suo contenuto energetico (minimo) E_{ES} si ricava dall'esame della (8), badando a distinguere tra le fasi di accelerazione, per le quali il contributo dell'accumulo è insostituibile, e quelle di decelerazione, dove possono comunque intervenire i freni meccanici (Fig. 11.4):

$$E_{ES}(t) = \int P_2(t) dt \quad (8)$$

In Fig. 11.3, il picco di potenza in accelerazione è uguale al picco di potenza in decelerazione, ed entrambe le potenze corrispondono alla potenza massima dell'azionamento, uguale nei due quadranti di funzionamento della macchina.

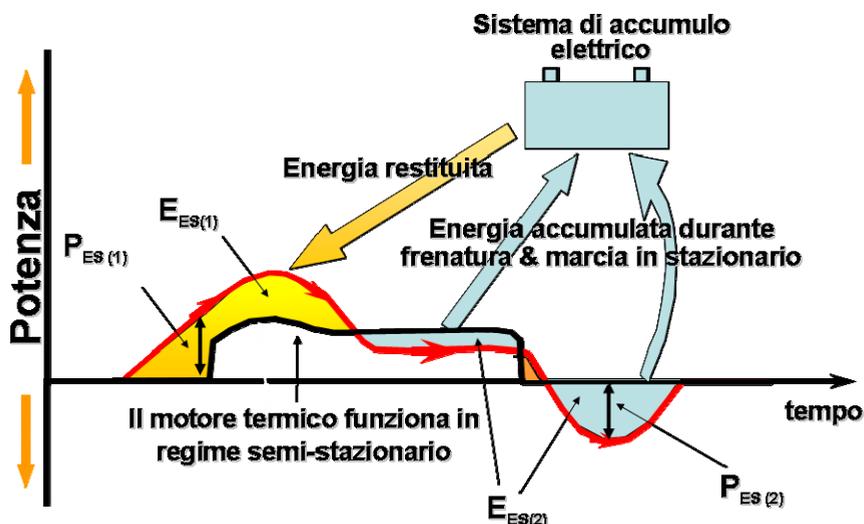


Fig. 11.3 - Gestione delle potenze e dei flussi di energia in un microciclo

La potenza dell'accumulo calcolata con la (7) è quella massima in scarica, in genere inferiore alla massima potenza meccanica disponibile in frenata, e ne segue il mancato recupero di una parte dell'energia cinetica. V'è poi considerato che per le batterie, in genere, la potenza massima in ricarica è minore di quella in scarica, e questo limita ulteriormente il risparmio energetico conseguibile.

Se la "missione tipo" è ad esempio il ciclo di omologazione ECE 15, la simulazione del ciclo ci mostra come sia possibile scegliere, per il motogeneratore di un ibrido serie, un termico di potenza molto ridotta rispetto alla potenza massima richiesta alle ruote (per un ciclo urbano ed un autobus elettrico da 56 ql., ad esempio, è sufficiente un motogeneratore da 10 kW rispetto ai 35-40 kW massimi alle ruote) e farlo funzionare nell'intorno dei punti di ottimo rendimento, alla potenza media richiesta dal ciclo di guida.

Un accumulo della potenza di circa 30 kW consentirà quindi di livellare completamente l'erogazione di potenza del motogeneratore, effettuando la compensazione dei picchi di potenza positivi.

11.2.1 Un esempio applicativo

La Fig. 11.4 mostra il profilo di velocità e quello di potenza (al Bus DC) relativi ad un profilo di missione generico, che comprende quattro fasi di accelerazione ed una fase di marcia a velocità costante su di una rampa del 2%; circa il veicolo, si sono considerati i parametri della Fiat Seicento.

Per generalità, si considera un sistema di accumulo ES di tipo misto (vedi la Parte IV), formato da batterie come accumulo "di energia" e supercondensatori come accumulo "di potenza"), mentre il convertitore primario è una cella a combustibile.

Le potenze erogate dalla batteria, dai supercondensatori e dalla cella sono denominate in figura come P_b , P_{uc} e P_{fc} .

In Fig. 11.4 b) sono evidenziate le caratteristiche del ciclo che permettono di determinare le potenze minime da attribuire ai vari componenti:

- a) P_G (potenza media del profilo di missione in esame): è il valore minimo della potenza media del convertitore primario, per il profilo di missione richiesto;
- b) P_{cmax} , potenza massima continuativa richiesta nella fase a velocità costante su rampa: deve essere fornita dalla cella e dalle batterie ma non dai supercondensatori, che intervengono solo nel transitorio, non essendo in grado di sostenere carichi prolungati per difetto di energia;
- c) P_{picco} (potenza di picco) e $P_{max\ recupero}$: in queste fasi il contributo dei supercondensatori diviene predominante.

Sono inoltre evidenziate le zone a) nelle quali la cella può ricaricare i componenti dell'accumulo (la potenza richiesta dal ciclo è minore di quella fornita dalla cella) e le zone b), dove anche le batterie forniscono energia per la trazione.

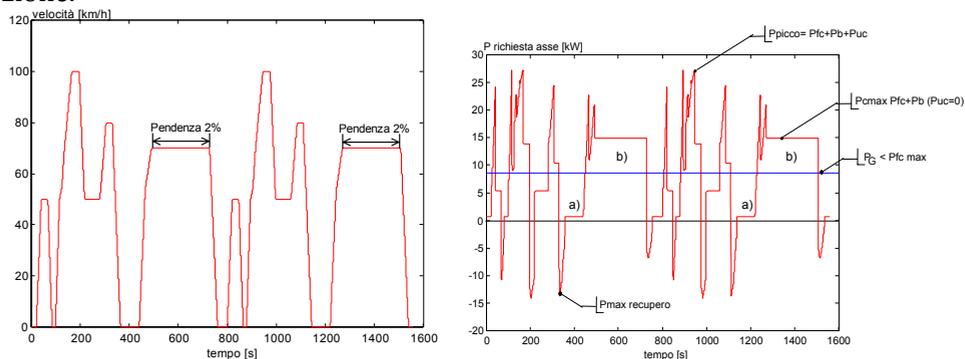


Fig. 11.4 - a) Profilo di missione b) Profili di potenza

11.2.2 Osservazioni

Come già detto in premessa, il criterio di dimensionamento sopra esposto è difficilmente utilizzabile da solo o, peggio ancora, usando un solo profilo di riferimento. Infatti quasi mai un veicolo può essere progettato per una sola missione, ma lo è bensì per una tipologia di missioni, ad esempio per la consegna merci in ambito urbano, oppure per il trasporto pubblico nei centri storici, oppure per lo scomposizione e ricomposizione dei treni merci ecc.

In ognuno dei casi sopra descritti la missione di riferimento, sebbene dello stesso tipo, può essere caratterizzata da una diversa velocità media, una diversa frequenza di fermate, una diversa percentuale di tempo di moto e tempo di sosta ecc.

E tutto questo in dipendenza non solo dalla diversa situazione locale, per cui un minibus ibrido potrà avere cicli diversi in città diverse, ma anche in funzione del diverso periodo di utilizzo, perché il dimensionamento corretto per l'ora di punta è sicuramente più gravoso (dal punto vista dell'energia impiegata e quindi della potenza media da considerare) che nelle ore morte.

La scelta di un profilo di missione di riferimento è stato in effetti uno dei primi tra i problemi che si sono posti ai progettisti di veicoli ibridi, un problema inizialmente affrontato facendo riferimento ai cicli di omologazione, ad esempio quello europeo NEUDC o uno dei cicli nordamericani come lo US City Cycle o l'US Highway Cycle, e successivamente ai cosiddetti "cicli reali", come il MODEM, sviluppato da INRETS in Francia, e ancora ai cicli "cliente" delle diverse case automobilistiche, nella ricerca di un ciclo "di progettazione" universale che in effetti non esiste. Nell'intento di estendere a missioni diverse i risultati ottenuti con una progettazione fatta in accordo ad un profilo di missione di riferimento, si è anche cercato di definire un indice di "gravosità" di un ciclo, considerando velocità media e/o massima, accelerazioni e decelerazioni massime o ancora l'energia cinetica cumulativamente utilizzata nelle fasi di accelerazione [2] [3]. Ci sono stati infine numerosi lavori sperimentali di comparazione tra i consumi ottenuti su cicli di omologazione con i consumi medi in condizioni reali (vedi il capitolo sulla sperimentazione in appoggio alla progettazione), ed ancora lavori modellistici che mettono a confronto, dal punto di vista dei consumi, dimensionamenti effettuati con profili di missione diversi [4] [5].

Un ciclo misto, come il ciclo europeo di omologazione NEDC, può dare i migliori risultati (rispetto ad altri profili di riferimento) come quello cui corrisponde un dimensionamento del convertitore primario in grado di ottenere consumi mediamente più bassi su tutti i cicli.

Per un corretto dimensionamento dell'accumulo elettrico, in termini di energia e specialmente di potenza, è invece opportuno utilizzare cicli più aggressivi (come quelli americani ed il MODEM, cicli che prevedono accelerazioni tre volte maggiori del NEDC) nell'applicazione del criterio del profilo di missione di riferimento.

Il criterio del profilo di missione di riferimento ha infine una sua precisa applicazione come criterio di verifica della progettazione quando si ricordi che è necessario

evitare che durante l'uso del mezzo il sistema di accumulo elettrico si scarichi², per cui la potenza del motogeneratore P_G deve essere sempre maggiore o uguale della potenza media richiesta dalla più gravosa delle missioni prevedibili.

11.3 Il criterio delle prestazioni limite e quello delle prestazioni invariate

Non potendo disporre in via preliminare di una missione “tipo” cui fare riferimento, il profilo di missione richiesto può essere costituito da un certo numero di situazioni estreme, ad esempio una significativa in termini di potenza continuativa massima, un'altra significativa in termini di potenza di picco massima, un'altra ancora significativa in termini di autonomia massima in solo elettrico ecc. È questo il caso dei veicoli elettrici puri e, per estensione, degli ibridi “range extender”. Ad esempio, nel sistema di trazione E-Flex della General Motors (vedi il Cap. 17, pag. 440), il pacco batterie è dimensionato per una autonomia di 60 km in solo elettrico (16 kWh), mentre la potenza corrisponde a quella del motore di trazione, 120 kW.

È infine possibile adottare un criterio di dimensionamento cautelativo che è quello del dimensionamento “a prestazioni invariate”. In questo caso si riducono alcuni dei vantaggi degli ibridi, poiché si determina in genere un sovradimensionamento del convertitore primario.

Questi due criteri, di semplice immediata applicazione, possono costituire un buon punto di partenza per l'ottimizzazione del sistema; questa sarà mirata alla selezione della configurazione ibrida caratterizzata da un miglior rapporto costi-benefici, considerando l'intera vita del veicolo (LCA).

Si riporta un esempio di applicazione dei criteri adesso esposti, tratto da uno studio per l'ibridizzazione di una autotrice diesel per il trasporto regionale delle FFSS, la ALn 668 [6]. Lo studio prevede l'installazione di due gruppi di trazione costituiti ciascuno da un motore termico, un generatore sincrono, un ponte raddrizzatore, un azionamento da 180 kW nominali (250 kW per 2') ed un sistema di accumulo elettrico.

Applicando il criterio delle prestazioni limite, in questo caso il superamento di una livelletta al 12 per mille a 110 km/h, ne risulta una potenza continuativa ai morsetti degli azionamenti di 220 kW, che coincide con il valore minimo per la potenza totale dei due generatori; questi potranno perciò essere due motogeneratori diesel di potenza nominale pari a 110 kW (ciascuno), circa il 50%

² Questo escludendo, naturalmente, il caso del plug-in-hybrid, per i quali la ricarica alla rete delle batterie, a fine giornata o anche durante le soste, è voluta, con diverse finalità (vedi i capitoli precedenti). In questo caso si parla di “charge depleting mode”, in contrapposizione al “charge sustaining mode”. La terminologia è ripresa dalle SAE J1711 “Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emission and Fuel Economy of Hybrid Electric Vehicles”.

della potenza attualmente installata sul mezzo³.

Potenza ed energia dell'accumulo elettrico sono quindi calcolati in base alle richieste nel funzionamento in solo elettrico, ad esempio nella tratta urbana alla partenza dalla stazione. La potenza è quella massima richiesta dall'azionamento (più quella richiesta dagli ausiliari), l'energia dipende dalla lunghezza della tratta urbana (ad esempio 15 chilometri) e dal consumo degli ausiliari, tenendo conto anche della durata dello stazionamento.

Il dimensionamento su profilo di missione richiesto, vedi Par. 11.5, dà invece una potenza massima, per ciascuno dei 2 motogeneratori, leggermente inferiore, pari a 100 kW.

Per garantire invece la "invarianza delle prestazioni" del veicolo rispetto alla versione convenzionale, che nel caso di un treno corrispondono a quelle dello stesso convoglio sotto catenaria, il sistema di generazione ibrido dovrà avere:

- una potenza massima continuativa uguale alla potenza massima continuativa del (dei) motore di trazione, garantendo così l'invarianza delle prestazioni per lunghi periodi
- la riserva di energia necessaria perché l'accumulo consenta l'alimentazione dei motori alla potenza massima di picco per il tempo che questa può essere mantenuta, ad esempio per 2'.

I due generatori li sceglieremo quindi con una potenza continuativa unitaria pari a quella nominale dei due azionamenti, cioè 180 kW, mentre l'accumulo elettrico dovrà erogare, per almeno 2', la potenza aggiuntiva richiesta dagli azionamenti. Il Δ di potenza e l'energia che devono essere forniti dall'accumulo sono quindi uguali a:

$$P = 500 \text{ kW} - 360 \text{ kW} = 140 \text{ kW}$$
$$140 \text{ kW} \times 2' / 60' = 4,7 \text{ kWh}^4$$

Si osservi che anche per i motori termici si potrebbe definire una potenza massima continuativa ed una di picco, ma in realtà questa informazione non è quasi mai disponibile, a differenza di quanto avviene con le macchine elettriche. È intuitivo, però, che la scelta del termico per una applicazione in un ibrido, stante il servizio più gravoso che in un mezzo convenzionale, deve farsi prevedendo margini adeguati per la potenza continuativa, in special modo per gli organi di raffreddamento.

Abbiamo in definitiva tre valori di partenza per l'ottimizzazione del progetto, (110 kW, 100 kW, 180 kW) due molto vicini tra di loro, quelli derivanti dall'applicazione dei criteri "Prestazioni limite" e "Missione", il terzo "Prestazioni invariate" è sbilanciato verso il convertitore primario, riflettendo le spe-

³ In realtà la potenza dovrà essere opportunamente maggiorata per tener conto della potenza necessaria per gli ausiliari, che è aggiuntiva rispetto a quella necessaria alla sola trazione.

⁴ Non è prevista, in questo caso, la possibilità di percorrere tratte, anche brevi, in solo elettrico

cifiche di partenza ben diverse. Un'applicazione più articolata del criterio, con riguardo al dimensionamento dell'accumulo energetico, è illustrata in Fig. 11.5, che illustra come i problemi del dimensionamento di un veicolo ibrido e quello della sua gestione energetica siano tra di loro intimamente legati.

Nella figura viene considerato il caso di un dimensionamento per prestazioni: il veicolo parte da fermo e si porta con massima accelerazione possibile alla velocità di punta (Fig. 11.5a); la richiesta di potenza risultante viene coperta secondo tre modalità di gestione diverse:

- 1) l'accumulo copre tutta la fase di accelerazione ed il motore primo quella a velocità costante (Fig. 11.5b);
- 2) il motogeneratore segue la richiesta di potenza fino alla massima erogabile e l'accumulo fa il resto (Fig. 11.5c);
- 3) il motogeneratore è limitato nel gradiente di potenza, di conseguenza l'accumulo interviene subito in modo coordinato con esso (Fig. 11.5d).

Nei tre casi energia (area scura) e potenza dell'accumulo variano, e di molto.

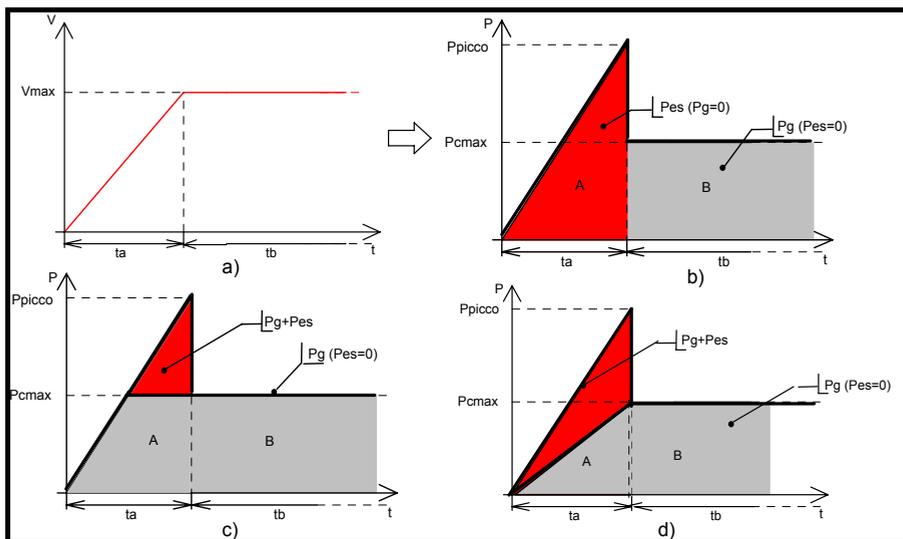


Fig. 11.5 - Dimensionamento e gestione

Esiste quindi un legame tra metodologia di gestione, i parametri che essa utilizza (ad esempio la variazione massima di potenza ammessa per il motogeneratore) ed il dimensionamento dell'accumulo; tale legame è particolarmente evidente nel caso dei supercondensatori, dove l'energia disponibile è limitata.

11.4 Il grado di ibridizzazione e la scelta del convertitore primario

Al fine di consentire al progettista di avvalersi di quanto reso disponibile dall'analisi dei sistemi di propulsione ibrida già sviluppati e collaudati, è stato proposto [7] un parametro, il grado di ibridizzazione del sistema di trazione

Rh_{serie} (anche “Hybridization Degree”, HD [8]), definito dal rapporto tra la potenza continuativa del convertitore primario e quella massima ai morsetti dell’azionamento elettrico:

$$Rh_{serie} = HD_{serie} = P_G / P_{picco\ azionamento} \quad (9)$$

Il parametro esprime in modo sintetico la percentuale della potenza di trazione erogabile dal motogeneratore, mentre la parte rimanente è affidata al sistema di accumulo, ed è utilizzato quindi per la classificazione delle diverse tipologie di ibridi “serie”.

Per gli ibridi di tipo “parallelo” fu proposto [7] un parametro analogo, dato dal rapporto tra la potenza del motore termico e quella totale all’albero, che nella diversa definizione rispecchia la derivazione degli ibridi “parallelo” dai sistemi di propulsione convenzionali.

È stato poi proposto di utilizzare l’inverso del suddetto parametro, quindi il rapporto tra la potenza dell’azionamento elettrico e quella totale all’albero [9]:

$$HD_{paral.} = P_{picco\ azionamento} / (P_{picco\ azionamento} + P_{picco\ ICE}) \quad (10)$$

che sembra meglio rispondere alla diversa derivazione delle due tipologie di ibrido. Infatti se l’ibrido serie è correttamente visto come un’evoluzione del veicolo elettrico a batteria, il parallelo rappresenta un’evoluzione di un veicolo convenzionale: adottando le definizioni (9) e (10) i veicoli di partenza in entrambi i casi hanno grado di ibridizzazione nullo.

Introdurre il concetto di “grado di ibridizzazione” consente di orientarsi nella scelta della potenza del convertitore primario in funzione del tipo di missione.

In Fig. 11.6 (lo schema di base è ripreso dal Capitolo 2) e Tab. 11.2 sono riportati alcuni casi esemplari, con riferimento a veicoli stradali e su rotaia.

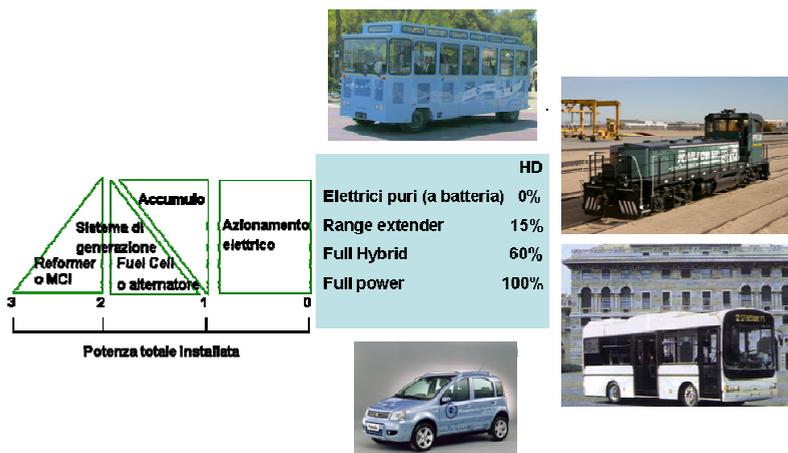


Fig.11.6⁵ - Campi di esistenza degli ibridi-serie. In senso orario, si passa dal veicolo per applicazioni di nicchia a mezzi con applicazioni più estese, all’autovettura multi uso

⁵ I mezzi rappresentati, nel senso di lettura, sono i seguenti: Albatros (Micro-Vett), Green-goat (Railpower), Europolis (ALTRA), Panda Hydrogen (Fiat).

Tab. 11.2 - Tipologie veicolari e grado di ibridizzazione

| | <i>Classe del veicolo</i> | <i>Grado di ibridizzazione</i> |
|----------------|------------------------------|--------------------------------|
| Honda New FCX | Compact car | 100% |
| Panda Hydrogen | Compact car | 100% |
| EJR NE train | Automotrice ferroviaria 35 t | 68% |
| Irisbus FC Bus | Autobus urbano 15 t | 37% |
| GreenGoat | Locomotore di manovra | 14% |

Si osservi come nel caso del Green Goat, un ibrido serie concepito come “range extender”, la potenza del motore a combustione interna arriva al 10-15% della potenza massima richiesta dall’azionamento, mentre per mezzi con specifiche estese in termini di flessibilità di esercizio, come l’Europolis, il grado di ibridizzazione è più alto.

Se ne deduce perciò che nei veicoli multi uso, come le autovetture, l’imprevedibilità del tipo di utilizzo comporta un rateo di ibridizzazione molto alto; per locomotive, autobus, automotrici, per i quali le specifiche comprendono dei profili di missione caratteristici, HD può essere minore; HD raggiunge infine un valore minimo nel locomotore di manovra, caratterizzato da un rapporto tra il tempo di lavoro effettivo e quello totale molto basso, come pure ridotto è il rapporto tra la potenza media alle ruote e quella richiesta per lo spunto. La potenza media giornaliera è perciò molto bassa rispetto a quella di picco, ed il convertitore primario può essere di potenza molto ridotta rispetto alla potenza di picco dell’azionamento.

Nella scelta della tipologia del convertitore primario intervengono i parametri usuali (potenza specifica, consumi, emissioni, disponibilità commerciale, costi di acquisto e di gestione), valutati tenendo però conto delle peculiarità dell’applicazione ibrida. Anche in questo caso ci si può rifare all’esperienza di realizzazioni simili, calcolando il ritorno economico dell’investimento per le diverse scelte possibili.

Tralasciando le celle a combustibile, per le quali si rimanda al Capitolo 9, in termini generali si può dire che, nelle taglie piccole, la scelta di un turbogas è penalizzata dalla disponibilità commerciale di economici motori di derivazione automobilistica che offrono prestazioni eccellenti anche in termini di potenza specifica. Nelle taglie grandi, tipicamente per un treno, i vantaggi delle turbine in termini di peso ed ingombro rispetto ai motori diesel diventano molto significativi, mentre l’ibridizzazione consente di avvicinarne i rendimenti medi di esercizio a quelli del diesel, grazie ad una gestione in regime semi-stazionario.

In questo ed altri casi sarà sempre la LCA dell'investimento, unita a considerazioni sulla manutenibilità del sistema in un ambito di applicazione non tradizionale, che orienterà il progettista.

11.5 La scelta della tipologia del sistema di accumulo elettrico

Per la scelta della tipologia del sistema di accumulo elettrico da utilizzarsi in un ibrido, è utile servirsi del rapporto P_{ES}/E_{ES} tra la potenza e l'energia richieste al sistema di accumulo, relazioni (7) ed (8).

Riprendiamo la Fig. 11.3, che rappresenta un tipico ciclo in equilibrio energetico (le batterie sono ricaricate non solo in frenatura ma anche dal termico, consentendo il ristabilimento dello stato di carica iniziale della batteria) il che ci consente di utilizzarlo per il dimensionamento della batteria. Nel diagramma leggiamo la potenza massima dell'accumulo, $P_{ES(1)}$, mentre l'energia richiesta alla batteria in fase di accelerazione è l'area compresa tra la curva della potenza totale nel tempo e quella della potenza erogata dal termico, $E_{ES(1)}$.

Nei casi più complessi (ad esempio quando si impone tra le specifiche quella della marcia a motogeneratore spento per un certo tratto) si deve considerare un profilo di missione che rispetti la condizione di equilibrio energetico o che preveda la ricarica da rete a fine missione/fine giornata (plug-in), e diagrammi come quello rappresentato in Fig. 11.7, che danno l'andamento nel tempo dell'energia utilizzata (comprese le perdite del sistema di trazione ibrido), di quella generata e di quella accumulata. La figura si riferisce alla missione di una automotrice ferroviaria su di un percorso di circa 100 km, per metà in salita e per metà in discesa. Inoltre i 15 chilometri all'inizio ed alla fine della tratta sono percorsi in puro elettrico, a motogeneratore spento (la curva relativa parte al tempo 900"), perché considerati in ambito urbano.

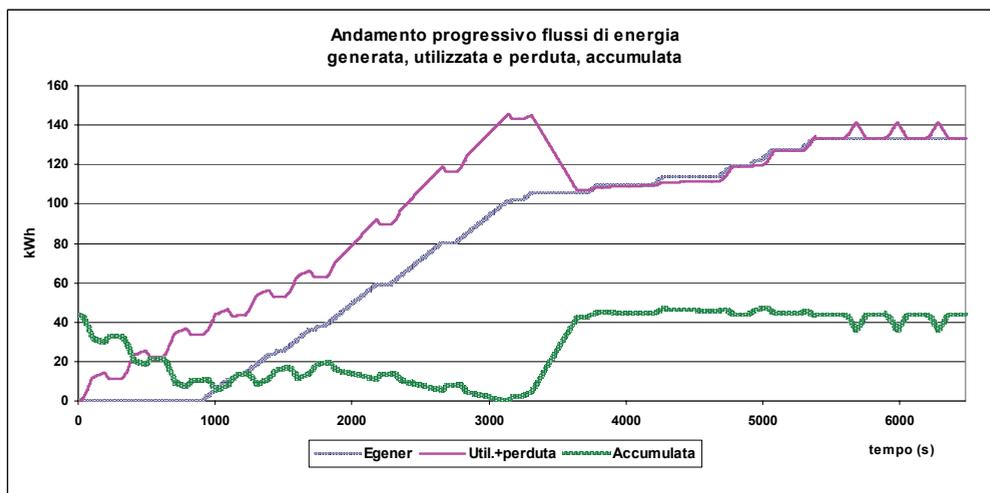


Fig. 11.7 - Andamento nel tempo dei flussi di energia in una missione "tipo"

Le due curve dell'energia generata e quella rappresentativa della somma dell'energia utilizzata e di quella perduta (quella più in alto), a fine ciclo coincidono per la condizione di bilanciamento dei flussi (Eq. 4); la curva dell'energia scambiata tra l'accumulo, l'azionamento ed il motogeneratore (Eq. 8), raggiunge il minimo dopo un'ora circa di funzionamento.

Il dimensionamento dell'accumulo deve essere tale da consentire l'andamento rappresentato in figura, tenendo presente che esistono i) vincoli legati alle caratteristiche del sistema di accumulo (come lo stato di carico minimo, SOC, al di sotto del quale non si deve scendere per non danneggiare la batteria), ii) vincoli circuitali (vedi paragrafo successivo sulle variazioni ammissibili dello stato di carica dell'accumulo) e iii) vincoli energetici (legati al peggioramento del rendimento del sistema di accumulo quando è troppo scarico o troppo carico, per l'aumento della sua resistenza interna), che impongono di migliorare opportunamente il valore così trovato. Nell'ipotesi, ad esempio, di adoperare batterie al piombo per le quali non è consigliabile scendere con il SOC sotto il 20-30%, né salire (in un veicolo ibrido) sopra il 70-80%, il contenuto energetico totale dell'accumulo E_{ES} deve essere circa doppio del valore calcolato con la (8).

In questo caso il valore iniziale del contenuto energetico dell'accumulo che consente alla curva relativa di mantenersi sempre ≥ 0 è di circa 44 kWh. Il corrispondente diagramma delle potenze permette di individuarne la potenza P_{ES} , 450 kW. Di conseguenza, il rapporto P_{ES}/E_{ES} vale circa 10.

Il valore del rapporto P_{ES}/E_{ES} calcolato come sopra, che chiameremo $(P/E)_{miss}$, è circa unitario per le tipiche missioni di un veicolo elettrico a batteria o di un "range extender", è più alto in un ibrido "full performance" ed ancora maggiore in un "mild hybrid". Riprendendo i dati dalle Tab. 8.2-8.3, abbiamo quindi:

Tab. 11.3 - Specifiche dell'accumulo elettrico per tipologie diverse di ibridi

| | <i>Unità</i> | <i>Range extender</i> | <i>Full performance</i> | <i>Mild hybrid</i> |
|---|--------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|
| Max. impulso di potenza in accelerazione | kW | 40 | 40/50 | 13 |
| Max. impulso di potenza in frenata rigenerativa | kW | 25 | 30 | 8 |
| Energia totale dell'accumulo | kWh | 11 | 3,4 | 0,06 |
| P/E , (con $P = P_{accel}$) | h^{-1} | 4 | 13 | 217 |
| P/E (con $P = P_{frenata}$) | h^{-1} | 2 | 9 | 133 |

Per ogni ciclo è possibile calcolare due valori di P/E, l'uno relativo alla fase di accelerazione, l'altro alla fase di frenata, cui corrisponde un minor valore dell'energia ($E_{ES(2)} < E_{ES(1)}$), posto che la potenza gestibile dalla macchina elettrica (P) non cambi; in genere, però, come in Tab.11.3, si fa riferimento al valore dell'energia calcolato per la fase di accelerazione, perché l'accumulo viene in genere dimensionato per integrare, in accelerazione, la sorgente primaria. Naturalmente, se la ragione primaria dell'accumulo è quello del recupero di energia, allora il rapporto P/E di missione sarà quello calcolato per la fase di frenata.

Analogamente, se la missione del veicolo prevede fasi di ricarica rapida, ad esempio ai capolinea nel caso di un autobus [10], o addirittura alle fermate [11]. Al diminuire del tempo disponibile per la ricarica, aumenta rapidamente il valore del rapporto $P_{ES(2)}/E_{ES(2)}$, fino ad arrivare a valori di 2-300 per i tipici cicli di un autobus urbano, costituiti dalla fermata per la salita e discesa, una decina di secondi, seguiti da 50-60 secondi di marcia.

Come mostrato in Tab. 11.3, nel caso degli ibridi la richiesta di potenza all'accumulo è assai più grande rispetto alla richiesta di energia, che è invece determinante per il dimensionamento della batteria del veicolo "elettrico puro": per gli ibridi ci si orienterà verso sistemi di accumulo elettrico prevalentemente "di potenza" invece di sistemi prevalentemente "di energia".

Il parametro che esprime sinteticamente questa "specializzazione" dei sistemi di accumulo è di nuovo un rapporto P/E, calcolato questa volta con i valori dell'energia specifica e della potenza specifica dell'accumulo (Fig. 11.8).

$$P_{\text{specifica}}/E_{\text{specifica}} = (P/E)_{\text{acc.}} \quad [W/Wh] \quad (10)$$

In linea teorica, dovrebbe verificarsi l'uguaglianza:

$$(P/E)_{\text{acc}} = (P/E)_{\text{miss}} \quad (11)$$

Nel diagramma di Ragone⁶, Fig. 11.8, sono state quindi riportate, oltre ai campi di esistenza delle diverse tipologie di accumulo elettrico, le rette per cui il rap-

⁶ I diagrammi di Ragone (vedi Fig. 15.12, pag. 400) da utilizzarsi per la scelta del dispositivo d'accumulo più adatto ad un particolare microciclo, devono fare riferimento a tutte le tipologie di accumulo e devono quindi essere compattati per famiglie di dispositivi. In questo caso, dovendosi fare un riassunto del comportamento del sistema di accumulo occorre scegliere, per ogni curva, un punto particolarmente indicativo della curva stessa, come i punti corrispondenti alle condizioni di scarica a potenza massima, "punti di ginocchio", del diagramma di Ragone relativo ad una specifica batteria (Fig. 15.12). Ad esempio, dal manuale delle batterie Genesis (batterie al piombo ad alta potenza specifica), si ricava che per queste batterie è possibile un regime di scarica molto intenso, con un minimo di 2'. Per queste batterie il valor massimo del rapporto P/E è quindi pari a 30.

Con le batterie al piombo tradizionali non sono possibili regimi di scarica così elevati ed il punto rappresentativo del regime di scarica massimo ammissibile si trova in corrispondenza ad un valore del rapporto P/E più basso.

porto P/E è costante. Ad ogni retta corrisponde un regime di scarica a potenza costante, ad esempio la retta P/E = 10 W/Wh corrisponde ad una scarica che avviene in 6' (1/10 h): il campo di esistenza delle batterie corrisponde a tempi di scarica che vanno dalle ore ai minuti, quello dei supercondensatori a tempi di scarica a potenza massima inferiori al minuto, i volani hanno caratteristiche intermedie tra le batterie ed i supercondensatori⁷.

Nel caso della batteria Zebra il rapporto $(P/E)_{acc}$ è circa unitario, e quindi il tempo di scarica caratteristico è dell'ordine di ore, perché la Zebra è una tipica batteria per veicoli "elettrici puri".

Per le batterie al Ni-Idruri e per quelle al Litio il rapporto $(P/E)_{acc}$ più alto corrisponde ad una scarica ottimale di alcuni minuti, che le rende specialmente adatte ad ibridi "mild" e micro.

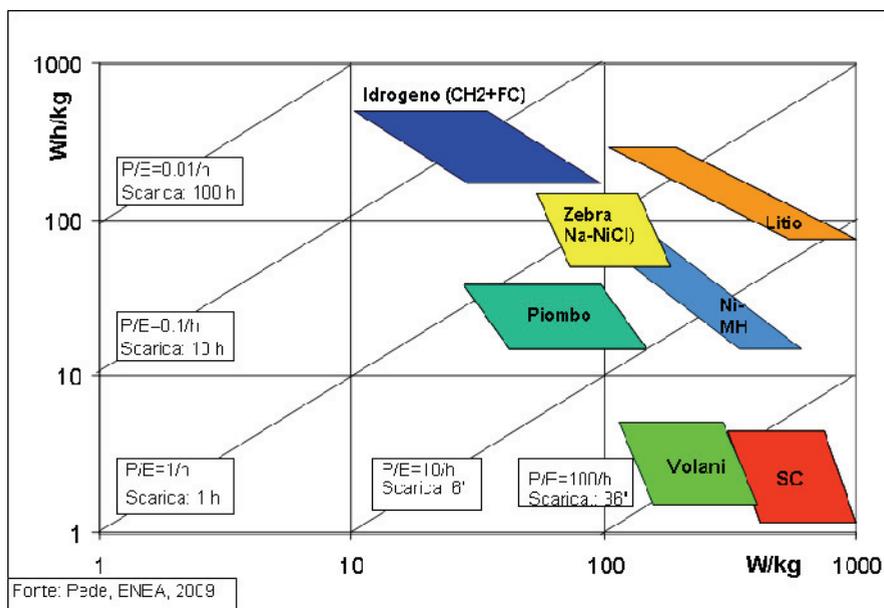


Fig. 11.8 - Diagramma di Ragone e regimi di scarica tipici

Si osservi come l'ampiezza dei campi di esistenza per alcune tecnologie, ad esempio il litio ed il piombo, stia ad indicare la possibilità di scegliere, per alcune batterie, tipologie ad alta potenza specifica e tipologie a potenza più bassa, comunemente dette "per trazione", intendendo riferirsi con questo termine a batterie per veicoli a trazione prevalentemente elettrica (Tab. 8.11, pag. 236).

⁷ Questo li rende più adatti a quei mezzi, come i treni, che accelerano con maggiore progressività e per un tempo più lungo di quello in genere usuale per i mezzi su gomma.

Nel caso dei supercondensatori, infine, l'energia specifica è di qualche Wh/kg, a fronte di potenze specifiche di molte centinaia di W/kg, quindi il rapporto è in genere ben maggiore di 100.

L'esistenza di "vuoti" all'interno del diagramma di Ragone, ad esempio per valori del rapporto P/E compresi tra 10 e 100, ha motivato il ricorso a sistemi di accumulo "misti", costituiti da una sezione di potenza, realizzata ad esempio con supercondensatori, ed una di energia, vedi gli approfondimenti alla parte IV.

Nel caso di Fig. 11.7, l'uguaglianza [11] va verificata per le diverse tratte della missione, così come va verificata separatamente per le fasi di frenatura, se l'accumulo ha il recupero energetico come funzione principale, o comunque di ricarica rapida.

Infatti, le prestazioni delle batterie non sono simmetriche in carica e scarica (le correnti ammissibili in scarica sono in genere molto più alte), e quando la scelta dell'accumulo è condizionata dal tempo di ricarica occorre servirsi di un diverso diagramma di Ragone, costruito con le potenze ammissibili in ricarica. È questo, ad esempio, il caso di un veicolo per il trasporto pubblico urbano con ricarica prevista ad ogni fermata, quale lo ZeroFilo-Bus, un brevetto ENEA in fase di sviluppo insieme con BredaMenariniBus. Il diagramma delle potenze relative al sistema di accumulo è riportato in Fig. 11.9.

Come può vedersi, la potenza massima in gioco è quella relativa alla fase di ricarica, 400 kW, mentre l'energia ricaricata, necessaria per la percorrenza di un chilometro, è 2.6 kWh, con un rapporto $(P/E)_{miss}$ pari a 153.

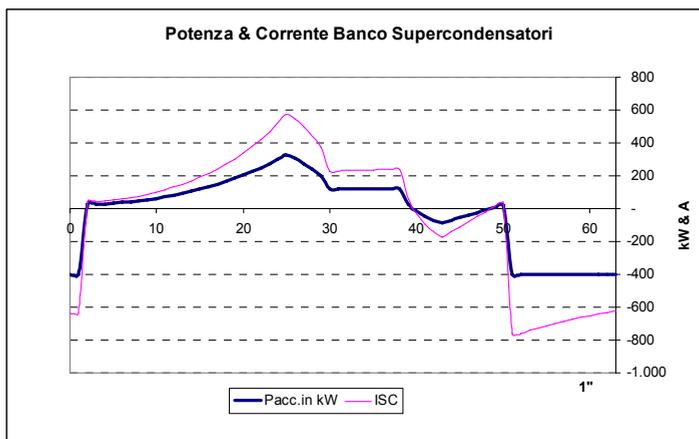


Fig. 11.9 - Diagramma di Ragone e regimi di scarica tipici per uno ZeroFilo-Bus da 18 m

Per i supercondensatori le correnti in ricarica possono essere uguali a quelle in scarica, il campo di esistenza rimane quello indicato in Fig. 11.8, la relazione (11) risulta soddisfatta.

Se consideriamo invece le batterie al litio e le potenze massime ammissibili in ricarica, minori di quelle in scarica, l'area indicata in Fig. 11.8 va spostata verso sinistra, e si è lontani quindi, come rapporto $(P/E)_{acc}$, dal valore di specifica per un ciclo di questo tipo, $(P/E)_{miss}$. Ciò non significa che non si possano scegliere le batterie al litio per questa applicazione, ma questa scelta comporterà, a parità di potenza, un eccesso di energia rispetto a quella necessaria.

11.6 Configurazione elettrica del veicolo e vincoli sul dimensionamento dell'accumulo

Le condizioni fornite precedentemente per il dimensionamento del sistema di accumulo devono essere considerate come necessarie, ma non sufficienti, per la soluzione del problema. Infatti le energie e le potenze calcolate come detto sono quelle che l'accumulo deve scambiare con il resto del sistema, ma in generale non è detto che esso possa scambiare tutta l'energia di cui è in possesso.

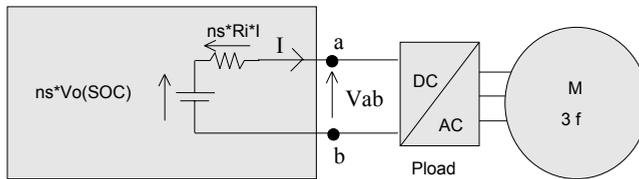


Fig. 11.10 - Configurazione circuitale per un mezzo elettrico "puro"

Per chiarire si consideri ad esempio il caso di un veicolo elettrico puro il cui azionamento sia alimentato direttamente da un pacco batterie realizzato mettendo in serie n_s moduli identici fra di loro (Fig. 11.10)⁸. L'azionamento può operare in modo ottimale all'interno di un determinato intervallo di tensioni V_{min} e V_{max} , cosa che si trasforma in un vincolo sulla tensione di batteria:

$$V_{min} \leq V_{ab} \leq V_{max} \quad (12)$$

Poiché la tensione totale del pacco batterie è la somma di quella dei moduli in serie, risulta:

$$V_{min} \leq V_{ab} = n_s * (V_o(soc) - R_i(soc) * I) \leq V_{max} \quad (13)$$

⁸ In figura è mostrato anche uno schema equivalente, estremamente semplificato, del pacco batterie. La tensione a vuoto della batteria V_o è funzione dello stato di carica e varia linearmente tra un valore minimo ed uno massimo in corrispondenza dei valori di SOC pari a zero (batteria completamente scarica) ed uno (batteria completamente carica).

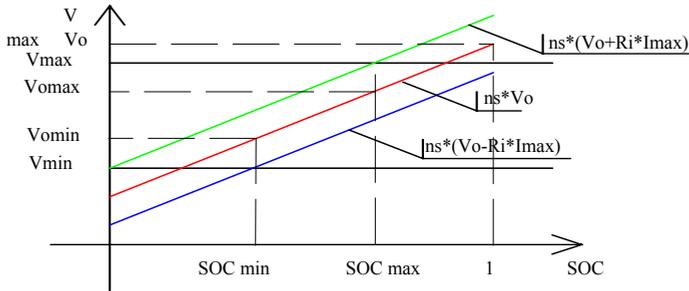


Fig. 11.11 - Limiti di variazione del SOC

In base alla (13) ed allo schema equivalente del pacco è possibile tracciare il diagramma di Fig. 11.11.

Esiste quindi una relazione tra il numero di batterie poste in serie ed i valori estremi dell'intervallo di variazione dello stato di carica che garantisce il buon funzionamento del sistema. I valori di n_s che soddisfano le condizioni di lavoro possono essere più di uno (dipende dal caso specifico), il progettista potrà operare la scelta di n_s in modo, ad esempio, di massimizzare l'energia estraibile dal pacco: infatti un indice approssimato dell'energia ricavabile dalla singola batteria pacco può essere $C_s = C_n \Delta SOC_{max}$ dove C_s è la frazione della capacità nominale effettivamente utilizzabile nell'applicazione considerata.

Oltre al vincolo elettrico sulla variazione di stato di carica ne potrebbero esistere, per la particolare batteria, anche uno chimico (es: per il piombo è sconsigliabile scendere sotto il 20%), per cui occorrerà di volta in volta verificare la condizione più restrittiva. È importante notare che non è detto in generale che aumentare il numero di batterie in serie corrisponda ad aumentare l'energia usufruibile da esse, infatti potrebbe accadere che venga a diminuire il ΔSOC_{max} , in seguito si cercherà di chiarire la cosa con un esempio numerico.

11.6.1 Costruzione del pacco, il problema dell'equalizzazione

In generale si potrebbe pensare che sia possibile realizzare il pacco batterie ponendo in serie/parallelo in modo opportuno un numero di batterie aventi caratteristiche diverse fra di loro, come mostrato in Fig. 11.12.

In realtà questa scelta può comportare due problemi, uno riguarda i rami in parallelo e l'altro la serie risultante da essi, legati alla differenza di tensione dei vari elementi del pacco (problema dell'equalizzazione), per chiarire si osservi la Fig. 11.13. Nella figura si considerano due batterie di capacità diverse C_1 e C_2 caricate con una stessa corrente I . Si supponga per semplicità che le due batterie siano della stessa tipologia (es. piombo) e lavorino nello stesso *range* di tensioni minime e massime, se sono scariche (SOC=0) la loro tensione a vuoto sarà identica, ma in carica la batteria con capacità minore raggiungerà la tensione massima ammissibile prima dell'altra.

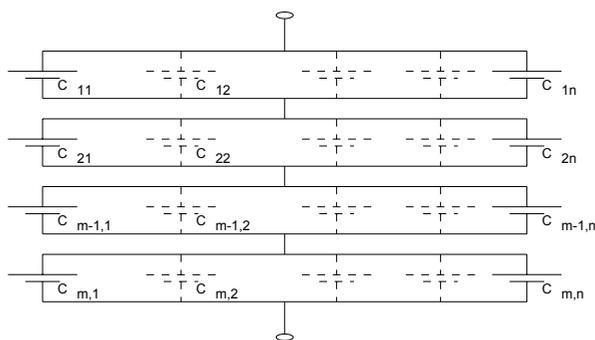


Fig. 11.12 - Una possibile realizzazione di un pacco batterie

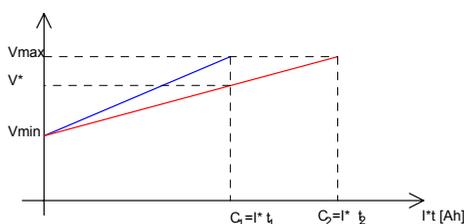


Fig. 11.13 - Andamento della tensione di carica per batterie di diversa capacità

Se si ponessero in parallelo i due moduli si avrebbe una circolazione indesiderata di corrente tra di essi dovuta allo squilibrio delle tensioni; se invece li si ponessero in serie allora durante il funzionamento la batteria a capacità minore impedirebbe di caricare o scaricare completamente quella a capacità maggiore, in quanto (essendo la corrente identica) non si potrebbe portare la prima a tensioni inferiori a V_{min} o superiori a V_{max} .

Occorre poi notare che la maggior parte delle tipologie di batterie, pur prodotte in serie ed aventi le stesse caratteristiche, presentano in realtà delle tolleranze abbastanza elevate sulle caratteristiche nominali⁹, ne consegue che si tende ad evitare il parallelo di esse anche quando si tratta di elementi nominalmente identici tra di loro, se per qualche motivo si è obbligati a farlo allora si utilizzano dei diodi per impedire la circolazione di correnti parassite. Normalmente si realizza il pacco utilizzando una serie di elementi aventi gli stessi dati di targa ed appartenenti allo stesso lotto di produzione e si pongono gli elementi in serie in modo che siano sempre attraversati dalla stessa corrente e lavorino il più possibile in condizioni simili tra di loro (abbiano la stessa “storia”).

11.6.2 Esempio applicativo

Si consideri il caso in cui si voglia interfacciare un pacco di supercondensatori con un bus in continua secondo lo schema di Fig. 11.14.

⁹ Differenze che si esaltano con l’uso della batteria.

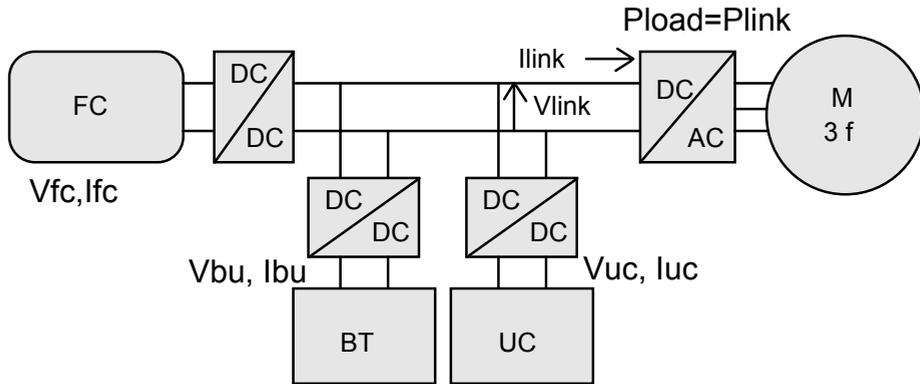


Fig. 11.14 - Possibile configurazione circuitale per un drive train ibrido con accumulo misto

Lo schema rappresenta un veicolo ibrido serie alimentato da una cella a combustibile posta in parallelo ad un banco di batterie ed uno di supercondensatori.

Il sistema è gestito in modo che le batterie e la cella siano comandati in corrente, mentre i supercondensatori sono regolati in modo di mantenere costante la tensione di link, pari a quella nominale dell'azionamento.

Prendendo come riferimento, ad esempio, la 600 FC della Fiat si ha che la tensione di link è pari a 216 V, mentre la potenza dell'azionamento è 15 kW continuativi e 30 kW in sovraccarico.

Per quanto precedentemente detto il pacco di SC che si vuole realizzare sarà formato dalla serie di n_s elementi dello stesso tipo: è interessante analizzare come cambia il dimensionamento in funzione della capacità del modulo base prescelto¹⁰.

La prima cosa da fare è individuare l'intervallo di tensione nel quale i supercondensatori possono operare, che deve essere:

$$0.3V_{link} \leq V_{sc} \leq 0.9V_{link} \quad (14)$$

Essendo V_{link} pari a 216 V V_{sc} può variare tra 64,8 e 194,4 V.

Utilizzando l'approccio descritto precedentemente è possibile ricavare per ciascun modulo il numero n_s minimo e massimo di elementi da mettere in serie per soddisfare i vincoli sulla tensione.

In particolare considerando nulla la tensione a stato di carica zero e massima quella a stato di carica uno, vedi Fig. 11.11, si possono scrivere le seguenti equazioni:

¹⁰ Si veda la Tab. 8.10 per le caratteristiche di alcuni supercondensatori commerciali.

$$\frac{V_{\min} + R_i I_{\max}}{V_o(SOC_{\min})} \leq n_s \leq \frac{V_{\max} - R_i I_{\max}}{V_o(SOC_{\max})} \quad (15)$$

che mettono in risalto il legame tra le varie grandezze.

Si osservi che ai valori minimi di n_s , essendoci pochi condensatori in serie la tensione massima del pacco sarà vicina a V_{\min} ed il sistema funzionerà solo per intervalli ristretti dello stato di carica e per valori dello stesso prossimi ad uno.

Per alti valori di n_s si avrà il comportamento opposto ed il sistema funzionerà per valori dello stato di carica prossimi a zero, all'interno di questi due estremi si avrà la massima variazione possibile dell'intervallo utile di funzionamento e di conseguenza anche la massima energia estraibile.

Utilizzando le relazioni precedenti ed elaborandole (per semplicità è stato fatto per via numerica) si ottengono i risultati indicati in Tab. 11.4.

Tab. 11.4 - Limiti alle variazioni del numero di supercondensatori

| Capacità [F] | 5000 | 2800 | 1200 | 600 | 200 | 100 |
|----------------|------|------|------|-----|-----|-----|
| Numero minimo | 29 | 35 | 35 | 53 | 30 | 41 |
| Numero massimo | 323 | 161 | 166 | 63 | 432 | 180 |

Essendo l'energia immagazzinata in un condensatore è pari a $E_c = \frac{1}{2} CV^2$ sarà anche:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \frac{C}{n_s} \left[n_s^2 V_{\max}^2 (SOC_{\max}^2 - SOC_{\min}^2) \right] \quad (16)$$

dove appare la massima tensione di lavoro del singolo modulo ed il numero di moduli in serie. È possibile tracciare un diagramma (Fig. 11.15) che mostra la variazione della quantità di energia effettivamente accumulabile/estraibile dai componenti in funzione del loro numero. Le curve rappresentate vanno da quella corrispondente al modulo da 5000 F, quella più in alto, a quella corrispondente al modulo da 100 F, quella, in basso, più piatta.

La retta corrispondente a 100 kJ mostra come sia possibile ottenere la stessa prestazione con un numero minimo e massimo di moduli in serie dello stesso modello, i punti A e B rappresentano i valori minimi e massimi assoluti. I puntini rappresentano il massimo numero di condensatori in serie di un certo tipo cui ci si può spingere ottenendo un incremento di energia utilizzabile, oltre quel numero l'energia decreta, portando ad un sottoutilizzo dei componenti.

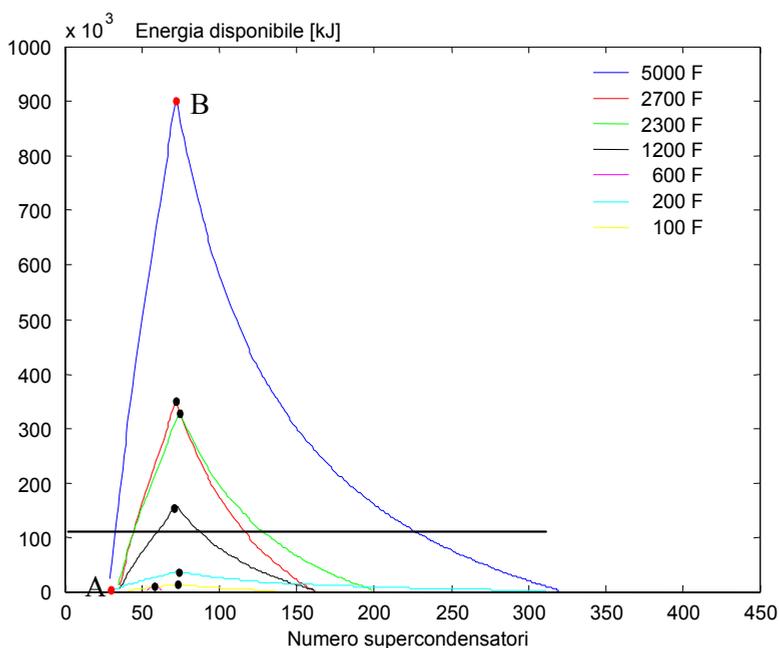


Fig. 11.15 - Energia dei supercondensatori

Ringraziamenti

Le attività svolte in ENEA nell'ambito della sperimentazione al banco dei sistemi di trazione elettrici ed ibridi sono state rese possibili dalla collaborazione di tanti, molti di più di quelli che figurano tra gli autori dei diversi capitoli a firma ENEA.

Sentiamo perciò il bisogno di ringraziare almeno i colleghi in servizio, Carla Cestoni, Vincenzo Sglavo ed Angelo Puccetti, Carmine Grasso e Sabatino Puzo, Giovanni Bernardini e Fernando Smargiase, Francesco Sacco e Claudio Chiesa, Carlo Villante, in rappresentanza di tutti coloro che hanno lavorato con noi in questi anni, pensionati, trasferitisi o appartenenti ad altri gruppi di lavoro.

Ringraziamo infine per il loro contributo in idee ed entusiasmo tutti i ragazzi e le ragazze, tesisti, borsisti, assegnisti, per i quali le attività svolte nei nostri laboratori speriamo siano state di preparazione allo svolgimento di una proficua attività professionale, che per molti di loro è proprio nel settore delle motorizzazioni a basso impatto ambientale.

Bibliografia

- [1] "Lo sviluppo di sistemi di trazione ibridi nell'ambito delle attività dell'ENEA", G. Pede, M. Vellone, ENEA, Energia, Ricerca ed Innovazione, ottobre 1995.
- [2] "Hybrid Vehicles, system studies and development", Carlo van de Weijer, Dick Schmal, TNO, Electric & Hybrid Vehicle Tecnology, '96.
- [3] "Simulation Based Concept Analysis for a Micro Hybrid Delivery Van" C.L. Goodfellow, P.S. Révéreault, Ricardo UK Ltd, L.P. Gaedt, D. Kok, T. Hochkirchen, Ford Forschungszentrum Aachen, M. Neu Gates GmbH Aachen, C. Picod, Valeo Electrical Systems, SAE Paper 2005-01-1161, SAE World Congress 2005.
- [4] "Impact of Diverse Driving Cycles on Electric and Hybrid Electric Vehicle Performance" Feng An, M. Barth, G. Scora, University of California, Riverside, SAE Paper 972646, SAE World Congress 1997.
- [5] "Maximizing Direct-Hydrogen PEM Fuel Cell Vehicle Efficiency – Is Hybridization Necessary?", D.J. Friedman, University of California Davis, SAE Paper 1999-01-0529, SAE World Congress 1999.
- [6] "Rail-car hybrid trains to reduce fuel consumption and emissions", R. Cheli, G. Grande, Trenitalia SpA, R. Giglioli, Università di Pisa, R. Manigrasso, Politecnico di Milano, G. Pede, ENEA, 7th World Congress on Railway Research, Montreal 2006.
- [7] "New Classification On Electric-Thermal Hybrid Vehicles", J. Beretta, Psa Peugeot Citroen, EVS-15, Bruxelles 1998.
- [8] "Degree of Hybridization Modelling of a Fuel Cell Hybrid Electric SUV", P. Atwood, S. Gursky, D. Nelson, Virginia Polytechnic Institute and State University, K. Wipke, National Renewable Energy Laboratory, SAE SP-1589, Detroit, March 2001.
- [9] "Evaluating Commercial and Prototype HEVs", Feng An et alii, Argonne National Laboratory, SAE SP-1607, Detroit, March 2001.
- [10] "Rapid Charged Hybrid: A Practical, 70-90% Electric Bus without Overhead Wires", Roger Bedell, Optrid Transporte Sostenible S.L. Granada, Spain, EVS-24, Stavanger 2009.
- [11] "Il Filobus senza fili"; Giovanni Pede; Maurizio Romanazzo; Mobility Lab n. 24, novembre-dicembre 2008.
- [12] "Comparison of SC and high-power batteries for use in hybrid vehicles", Massimo Ceraolo, Stefano Barsali, Giovanni Lutzemberger, Mirko Marracci, Università di Pisa – Dipartimento di Sistemi Elettrici ed Automazione, ICE 2009, Capri.

CAPITOLO 12

PROCESSO DI SVILUPPO E MESSA A PUNTO

Fernando Ortenzi *, Ennio Rossi **

* *Centro di ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL),
"Università di Roma La Sapienza"*

** *ENEA, Tecnologie per l'Energia, Fonti Rinnovabili e Risparmio Energetico*

Nella progettazione di un veicolo ci si avvale quasi sempre di componenti e sottosistemi già impiegati in altre applicazioni e reperiti sul mercato e, pur consistendo questi in apparati e dispositivi affidabili e collaudati, è in genere necessario effettuare su di essi alcune caratterizzazioni sperimentali. E questo per vari motivi. Spesso non esistono informazioni di dettaglio su alcune loro caratteristiche che, se pur note al costruttore, rimangono patrimonio aziendale di quest'ultimo che, per vari motivi, può ritenere opportuno non divulgare. Altre volte non è nota la risposta di un prodotto in alcune modalità di funzionamento non previste nell'uso originario; infine può essere necessario approfondire gli aspetti di compatibilità ed integrazione tra componenti e sistemi utilizzati insieme per la prima volta.

Di seguito si approfondiranno questi aspetti per il componente più critico, l'accumulo elettrico, con brevi cenni agli altri sottosistemi.

12.1 Accumulo elettrico

Uno dei componenti di un sistema di trazione elettrico che necessita spesso di uno studio approfondito è l'accumulo elettrico, e questo in special modo per i veicoli ibridi. Infatti le principali categorie di impiego, trascurando le batterie per telefoni e piccoli apparecchi, sono le batterie per avviamento, quelle per usi di back-up, quelle per trazione. Le prime, sicuramente le più economiche anche in virtù della notevole produzione, sono lontane dalle esigenze dell'ibrido in quanto non progettate per impieghi gravosi, senza attenzione al rendimento, sostanzialmente delicate meccanicamente, senza garanzie per la vita ciclica. La seconda categoria, pensata per usi stazionari, non sopporta sollecitazioni meccaniche. Le batterie per trazione sono in effetti quelle più adatte all'uso. Queste ultime, progettate per il mercato dei carrelli elevatori più che per le vetture elettriche, sono adatte ad impieghi con cicli di scarica profonda al fine di utilizzare l'intero contenuto energetico nella giornata di lavoro, e prevedono una ricarica notturna lenta e completa, effettuata da un caricabatteria corredato di svariati controlli (di tensione, di corrente, di temperatura). Il regime di ricarica è in genere quello conosciuto come IU, consistente di una fase a corrente costante e una a tensione costante a volte seguita da una finale di equalizzazione delle celle.

L'impiego di queste batterie sul veicolo ibrido è abbastanza differente. Lo stato di carica, SOC (State of Charge), non scende in genere mai sotto il 50% e non sale mai oltre il 90% circa per motivi di ottimizzazione dell'impiego. Parte importante della ricarica è demandata alla frenata a recupero, in genere con potenza elevata e che può portare a sovratensioni e all'ebollizione dell'elettrolita quando si tenta di caricare oltre i limiti batterie già cariche. L'equalizzazione è quasi sempre assente. Infine il ciclo di impiego è imprevedibile dal momento che la vettura nasce per uso libero e non per missioni cadenzate e ripetitive.

I principali test da effettuare per impiegare correttamente un pacco batterie in un veicolo elettrico ibrido sono:

- *Costruzione del diagramma di Peukert o verifica dello stesso* qualora fornito dal costruttore. Consiste in un grafico che consente di conoscere la possibilità di erogazione della batteria (carica elettrica o energia) in funzione della modalità di scarica (tempo, corrente, potenza).

La costruzione di tale diagramma comporta l'esecuzione di un certo numero di prove, almeno 5-6, in numero tanto maggiore quanto più si desidera un risultato dettagliato, consistenti ognuna in una ricarica standard, cioè secondo le modalità consigliate dal costruttore e tale da garantire il raggiungimento di SOC = 100%, seguita da una scarica a corrente costante prolungata fino al raggiungimento della tensione minima ammessa.

- *Capacità di erogazione in funzione della temperatura.* Le batterie sono molto sensibili alla temperatura di funzionamento. Sono progettate per dare le migliori prestazioni globali a 20-25 °C, ma forniscono un aumento di carica fin verso i 50 °C, mentre per temperature inferiori a 20 °C presentano una perdita di carica di circa l'1% per ogni grado di raffreddamento.

- *Resistenza interna.* È un parametro importante per la conoscenza dei fenomeni di riscaldamento e di perdita di efficienza della batteria. Una sua conoscenza completa implicherebbe la sua misura a tutti gli stati di carica, a varie temperature, a varie correnti, in carica e in scarica. La prova si effettua secondo procedure standardizzate, di cui quelle formulate dal consorzio EUCAR (costruttori ed utilizzatori di batterie) sono le più usate. Si impongono alla batteria le operazioni indicate in Fig. 12.1.

I due impulsi di corrente sono opposti, in modo che la batteria non modifichi il suo stato di carica. Si esegue quindi la misura della variazione di tensione conseguente alla interruzione dell'impulso di corrente. Il va-

lore della resistenza interna R_i è dato dal rapporto $R_i = \frac{\Delta V}{I}$, in cui il

gradino di corrente è rappresentato da AB (in genere si intende per corrente positiva quella erogata dalla batteria), mentre l'incremento di tensione è per convenzione A' B'.

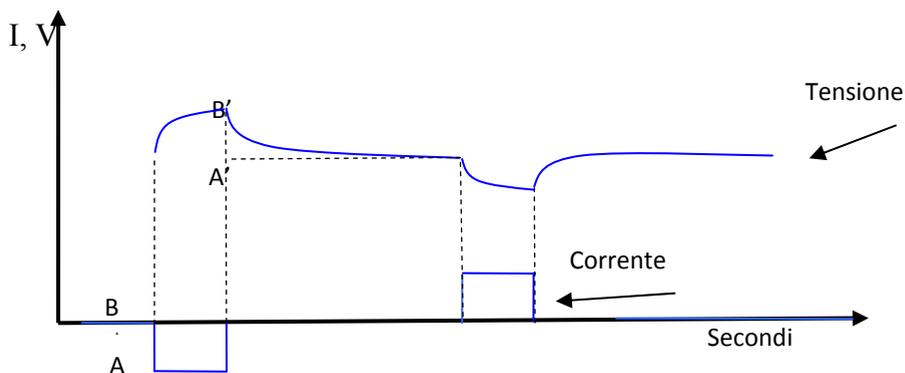


Fig. 12.1 - Prova della resistenza interna della batteria

- a) un impulso di corrente costante sotto forma di un gradino in ingresso della durata di 30 secondi;
- b) una fase di riposo di 180 secondi;
- c) un impulso di corrente in uscita dalla batteria della durata di 30 secondi;
- d) una fase finale di riposo di 180 secondi.

- *Potenza di picco.* Particolarmente importante per verificare l'attitudine della batteria alla trazione. Consiste nell'individuazione della intensità massima di corrente in scarica che può essere tenuta per una durata di 5 secondi senza che la tensione scenda sotto il limite di $2/3$ di quella nominale. Il valore è spesso individuato per approssimazioni successive.
- *Autoscarica.* Monitoraggio della tensione della batteria a riposo per un periodo di tempo variabile da 72 ore ad un mese.
- *Vita ciclica.* Si tratta di un test distruttivo per valutare la durata della batteria. Si fanno eseguire cicli di scarica e carica simili a quelli dell'impiego reale; pur utilizzando apparati automatici ed eliminando i tempi morti la prova risulta sempre molto lunga, almeno di qualche mese. Può essere accelerata operando a temperature più elevate di quelle di normale funzionamento. La condizione di fine prova è in genere raggiunta quando la capacità della batteria scende sotto il 20% di quella iniziale.
- *Rendimento.* Parametro importante e di difficile misura. Si misura il rendimento globale di un processo di scarica e ricarica non potendo distinguere le due fasi. Il valore medio è effettuato eseguendo una scarica completa e di una successiva ricarica. Il rapporto tra la carica erogata e quella assorbita è il rendimento coulombico. Il rapporto tra le rispettive energie è il rendimento energetico.

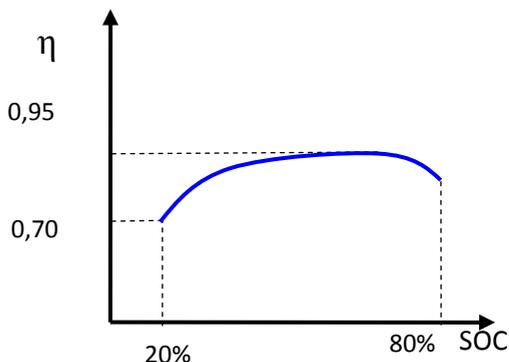


Fig. 12.2 - Misura del rendimento

L'indagine sull'andamento del rendimento in funzione dello stato di carica, qualitativamente riportato in Fig.12.2, si esegue portando la batteria ad un determinato livello di stato di carica, eseguendo una scarica parziale e ripristinando lo stato di carica di partenza. In questo processo è abbastanza facile portarsi al voluto livello di stato di carica di partenza (per esempio partendo da batteria carica) e, nota la sua capacità, scaricare la percentuale voluta della carica. Più difficile è, al momento della ricarica, individuare il momento di raggiungimento dello stato di carica originario per poter fermare la ricarica. Per fare questo ci si avvale di un indicatore che sarà stato preventivamente messo a punto, rappresentato dall'OCV (Open Circuit Voltage), che fornisce con una buona approssimazione lo stato di carica in funzione della tensione a vuoto misurata dopo tre ore di riposo.

12.2 Macchine elettriche

Il motore/generatore elettrico è un componente molto maturo dell'attuale livello di tecnologia, ma il suo impiego specifico nella trazione stradale è ad oggi limitato per la ristrettezza del mercato. Per questo motivo si impiegano motori le cui caratteristiche di funzionamento non sempre sono sufficientemente note, e le prove di caratterizzazione sono quasi sempre necessarie. Le prove a cui si sottopone il motore elettrico sono quelle consuete dei motori elettrici per trazione. Le caratterizzazioni principali sono:

- *caratteristiche meccaniche*: coppia e potenza massima in funzione della velocità di rotazione;
- *caratteristiche elettriche*: corrente massima in funzione della tensione e della velocità;
- *caratteristiche termiche*: temperature di esercizio ed in sovraccarico;
- *rendimenti nei vari punti di funzionamento*, misurati come rapporto tra la potenza meccanica all'albero motore e la potenza elettrica in ingresso;
- *caratteristiche meccaniche ed elettriche nel funzionamento da generatore*, condizione che si verifica durante le frenate a recupero di energia.

12.3 Convertitori di corrente

In un veicolo ibrido esistono sempre uno o più convertitori elettrici in relazione alla necessità di produrre energia elettrica, in genere in corrente alternata, di accumularla in batteria, obbligatoriamente in corrente continua, di utilizzarla nel motore elettrico, in continua o in alternata.

Alcuni convertitori sono di produzione commerciale, a volte forniti a corredo della macchina elettrica come ad esempio gli inverter degli azionamenti elettrici. Altri sono invece dedicati a funzioni tipiche della trazione ibrida ed integrano più funzioni, come innalzamento di tensione, ripartizione di potenze tra più sorgenti, controlli di sicurezza ecc. Per informazioni sui convertitori si rimanda al capitolo dedicato.

12.4 Convertitori di energia primaria

Per i motori a combustione interna e le celle a combustibile si rimanda ai capitoli ad essi dedicati

12.5 Prototipazione

La costruzione di una serie di prototipi è una fase indispensabile del processo di sviluppo del prodotto, un momento di verifica e collaudo del progetto in quanto porta allo stato di materiale realizzazione tutto quanto fino a quel momento era rimasto allo stadio di idea o disegno.

Nel corso della storia realizzativa di un modello i prototipi si susseguono con crescenti gradi di realistica, partendo da semplici oggetti in legno e plastica, fino all'esemplare completo e quasi identico a quello definitivo, permettendo di evidenziare aspetti e problemi altrimenti difficilmente apprezzabili.

Nella costruzione dei veicoli ibridi ai prototipi tradizionalmente intesi si affiancano altre fasi che sono tappe intermedie fondamentali per proseguire efficacemente nella progettazione. Il più importante allestimento provvisorio è quello del cosiddetto "drive train", cioè il complesso degli organi di trazione e di controllo. È infatti nel corso della prova del drive train che vengono affinate alcune scelte in base al comportamento del sistema. Ad esempio l'energia da immagazzinare nell'accumulo può essere ridotta per effetto di una diversa logica di gestione messa a punto in questa fase, oppure può essere necessario intervenire sulla potenza disponibile, o contrastare fenomeni di riscaldamento. In questa fase si valutano in genere le risultanze del drive train per quanto riguarda le prestazioni, il consumo e le emissioni; parimenti importante è la prova di affidabilità.

Caso particolare di prova di un drive train è la sperimentazione "hardware-in-the-loop", con l'impiego del componente reale, ad esempio un accumulo elettrico, in un circuito che per il resto è simulato, fino ad arrivare alla sperimentazione "hardware emulated", dove componenti e sottosistemi sono in maggioranza quelli reali e solo in parte sostituiti da appositi emulatori.

12.5.1 Test del prototipo

Le procedure standardizzate esistenti da utilizzare per il test di un prototipo di veicolo ibrido sono parziali e non coprono tutte le possibili architetture e modi di funzionare dei veicoli ibridi. Negli USA è utilizzata la norma SAE J1711: metodo raccomandato per la misura di emissioni e consumi di veicoli ibridi. In questo standard però non è previsto l'impiego del ciclo ECE 15 che è quello riconosciuto ed adottato in Europa.

In Europa il CEN, Comitato Europeo di Standardizzazione, ha emesso le seguenti normative:

- a) EN 1821-2 Misure di prestazioni per veicoli ibridi termici-elettrici;
- b) EN 1986-2 Misure energetiche per veicoli ibridi termici-elettrici;
- c) EN 13444-1 Misure delle emissioni per veicoli ibridi termici-elettrici.

A livello internazionale, la ISO (International Organisation for Standardisation), ha emesso la norma: ISO 23274 Hybrid-electric road vehicles - Exhaust emissions and fuel consumption measurement - Non-externally chargeable vehicles.

È inoltre in preparazione la corrispondente norma relativa ai veicoli ibridi ricaricabili esternamente.

A livello di regolamenti UN-ECE, è in vigore il regolamento R.101, che riguarda le procedure per la misura dei consumi e delle emissioni dei veicoli delle categorie M1 ed N1 in genere. La revisione 2 - amendment 1, emessa nel 2007 comprende anche i veicoli ibridi-elettrici.

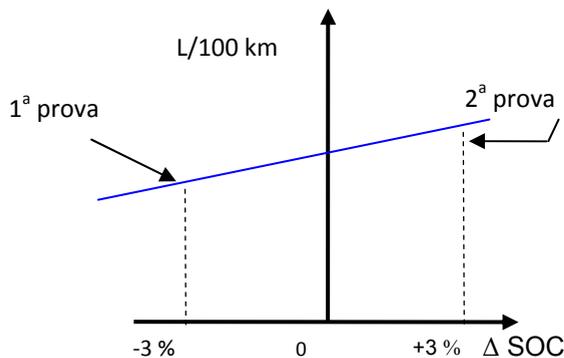


Fig. 12.3

Un problema specifico dei veicoli ibridi nasce dalla esistenza a bordo degli stessi di un accumulo di energia, che a fine prova deve essere nelle stesse condizioni iniziali, per evitare di sovrastimare o sottostimare i consumi. Per ricondursi allo stesso SOC dell'inizio prova, si può operare per interpolazione dei risultati ottenuti in più prove. Se ne riporta il consumo in funzione della variazione di SOC misurate tra inizio e fine prova, e si trova graficamente il valore di consumo per $\Delta SOC = 0$, vedi Fig. 12.3.

La normativa più recente stabilisce infine che gli errori nella stima dello SOC siano resi ininfluenti da una durata della prova tale da renderli molto piccoli rispetto all'energia primaria consumata, il che non è difficile considerando che un solo litro di gasolio o di benzina (12 kWh/kg per il gasolio) ha un contenuto energetico in genere molto maggiore della variazione di qualche punto percentuale dello stato energetico della batteria.

Fanno eccezione gli ibridi "plug-in", dove la ricarica alla rete consente, anzi richiede, la scarica della batteria durante la missione. In questo caso, ovviamente, i consumi di combustibile e quelli elettrici vanno indicati separatamente.

12.6 Esempi di caratterizzazione energetica di un ibrido serie

Il generico schema di veicolo ibrido serie prevede un sistema di gestione del motogeneratore che nella sua forma più semplice può essere manuale. In questo caso il funzionamento è molto semplice e ricade della categoria del controllo predittivo, a catena aperta. Il gestore del veicolo, o il guidatore, può impostare la potenza erogata dal gruppo motogeneratore in funzione della gravosità della missione e può accendere e spegnere il motogeneratore durante la marcia. La necessità di accensione e spegnimento è rappresentata da un indicatore dello stato di carica delle batterie che nella forma più semplice può ridursi ad un voltmetro. Il tutto può essere eseguito in automatico (ed in genere lo è) grazie alle misure in tempo reale dello stato di carica (SOC) delle batterie (Cap. 10). Il veicolo ibrido serie di questo tipo è in genere progettato per l'uso su un determinato ciclo ed è quindi adatto ad un servizio urbano cittadino; la messa in esercizio richiede uno studio preliminare di ottimizzazione delle procedure di gestione in funzione della missione. Il gestore del veicolo in questione infatti, a differenza di chi conduce un veicolo tradizionale, si trova a dover effettuare alcune scelte per utilizzare nel modo migliore il mezzo.

Ad esempio:

- potenza da selezionare al gruppo motogeneratore,
- percentuale di accensione del motogeneratore sul tempo totale,
- livello medio di carica da tenere in batteria,
- ricarica notturna o in viaggio.

Un programma di prove per un ibrido come sopra descritto può pertanto prevedere l'esecuzione non già di una unica prova ma bensì di un set di prove, dal momento che sarà opportuno testare il comportamento e il consumo del sistema a tutte le potenze possibili per il motogeneratore e a tutti gli stati di carica plausibili per la batteria, o almeno tra il 20% e il 90% di SOC. Prove di caratterizzazione di un ibrido serio del tipo sopra descritto hanno permesso ad esempio di dimostrare quanto segue:

- Il migliore valore di potenza cui impostare il caricabatterie e quindi l'intero motogeneratore è la potenza più vicina alla richiesta media del ciclo, considerando in essa i rendimenti dei vari componenti a valle del motogeneratore ed il recupero in frenata. Tale valore è in effetti una funzione del ciclo cinematico da seguire e delle caratteristiche del veicolo.
- Il rendimento del processo di carica e scarica della batteria influenza fortemente i consumi. Sono da evitare livelli di carica molto alti (SOC superiore all'80%) che portano, nel caso di batterie al piombo, a dissipare circa metà dell'energia legata ai transitori di potenza. I migliori livelli di SOC sono tra il 30% e l'70%.
- Infine, assolutamente da evitare è incorrere nella necessità di dover ricaricare le batterie tramite il motogeneratore a veicolo fermo.

Per illustrare con un esempio reale i tipici fenomeni di scambio di energia tra i componenti di un sistema di trazione ibrido si fa riferimento al caso di un veicolo ibrido serie di 3500 kg di massa motorizzato con motore primo diesel Lombardini da 1200 cc, alternatore da 220 V, 11 kVA, batterie 192 V, 70 Ah C₅, motore di trazione in continua 192 V, 22 kW. Il ciclo di percorrenza è l'ECE 15 limitato alla parte urbana.

Lo schema riportato in Fig. 12.4 è , per semplicità, privo della componente assorbita per alimentare gli ausiliari di bordo. La durata della prova (1 ora) è sufficiente a rendere minimo l'errore inevitabile sulla stima della variazione dello stato energetico della batteria. Nel caso in esame il flusso netto di potenza verso il motore di trazione è pari a $7251 \text{ W} - 1379 \text{ W} = 5872 \text{ W}$ e tiene conto del recupero in frenata, mentre quello lordo, 7251 W, rappresenta la potenza elettrica in ingresso al motore necessaria ad equilibrare il complesso delle resistenze al moto.

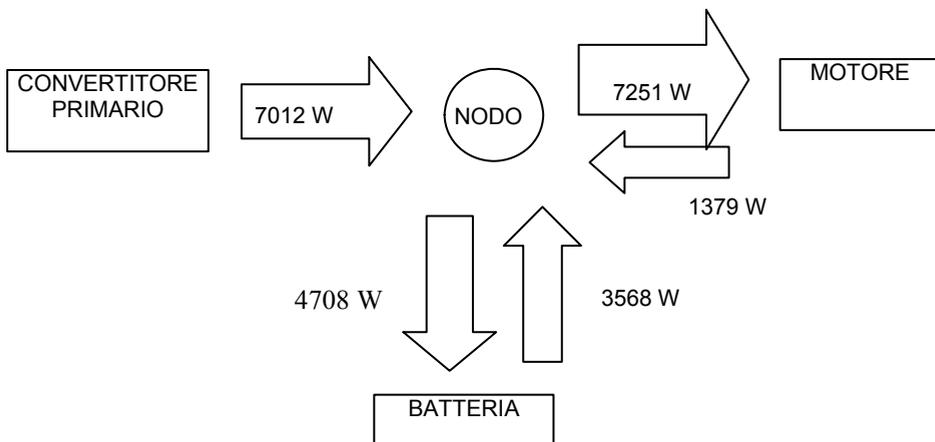


Fig. 12.4

Corrisponde perciò, a meno del rendimento dell'azionamento e della trasmissione, alla potenza meccanica trasformata in trazione ed è uguale a quello che si avrebbe in un mezzo convenzionale non ibridizzato, ad esempio in un diesel-elettrico.

La differenza, rispetto ad un diesel-elettrico, è data dalla batteria, che è sede di perdite ed il cui livello energetico è soggetto a variazioni durante la prova, per effetto dei flussi di potenza da e verso la stessa.

Il flusso netto di potenza verso la batteria, $4708 \text{ W} - 3568 \text{ W} = 1140 \text{ W}$, dà luogo all'incremento del livello energetico della stessa, espresso dall'aumento dello stato di carica (SOC), a meno delle perdite legate ai processi di carica e scarica.

Si possono meglio dettagliare, alla luce delle considerazioni fatte, i flussi di potenza tra le due sorgenti e l'accumulo, tenendo presente che in frenata la potenza può convogliarsi solo verso la batteria, il cui flusso in ingresso può perciò essere separato nella componente proveniente dal generatore e quella recuperata in frenata.

Dopodiché si può dividere il flusso uscente dal generatore nella componente diretta al motore e quella diretta alla batteria. In definitiva si ottiene il grafico in Fig. 12.5. Risulta pertanto che nel caso rappresentato solo il 52 % della potenza di 7012 W in uscita dal generatore durante il ciclo, cioè 3683 W , va direttamente al motore di trazione senza passaggi intermedi.

Ciò, insieme ad altri fenomeni dissipativi come i transistori, è causa di inefficienze e di perdite che potrebbero essere di molto ridotte gestendo il sistema più accuratamente.

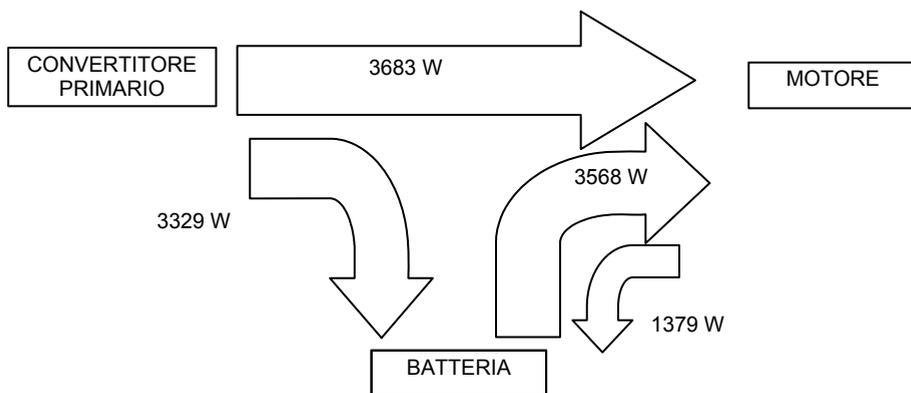


Fig. 12.5

È utile a questo proposito introdurre un parametro che misura il rendimento del sistema, tenendo conto del complesso dei fenomeni sopra indicati, e che consente così di valutare il sistema di generazione ibrido dal punto di vista energetico. Chiameremo naturalmente tale parametro “Rendimento di generazione ibrida” o più semplicemente “Rendimento di ibridazione”.

12.7 Rendimento di generazione ibrida

Il rendimento del sistema di generazione ibrido per una data missione si può esprimere come rapporto tra l'energia fornita al motore elettrico, al lordo di quella recuperata durante le frenate¹, ed il contenuto energetico del gasolio utilizzato dal motogeneratore, considerando pure, con il giusto segno, l'eventuale variazione dello stato di carica e quindi del livello energetico delle batterie.

Poiché tale rendimento è peculiare per i sistemi ibridi e, per lo stesso veicolo, cambia al variare del ciclo, perché cambia l'energia recuperabile in frenata, può essere chiamato “rendimento di generazione ibrida del sistema di trazione per la missione considerata” e risulta dato dall'espressione:

$$\eta_{\text{ibrid}} = E_{\text{ele}} / (E_{\text{comb}} - K * \Delta \text{SOC})$$

K è un opportuno un fattore di conversione, prima di tutto delle unità di misura per rendere coerente il percento di stato di carica con una energia.

Ma non solo: limitandosi a questo, infatti, ci troveremmo a sommare al denominatore grandezze concettualmente non coerenti. Infatti, seppure entrambe energie, sono relative a momenti diversi del processo di trasformazione dal combustibile al movimento, e quindi il loro peso sul consumo globale di energia primaria è diverso. L'energia accumulata in batteria per effetto della variazione dello stato di carica (ΔSOC) è più “pregiata” di quella del combustibile, perché disponibile a valle di un processo durante il quale l'energia chimica viene trasformata in energia elettrica (direttamente disponibile al motore di trazione). Per cui se, alla fine delle prove, l'energia in batteria è diminuita ($\Delta \text{SOC} < 0$) avrò usato per la trazione non solo l'energia del combustibile ma anche una parte dell'energia originariamente accumulata in batteria. Tale energia è proporzionale alla variazione dello stato di carica e il fattore di conversione (K) tiene conto non solo delle unità di misura, ma anche del rendimento di generazione dell'elettricità e del rendimento di carica della batteria.

Nel caso della prova utilizzata come esempio, conoscendo la durata pari a 1,57 ore, con un consumo di 3,99 kg di gasolio ed un incremento dello stato di carica della batteria dell'1,5%, risulta che:

¹ 7251 Wh nel caso in oggetto. Si ricorda che la durata della prova rappresentata è stata di 1 ora, per cui i valori numerici della potenza e dell'energia corrispondono.

- il coefficiente K vale circa 560 Wh per ogni punto percentuale di variazione del SOC ²;
- l'energia utilizzata per la trazione è: 7251 W x 1,57 h = 11.384 Wh;
- il consumo di energia primaria (per il gasolio : 43,3 MJ/kg \cong 12.000 Wh/kg) è 47.880 Wh;
- l'energia accumulata in batteria è: 560 Wh/1% x 1,5% = 840 Wh, espresso in consumo di energia primaria equivalente.

Nel caso in esame il rendimento di ibridazione risulta pari a:

$$\eta_{\text{ibrid.}} = 11384 / (47880 - 840) = 0,242$$

Tale valore è minore del rendimento medio del generatore più il convertitore AC/DC (~26%) perché tiene conto dei flussi di potenza verso la batteria e quindi delle perdite, ma maggiore del rendimento medio di un diesel-elettrico nelle stesse condizioni, grazie al funzionamento ottimizzato del termico ed al recupero in frenata.

Il rendimento di ibridazione così definito è naturalmente variabile con la missione, così come lo è il rendimento di propulsione dei veicoli convenzionali, che passa da valori minimi (< 0,13) nell'uso cittadino a valori massimi (>0,20) nell'uso autostradale. Nell'ibrido, però, per una stessa missione ed ovviamente con lo stesso veicolo, il rendimento di ibridazione cambia anche in funzione della strategia di gestione adottata, passando da un valore minimo se il sistema non è controllato, a valori più alti con l'introduzione di un controllo. Il suo valore dipende infatti oltre che dai rendimenti individuali dei sottosistemi "generazione" ed "accumulo", anche dal loro modo congiunto di funzionamento. Questi sottosistemi devono perciò essere gestiti da un sistema di controllo con l'obiettivo di rendere minime le perdite complessive.

In un veicolo ibrido pertanto il rendimento totale di propulsione, definito come rapporto tra l'energia meccanica (alle ruote) spesa nelle fasi di accelerazione (positiva e negativa) e di marcia a velocità costante³, e l'energia totale del combustibile impiegato, si può esprimere come:

$$\eta_{\text{tot}} = E_{\text{mecc}} / E_{\text{comb}} = \eta_{\text{ibrid}} \cdot \eta_{\text{trasm}} \cdot \eta_{\text{mot.ele}}$$

² L'equivalente energetico di una variazione dell'1% del SOC vale: 0,01x 70 Ah x 202 V = 140 Wh. Produrre ed immagazzinare in batteria 140 Wh con i rendimenti indicati costa 140 Wh/0,25 = 560 Wh in termini di energia primaria.

³ È quindi un rendimento medio, perché tale è per definizione il rendimento di ibridazione.

Poiché l'impiego di batterie e/o di sistemi di accumulo pone sempre numerosi problemi, che derivano dalle limitate informazioni disponibili su aspetti essenziali come:

1. il comportamento della batteria, tipicamente noto sulla base di scarse e lacunose informazioni date dal costruttore sulla base di prove che quasi mai sono rappresentative del suo reale utilizzo;
2. gli effetti di taluni parametri (potenza, profondità di scarica, sovraccarica, temperatura) sulla vita utile;
3. la frequente indisponibilità di algoritmi affidabili per il rilievo dello stato di carica, che è indispensabile ad una corretta gestione;

l'effettuazione di prove "hardware-in-the-loop" con il calcolo del rendimento di ibridazione risulta molto utile nello studio dei flussi di potenza dei sistemi ibridi, al fine della messa a punto delle più adeguate strategie di controllo.

12.8 La sperimentazione su strada

Le prove su strada sono quelle finali e richiedono che la vettura sia in perfetto ordine, specie per quanto riguarda gli organi di guida, freni ecc.

La strada può essere intesa come un circuito privato escluso al traffico oppure nel senso più ampio di vera strada di uso cittadino. È chiaro che nel secondo caso occorre rispettare tutte le esigenze di legge (immatricolazione, tasse di circolazione, assicurazione) richieste dal codice della strada.

La vettura è in genere dotata di qualche sistema di misura e di registrazione delle prestazioni, che può andare da un semplice giornale di bordo in cui annotare le percorrenze e i fatti rilevanti ad un sistema automatico computerizzato di acquisizione di dati. Solo qualche anno addietro una vettura sperimentale in prova veniva strumentata con un corredo complesso ed ingombrante di sensori e apparati. La sua gestione era spesso problematica e la possibilità di guasti, interferenze, errori e malfunzionamenti era alta.

Attualmente il modo migliore di eseguire misure su una vettura è quello di attingere ai dati dei numerosi sensori ormai sempre presenti sui moderni modelli, installati in fabbrica per migliorare sempre più la risposta della centralina di iniezione, gli apparati antinquinamento e quelli di sicurezza. I dati sono disponibili tramite la presa diagnostica (ODB) e sono leggibili con interfacce e protocolli standardizzati attraverso software dedicati.

Più difficoltosa rimane tuttora la misura degli inquinanti emessi allo scarico, anche perché si tratta ormai di concentrazioni bassissime. Le strumentazioni esistenti sono ancora pesanti ed ingombranti e riescono a stento ad essere montati a bordo.

Più della concentrazione è importante misurare la quantità in massa di inquinanti emessa per km di percorrenza; per fare questo si passa dalla conoscenza delle concentrazioni alle quantità assolute misurando la portata in massa di gas al tubo di scarico.

Le specie oggetto di misura sono almeno CO, NO_x, HC. La CO₂ può essere valutata dal consumo di carburante o misurata direttamente (E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505, Addendum 100; Regulation No.101). Il particolato può essere grossolanamente monitorato con strumenti ottici che rivelano l'opacità del gas, oppure deve essere raccolto su appositi filtri per essere poi trattato in laboratorio (pesatura, rilievo della composizione granulometrica, analisi della natura della polvere).

Bibliografia

- [1] G. Pede, E. Rossi, R. Vellone, R. Giglioli, M. Ceraolo, "Esperienze di controllo e studi di ottimizzazione energetica per un veicolo ibrido serie" RT/2002/4/IDROCOMB ENEA
- [2] E. Wakefield, "History of Electric Automobile" SAE/ISBN 0-7680-0125-0, 1998
- [3] HS-3000 "On-Board Diagnostics for Light and Medium Duty Vehicles Standards Manual" SAE 2003 edition
- [4] F. Villatico, A. Alessandrini, F. Orecchini, F. Ortenzi, E. Rossi, "Drive-stile emission testing on the latest two Honda Hybrid technologies", Presented at the International Conference on Transport and Environment: A global challenge Technological and Policy Solutions Milan, Italy 19-21 March 2007 organised jointly by the DG-JRC together with Regione Lombardia
- [5] F. Ortenzi, R. Ragona, F. Villatico Campbell, F. Zuccari, "Experimental measurements of the environmental impact of a Euro IV vehicle in its urban use", SAE 2007-01-0966
- [6] A. Alessandrini, F. Filippi, F. Orecchini, F. Ortenzi, "A new method for collecting vehicle behaviour in daily use for energy and environmental analysis", Proc. IMechE Vol. 220 Part D: J. Automobile Engineering

Parte IV

Approfondimenti metodologici e progettuali

CAPITOLO 13

I MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA NEI VEICOLI IBRIDI: ESEMPI APPLICATIVI

Leone Martellucci, Enrico Sciubba

Università di Roma "La Sapienza"

13.1 Esempio di interventi praticabili su di un motore di piccola cilindrata per propulsore ibrido

Quanto esposto nel Capitolo 5 relativamente ai motori a c.i. rappresenta una sintetica disamina dello stato dell'arte, in alcuni settori cruciali, della tecnica motoristica, e dimostra come siano effettivamente disponibili -e già sufficientemente industrializzate- diverse tecnologie che permettono un adattamento "strutturale" dei motori a c.i. ai sistemi di propulsione ibridi.

Si vuole qui portare ad esempio uno studio che si propone di verificare, a mezzo di simulazioni, la possibilità di ridurre il consumo specifico di combustibile di un motore monocilindrico a quattro tempi di 125 cm³, destinato ad un sistema di propulsione ibrido, sia serie che parallelo.

In una simile ottica, le varie strategie descritte nei precedenti paragrafi (riconosciuta, per i motivi sopra menzionati, la non praticabilità di alcune soluzioni) possono tornare comunque utili per ricavare interessanti indicazioni sui possibili interventi da attuare.

In particolare, dal punto di vista della riduzione del consumo di combustibile, il parametro che più ha una influenza diretta su tale voce è, come visto, il rapporto aria-combustibile. In tal senso risulta essere molto vantaggiosa sia la possibilità di operare con elevati valori A/F, sia la possibilità di controllare tale rapporto.

La stratificazione della carica è una interessante soluzione che permette, in corrispondenza di alcune condizioni operative, di elevare il valore del rapporto aria-combustibile. Tuttavia essa presuppone l'adozione di un sistema di iniezione diretta di combustibile, il che la rende una soluzione non attuabile su motori quali quelli cui il presente studio è interessato.

Per aumentare la magrezza della miscela senza ricorrere all'iniezione diretta su di un motore esistente di piccola cilindrata, alcuni interventi possibili sono:

- l'aumento del rapporto volumetrico di compressione
- il rivestimento della camera di combustione con materiali catalitici
- l'impiego di un pistone dalla forma modificata
- l'aumento dell'energia del sistema di accensione.

Relativamente al primo punto, l'importanza dell'incremento del rapporto volumetrico di compressione è stata riconosciuta, ovviamente, anche nel paragrafo in cui si parlò dei sistemi che consentono di adattare r alle condizioni operative del motore. Tale intervento deve essere praticato compatibilmente con l'assenza del manifestarsi del fenomeno della detonazione, particolarmente pericoloso per la durata del propulsore.

Per quanto attiene alla modifica del pistone, questo si ritiene praticabile su un motore esistente nei limiti in cui non richieda una modifica del manovellismo, né tanto meno della camera di combustione.

Relativamente alla possibilità di controllare il rapporto A/F, ammettendo che il motore base sia dotato di un tradizionale carburatore, la sostituzione dello stesso con un sistema di iniezione indiretta o con un carburatore a controllo elettronico appaiono entrambe delle strade perseguibili.

Per quanto riguarda i dispositivi EGR, simili sistemi sono attualmente utilizzati anche su unità di piccole dimensioni. Tuttavia, qualora il motore di partenza non sia dotato di un sistema di ricircolo dei gas di scarico, attuare a posteriori tale intervento non appare conveniente soprattutto perché le modalità con cui attualmente tale strategia viene praticata (ricircolo dei gas con basse portate) sono rivolte, non tanto alla riduzione dei consumi, quanto alla riduzione degli inquinanti.

Come riconosciuto precedentemente, la fasatura della distribuzione ha una influenza molto marcata sulle prestazioni che il dato propulsore offre. È stata inoltre ribadita più volte, su motori di piccole dimensioni, la non praticabilità di soluzioni volte a variare la fasatura in funzione del numero di giri e/o del carico. Per contro, la modifica dell'albero a camme appare un intervento sicuramente praticabile su un motore già esistente. Si può ad esempio pensare di modificare il profilo delle camme modificando, mediante opportune lavorazioni meccaniche, l'albero della distribuzione originale o realizzandone direttamente un nuovo.

È bene tuttavia far osservare che l'apportare in sicurezza dei cambiamenti che alterino il profilo delle camme dovrebbe richiedere, in ogni caso, uno studio progettuale a monte, in cui siano stati valutati gli effetti che le modifiche stesse hanno, dal punto di vista dinamico, su tutti gli organi della distribuzione.

Sempre con riferimento alla fasatura della distribuzione, un ulteriore intervento che il tecnico può praticare è quello di modificare gli angoli di apertura e/o di chiusura delle valvole, mantenendo inalterata la durata e l'alzata, cioè lasciando i profili delle camme immutati. Si tratta in sostanza di modificare la posizione relativa dell'albero della distribuzione rispetto all'albero motore.

Tale tipo di intervento è pertanto molto più semplice rispetto a quello che prevede un'alterazione del profilo delle camme. Si deve però anche dire che, così procedendo, le possibilità di modificare il comportamento del propulsore sono minori.

In particolare nel caso in cui il monocilindro sia dotato di due valvole e di un unico albero a camme, le variazioni dell'angolo di fase lato aspirazione e scarico non sono indipendenti.

Nelle testate a quattro valvole, ormai utilizzate anche su piccoli motori, lo sdoppiamento dell'albero della distribuzione consente invece più ampi margini di intervento. In questo modo si può tentare ad esempio di ridurre le perdite di pompaggio incrementando l'anticipo della apertura della valvola di scarico rispetto al punto morto inferiore, e di migliorare il riempimento del cilindro, ritardando la chiusura della valvola di aspirazione.

Quello che lo sperimentatore può aspettarsi è pertanto un miglioramento della prestazione in studio (ad esempio il consumo specifico) in corrispondenza di un certo intervallo, più o meno limitato, del campo di variabilità del numero di giri del motore. Tale guadagno, però, può essere pagato con uno scadimento dei valori che la grandezza in esame assume in corrispondenza di diverse velocità di rotazione del motore, o con il peggioramento di altri parametri, quali ad esempio la potenza massima, l'erogazione, gli inquinanti ecc..

Procedendo in questo modo è quindi poco probabile che il tecnico riesca a perseguire dei miglioramenti, relativamente alle varie voci qualificanti le prestazioni del motore (consumo, potenza, coppia ecc.), su tutto il suo arco di utilizzo. In un sistema ibrido, al contrario, l'area di funzionamento è molto più circoscritta, e questa ottimizzazione diventa possibile.

Le medesime considerazioni possono, ovviamente, farsi anche quando si praticano tipologie di intervento diverse come, per esempio, quando si agisce sulla geometria dei sistemi di aspirazione e di scarico.

Per quanto attiene gli interventi sul sistema di aspirazione e di scarico, le eventuali modifiche, apportate dal tecnico, devono essere effettuate, innanzitutto, nel rispetto dei vincoli geometrici del motore originale. Il variare le dimensioni delle valvole e delle rispettive sedi, dei diametri e delle lunghezze dei vari collettori e condotti, cui detti sistemi si compongono, rappresentano delle possibili strade che il ricercatore può percorrere nel tentativo di migliorare le modalità con cui il processo di sostituzione della carica si manifesta in seno al motore. Così agendo, infatti, si può modificare in maniera anche importante il valore del coefficiente di riempimento.

Considerazioni analoghe a quelle svolte parlando della fasatura della distribuzione possono essere fatte circa l'importanza delle capacità dello sperimentatore di effettuare le giuste scelte di compromesso e circa l'importanza di disporre di dati relativi a studi simili.

Si vogliono qui presentare i risultati di una ottimizzazione svolta a massimo carico nell'intera gamma di regimi di rotazione ammessi dal motore. Le grandezze su cui si è intervenuto sono state: rapporto volumetrico di compressione (r), fasatura distribuzione (cam), diametro interno della valvola di aspirazione ($d_{i,a}$), diametro interno della valvola di scarico ($d_{i,s}$), diametro condotto

di aspirazione (d_a), diametro condotto di scarico (d_s), lunghezza collettore di aspirazione ($l_{c,a}$), lunghezza tubo di scarico ($l_{t,s}$).

Dall'indagine svolta è emerso che le grandezze più significative in termini di consumo medio sono: lunghezza del collettore di aspirazione, fasatura della distribuzione, rapporto volumetrico di compressione e diametro del condotto di aspirazione.

In Tab. 13.1 sono riportati i valori di tutte le variabili considerate con i nuovi valori suggeriti dalla simulazione; in grassetto sono evidenziate proprio le grandezze più significative. Le rimanenti variabili, invece, non hanno una influenza apprezzabile sul consumo specifico di combustibile.

Nel modello modificato è stata diminuita la lunghezza del collettore di aspirazione, nel tentativo di ridurre le perdite di carico all'aspirazione e limitare gli effetti negativi connessi con il riscaldamento della carica fresca. Il diametro del condotto di aspirazione è, invece, rimasto inalterato, rispetto al modello base, in quanto è emerso che il valore originale di tale parametro è quello che consente i consumi minori alle basse velocità.

Inoltre, sempre per privilegiare il comportamento del motore alle basse velocità, è stata adottata una fasatura della distribuzione caratterizzata da un periodo di incrocio minore rispetto al motore base. È infatti noto che fasature "strette" tendono ad ottimizzare il consumo ai bassi regimi, anche se sono penalizzanti in termini di potenza soprattutto agli alti.

Nel modello modificato è stato anche diminuito il ritardo di chiusura della valvola di aspirazione, per limitare i fenomeni di riflusso della carica fresca, dal cilindro verso il condotto di aspirazione, che sovente si manifestano alle velocità minori. È stato inoltre aumentato leggermente il rapporto volumetrico di compressione ed il valore della lunghezza del tubo di scarico.

Quest'ultimo intervento è stato praticato con lo scopo di favorire la depressione nel cilindro ad opera dell'inerzia delle colonna fluida che fluisce nel condotto, e ridurre il lavoro di espulsione dei gas.

Tab. 13.1 - Modello base e modello modificato del motore a c.i.

| <i>Fattore</i> | <i>Modello base</i> | <i>Modello Boost modificato</i> |
|-----------------------------|---------------------|---------------------------------|
| <i>r</i> | 11,00 | 11,50 |
| $d_{i,a}$ | 28,30 mm | 28,30 mm |
| $d_{i,s}$ | 22,60 mm | 22,60 mm |
| d_a | 26,00 mm | 26,00 mm |
| d_s | 22,60 mm | 22,60 mm |
| Cam | Cam base | Cam modificata |
| $l_{c,a}$ | 167 mm | 110 mm |
| $l_{t,s}$ | 950 mm | 1050 mm |

Tab. 13.2 - Consumo specifico del modello base e del modello modificato del motore a c.i.

| | <i>Modello base</i> | <i>Modello modificato</i> | $\Delta (C_s)$ |
|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| <i>n [giri/min]</i> | <i>C_s [g/kWh]</i> | <i>C_s [g/kWh]</i> | - |
| 1500 | 268,19 | 226,52 | -15,5% |
| 2000 | 257,15 | 221,00 | -14,0% |
| 2500 | 249,58 | 219,04 | -12,2% |
| 3000 | 241,6 | 222,80 | -8,0% |
| 3500 | 252,61 | 236,35 | -6,4% |
| 4000 | 272,63 | 249,71 | -8,4% |
| 4500 | 287,36 | 355,03 | +23,0% |

Lo studio condotto ha dimostrato che, effettivamente, gli interventi apportati consentono una riduzione del consumo specifico nel campo di velocità che va dai 1200 ai 3500 giri/min (Tab. 13.2). Al di sopra dei 3500 giri/min si registra, invece, un incremento significativo del consumo rispetto al modello base del motore a c.i.. Il guadagno in termini di consumo si accompagna poi ad una riduzione della coppia e della potenza su tutto l'arco di funzionamento del propulsore, la qual cosa, nell'ottica di un impiego del motore in un sistema propulsivo ibrido, appare comunque accettabile.

In conclusione si può quindi affermare che i sistemi di propulsione ibridi permettono di conseguire un doppio vantaggio in termini di consumo specifico; tale vantaggio è dovuto innanzitutto alla presenza di una o più macchine elettriche che coadiuvano il motore termico per la trazione, cui si affianca una ulteriore possibilità di miglioramento dell'efficienza del motore a c.i., dovuta proprio alla "atipica" modalità di funzionamento del motore stesso.

Per la configurazione ibrido parallelo qui proposta, ad esempio, si consegue una riduzione del 20% per il solo fatto di adottare la configurazione ibrida, cui si somma una possibile ulteriore riduzione di circa il 10% dovuta alla ottimizzazione (ottimizzazione peraltro non caratterizzata da interventi motoristici impegnativi) del motore termico.

13.2 Principi generali di progettazione di un ibrido-turbogas ¹

Il progetto di un sistema di trazione ibrido-turbogas presenta degli aspetti particolari che richiedono un approccio multi-disciplinare. Essenziale per un corretto dimensionamento anche preliminare è la simulazione dei flussi energetici nel sistema, basata sul calcolo della potenza istantanea che gli organi di propulsione devono erogare per soddisfare la richiesta alle ruote, in funzione della velocità e dell'accelerazione desiderate per il veicolo.

¹ Per i riferimenti bibliografici si rimanda al Capitolo 5.

Sia questa simulazione, sia la procedura progettuale che la segue, non sono nè semplici nè totalmente “algoritmiche”, perché già calcolare i flussi di potenza tra i componenti presuppone una scelta della configurazione di accoppiamento. Anche altre scelte progettuali influenzano sostanzialmente il risultato: il tipo di vettura (utilitaria, berlina mid-class, sportiva, transporter), il grado di ibridizzazione (rapporto tra la potenza del motore termico e quella totale installata), il tipo di motorizzazione (un motore elettrico centrale, un motore su ogni asse, o quattro motoruote), la missione del veicolo (urbano, extra-urbano, all-round), il tipo di controllo (turbogas regolato on-off, sempre acceso o in load-following) ed altri ancora sono tutti da scegliere preliminarmente, in base a decisioni strategiche del progettista o a decisioni di marketing del committente. Ci limiteremo qui a fornire i principi-guida della procedura di progetto. Lo schema di riferimento è quello illustrato in Fig. 13.1.

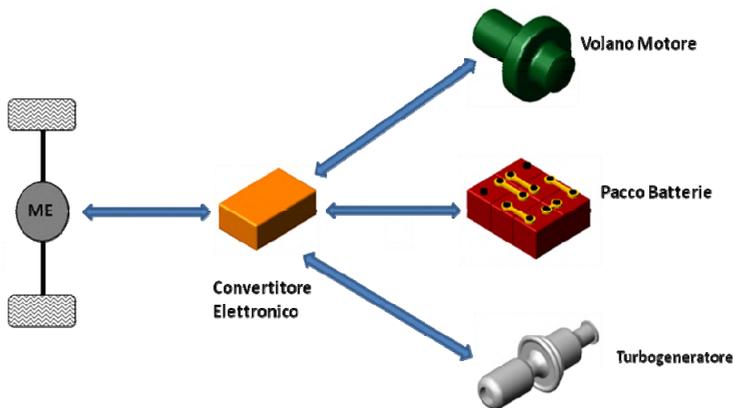


Fig. 13.1 - Schema di un TG-ibrido serie con accumulatore ausiliario

13.2.1 La simulazione dei flussi energetici nel sistema

Come passo preliminare, è necessaria un’analisi dinamica del veicolo, che valuti le resistenze aerodinamiche, di rotolamento, d’inerzia e di pendenza, in modo da poter convertire il tracciato della velocità in quello della potenza richiesta durante la corsa del veicolo: è buona regola considerare più di un tipo di missione (ciclo ECE, ciclo misto ECE+extra-urbano, cicli-tipo ricavati su basi statistiche come quello della California o quello giapponese) e testare poi il modello in modo da cercare un compromesso operativo “ottimale”.

Una volta calcolata la $P_R(t)$ su tutto il periodo sul quale si vuole simulare il modello, le equazioni di bilancio istantaneo sono le seguenti (potenze >0 propulsive, <0 se frenanti):

$$P_R(t) = \alpha P_M(t) * \eta_{trasmissione} + (1-\alpha) * P_M(t) / \eta_{trasmissione} \quad (1)$$

$\alpha=1$ in funzionamento propulsivo, e $\alpha=0$ in frenata (quando $P_{ruote} < 0$)

$$P_{EL}(t) = \alpha P_M(t) / \eta_M + (1-\alpha) * P_M(t) * \eta_A \quad (2)$$

dove η_M ed η_A sono i rendimenti del motore reversibile nei due modi di funzionamento

$$P_B(t) + P_G(t) + P_{EL}(t) + P_{ACC}(t) = 0 \quad (3)$$

$$P_G(t) = P_{TG}(t) * \eta_{mec1} * \eta_G \quad (4)$$

Si hanno 4 equazioni in 6 incognite ($P_B, P_G, P_{EL}, P_{ACC}, P_M, P_{TG}$) = 0, e quindi i gradi di libertà del progetto sono due. Si noti che le equazioni sono non lineari, perchè i rendimenti sono a loro volta funzioni della potenza: è però ragionevole assumere che le curve $\eta(P)$ siano note con sufficiente approssimazione anche in fase di progetto preliminare.

Le due equazioni ausiliarie necessarie per rendere risolvibile il sistema sono ricavate da due considerazioni progettuali:

a) il pacco batterie ha una propria “equazione caratteristica”, che lega la P_B sia erogata che assorbita allo stato di carica (SOC) della batteria stessa. Rimandando ai riferimenti 3 e 4 del Capitolo 5 per un’analisi più dettagliata, si può quindi scrivere:

$$P_B(t) = f[\text{SOC}(t)] \quad (5)$$

Si vede quindi come la soluzione del sistema dipenderà dalle condizioni iniziali, perchè risulta ovviamente:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t=0) + \int_0^t \text{SOC}(\tau) d\tau \quad (6)$$

Dato che per le batterie commercialmente disponibili, la $f(\text{SOC})$ vale 0 sia al di sotto di un certo limite SOC_{\min} che al di sopra di un limite superiore SOC_{\max} , la condizione (5) introduce una ulteriore non linearità nel calcolo.

b) Nota la P_R , la P_{EL} e la P_M sono da essa direttamente calcolabili, ed essendo la P_G funzione della P_{TG} , le incognite residue nella (3) sono P_{TG} e P_{ACC} . Per P_{ACC} vale un’equazione caratteristica simile alla 5, ed un termine “di memoria” simile alla (6):

$$P_{ACC}(t) = f[E_{ACC}(t)] \quad (7)$$

$$E_{ACC}(t) = E_{ACC}(t=0) + \int_0^t E_{ACC}(\tau) d\tau \quad (8)$$

Occorre considerare che la funzione dell’accumulatore ausiliario è esclusivamente quella di assorbire eccessive potenze in frenata (che la batteria non può assorbire se è vicina al massimo SOC) e di erogare potenza in situazioni di emergenza (accelerazioni improvvise con SOC prossimo al limite inferiore). E quindi in definitiva la soluzione del problema è possibile se si fornisce un’equazione indipendente per P_{TG} . Questo viene fatto specificando la “strategia di controllo” del turbogruppo, cioè la logica della centralina di controllo VMU. Sono possibili tre soluzioni:

1) “Always On”: il TG opera a punto fisso per tutta la durata della missione. La potenza $P_{TG}(t)$ è quindi costante, e serve a ricaricare la batteria (ed eventual-

mente l'accumulatore). Questa soluzione implica la scelta di un bassissimo grado di ibridizzazione. L'equazione ausiliaria è:

$$P_{TG}(t) = P_{TG0} \quad (9)$$

2) "On/Off": il TG viene acceso o spento a seconda delle condizioni di utilizzazione istantanee. La logica di gestione è espressa da un set di condizioni non lineari del tipo:

```

FOR (each t)
IF <PTG(t) = 0 AND <PR(t)>0> AND <[SOC(t)-PB(t)*Δt]< SOCmin> THEN
    <PTG(t+Δt )> = PTG0
    ELSE <PTG(t+Δt )> = 0

```

Questa soluzione richiede una potenza maggiore del TG installato (e quindi un grado di ibridizzazione superiore a quello del caso precedente), ma sottopone il turbogruppo a severe sollecitazioni di transitorio, che ne diminuiscono il MTBF (Mean Time Between Failures).

1) "Load Following": il TG opera a punto variabile, mantenendosi però in un intorno abbastanza stretto (80-110%) del punto nominale. La variabile di controllo è in questo caso il SOC: il TG si accende se il SOC(t) è prossimo al proprio limite inferiore e $P_R > 0$, ed eroga una potenza P_{TG-LF} calcolata dalla (4) ponendovi $P_B(t) = P_{ACC}(t) = 0$

```

FOR (each t)
    IF <PR(t)>0> AND <[SOC(t)-PB(t)*Δt ]< SOCmin>
    THEN <PTG(t+Δt )> = PTG-LF

```

Una opportuna serie di regole simili imporrà che il turbogruppo si spenga in fase di decelerazione o a veicolo fermo, se il SOC ha raggiunto il livello massimo ammesso.

Questa soluzione risulta meno gravosa per il turbogruppo, perchè i gradienti termici causati dalla variazione della potenza non sono elevati. Ne peggiora tuttavia il rendimento istantaneo (figura 5.12), e può richiedere un intervento più frequente dell'accumulatore ausiliario se la P_R richiesta è maggiore di P_{TG} o se quella assorbita è maggiore della P_B .

Dalle precedenti considerazioni appare chiaro come potrebbe essere conveniente -dal punto di vista della gestione dei flussi energetici- suddividere la PTG su due (o più) turbogruppi: per esempio, un secondo turbogas si potrebbe accendere se il $SOC(t) \approx SOC_{min}$ e se $PR(t) > P_{TG-1}$, e la P_{TG-2} sarà ricavata dalla (4) includendovi anche la P_{TG-1} . Il secondo turbogas si spegnerà, se il $SOC \approx SOC_{max}$ e se $PR(t) < P_{TG-1}$.

Una simile soluzione presenta ovvi vantaggi di rendimento, perchè limita il campo di funzionamento di entrambi i turbogruppi, ma introduce complicazioni costruttive e porta a soluzioni impiantistiche più costose.

13.2.2 Il progetto di massima di un gruppo turbogas per un veicolo ibrido

A seguito delle considerazioni svolte nel paragrafo precedente, è abbastanza semplice giungere ad una definizione preliminare delle specifiche di un turbogruppo per applicazioni di trazione ibrida. Rimandando ai riferimenti bibliografici 4 e 5 del Capitolo 5 per una discussione più dettagliata, si può qui affermare che:

a) la temperatura di ingresso turbina (TIT) è il parametro di progetto più importante. Un suo aumento permette di innalzare il rapporto di compressione ottenendo migliori rendimenti, ma richiede – se si superano i 1300 °K – l'adozione di leghe speciali per le palette statoriche e rotoriche della turbina. Occorre considerare che, per macchine di piccole dimensioni (tipicamente, per queste applicazioni si parla di 5-50 kW), un raffreddamento delle palette non è economicamente praticabile;

b) Il rapporto di compressione “ottimale” ricavabile dall'analisi del ciclo Brayton reale rigenerato con una TIT=1300 °K ed un grado di rigenerazione $R=0,75$ vale circa 5, e quindi non può essere ottenuto con un compressore radiale monostadio. A meno di non optare per più complesse e costose configurazioni bistadio con interrefrigerazione, si deve quindi accettare un $\beta \approx 3-4$, che porta a rendimenti reali di ciclo abbastanza bassi (inferiori allo 0,2-0,25);

c) in macchine di piccola potenza, il rendimento di combustione assume valori inferiori rispetto a quelli ottenibili in impianti di potenza elevata: l'isolamento termico diventa più problematico, le geometrie sono dettate da problemi di ingombro, i tempi di permanenza sono inferiori. Particolare cura dovrà quindi essere dedicata alla progettazione termo-fluidodinamica della camera di combustione e del rigeneratore;

d) In macchine di piccola potenza, i ridotti Re causano un inevitabile calo del rendimento di stadio, e risulta pertanto illusorio specificare η_c superiori a 0,7-0,75 ed η_t superiori a 0,8. È quindi preferibile progettare il turbogruppo ad hoc per l'impiego di trazione ibrida anziché adattarne uno disegnato per altre applicazioni;

e) se la logica scelta per la VMU è del tipo load-following, è opportuno ridurre il calo di rendimento in condizioni off-design abbinando al throttling del combustibile la variazione dell'angolo di calettamento delle palette statoriche della turbina, con conseguente riposizionamento dinamico di una opportuna palettatura IGV all'ingresso del compressore: in tal modo si può ridurre la portata di gas nel gruppo TG, spostando il punto operativo sulla mappa delle turbomacchine verso punti con minore *derangement* del rendimento.

Si riportano in Tab. 13.3 le specifiche di due turbogrupperi impiegati in applicazioni TG-ibride: il primo è un TG Elliott TA-45 mentre il secondo è un TG progettato *ad hoc* per un'applicazione ibrida.

Tab. 13.3 - Specifiche di due turbogruppi per applicazioni di trazione ibrida

| | <i>Elliott TA-45</i> | <i>TG LETHE</i> | |
|----------------|----------------------|-----------------|--------|
| P, kW | 45 | 11 | 4 |
| n, giri/min | 116000 | 117000 | 150000 |
| β_{comp} | 4.3 | 4.3 | 4.3 |
| TIT, °K | 1215 | 1300 | 1300 |

13.2.3 Matching tra compressore e turbina

Il matching di turbina e compressore per velocità angolari variabili presenta non poche difficoltà, specie se si vuole limitare il degrado del rendimento in condizioni di funzionamento off-design.

Le curve caratteristiche del compressore e della turbina sono in genere presentate in forma adimensionale e normalizzata, cioè rapportando tutti i valori dei parametri di interesse ad un valore di riferimento -in genere, quello di progetto.

Curve caratteristiche “tipiche” di una turbina sono riportate nella Fig. 13.2. I pedici 3 e 4 si riferiscono alle sezioni di ingresso ed uscita turbina. Analoghe caratteristiche di un “tipico” compressore sono riportate in Fig. 13.3.

Il match ai rispettivi punti nominali è ovvio: le due velocità angolari devono essere uguali, il β del compressore deve essere leggermente superiore a quello della turbina per compensare le perdite nel rigeneratore e nel combustore. Per condizioni off-design, il matching va ricalcolato tramite un bilancio energetico iterativo eseguito a partire dalle mutate condizioni in turbina: si ottengono curve parametrizzate con TIT/T₁ del tipo di quelle sovrainposte a tratteggio in Fig. 13.3.

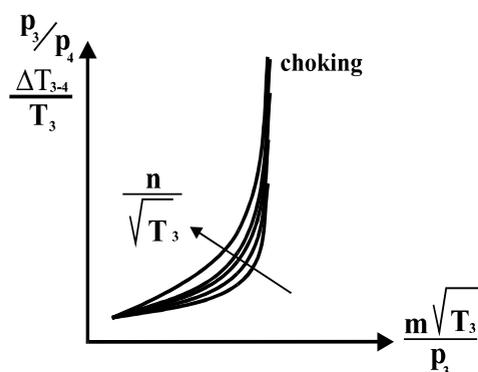


Fig. 13.2 - Curve caratteristiche della turbina

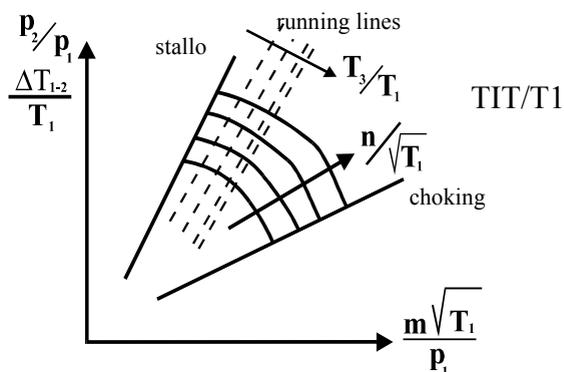


Fig. 13.3 - Curve caratteristiche del compressore

Si osservi come, a velocità di rotazione costante, ad un abbassamento di questo rapporto (causato da una riduzione della portata del combustibile in camera di combustione) corrisponda una diminuzione del rapporto di compressione β ed un conseguente calo di rendimento. Se il turbogruppo è regolato in load-following, i valori dei rendimenti istantanei vanno calcolati sulla base di mappe di matching come quella ora illustrata.

13.3 Il veicolo ibrido serie con turbogas LETHE

Sulla base dei principi generali discussi nel Capitolo 5 ed adottando i correnti metodi di progettazione per il turbogruppo e per gli altri componenti, è possibile redigere un progetto preliminare di un veicolo ibrido serie con turbogruppo motore. Si riporta qui a titolo di esempio un progetto sviluppato presso l'Università di Roma 1 La Sapienza, denominato Low Emission Turbo-Hybrid Engine (LETHE).

Sulla base delle specifiche del veicolo riportate in Tab. 13.4 e delle procedure per i bilanci energetici discusse nel paragrafo 13.2.1, si sono dapprima ricavate le curve della potenza richiesta alle ruote (P_R) per due cicli standard, quello *ECE15 urbano*, conosciuto anche come UDC, Urban Driving Cycle, caratterizzato da una velocità max di 50 km/h (Figura 13.5), e quello *EUDC extraurbano* (Extra-Urban Driving Cycle) caratterizzato da una velocità massima di 120 km/h (Fig. 13.6).

A titolo illustrativo, si riportano nelle Figg. 13.7 e 13.8 le curve della P_R nei due cicli.

Con procedure analoghe, sono state ipotizzate e confrontate varie configurazioni che differivano per la presenza o meno di un volano ausiliario e per la potenza dei turbogas.

Tab. 13.4 - Specifiche del veicolo LETHE

| | | | |
|---|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Raggio rotolamento | $r = 0,265 \text{ m}$ | Coefficiente di rotolamento | $f = 0,015$ |
| Larghezza veicolo | $b = 1,70 \text{ m}$ | Massa veicolo | $m = 1550 \text{ kg}$ |
| Altezza veicolo | $h = 1,40 \text{ m}$ | Massa Equivalente del veicolo | $M_e = 1600 \text{ kg}$ |
| Coefficiente di forma | $\phi = 0,90$ | Accelerazione di gravità | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ |
| Sezione frontale effettiva | $S_f = 2,142 \text{ m}^2$ | Densità dell'aria | $\rho = 1,180 \text{ kg/m}^3$ |
| Coefficiente di resistenza aerodinamica | $c_x = 0,25$ | Temperatura aria esterna | $T = 300 \text{ K}$ |

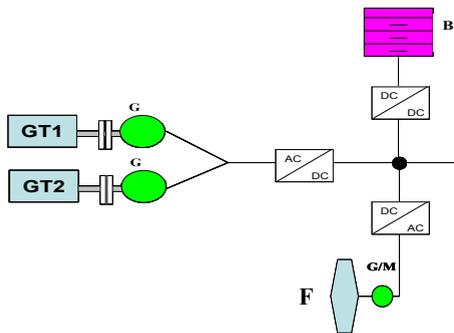


Fig. 13.4 - Schema del sistema propulsivo LETHE

GT1, GT2: turbogruppi
 G: generatore elettrico
 M: motore elettrico
 B: pacco batterie
 F: volano
 DC/AC: inverter

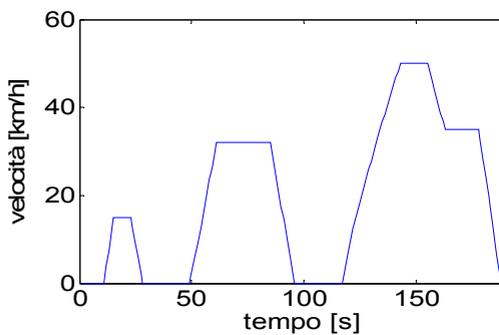


Fig. 13.5 - Il ciclo urbano ECE 15

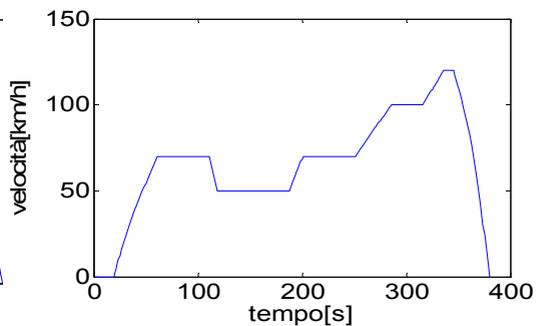


Fig. 13.6 - Il ciclo extra-urbano EUDC

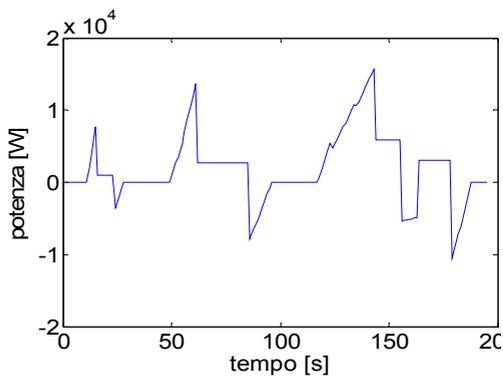


Fig. 13.7 - Potenza richiesta alle ruote nell'ECE

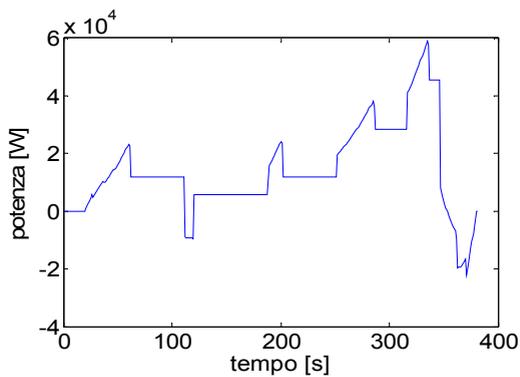


Fig. 13.8 - Potenza richiesta alle ruote nell'EUDC

I consumi migliori sono stati ottenuti con la configurazione descritta in Tab. 13.1 (con l'aggiunta di 90 kg di batterie e 3 kg di volano meccanico) e con una logica "Load Following": per un veicolo rispondente alle specifiche illustrate in Tab. 13.4, il LETHE raggiunge 29,3 km/l in missione esclusivamente urbana e 18,5 km/l in extra-urbana.

A differenza degli ibridi con motore a c.i. a 4 tempi, il consumo extra-urbano è qui maggiore, perché è praticamente assente il recupero in frenata ed i gruppi TG, pur operando a punto fisso, hanno un rendimento globale minore di un motore a c.i. corrispondente.

Un'analisi preliminare dei costi, a moneta costante 2006, indica un costo stimato (comprensivo di oneri finanziari, di manutenzione e consumi) di circa 5000 €/anno per una percorrenza di 20.000 km/anno in modalità mista (1/3 urbano, 2/3 extra-urbano): tale valore è paragonabile a quello (4000-5000) di auto di pari segmento a motorizzazione tradizionale, e di poco inferiore a quello dei "concorrenti" ibridi (5500-7000).

13.2 Conclusioni sull'auto "ibrida-turbogas"

Gli studi effettuati hanno dimostrato la fattibilità tecnica di un'auto del tipo ibrido serie con turbogas: il progetto appare fattibile sia dal punto di vista tecnologico sia da quello economico. L'effettivo "customer appeal" di un veicolo TG-Hybrid dipende però sostanzialmente da quanto vengono "penalizzate" le emissioni: se continua il trend attuale, già dall'Euro 5 la convenienza pratica ed economica di una tale configurazione potrà compensare i maggiori costi d'acquisto. Le possibilità di ulteriore miglioramento delle prestazioni (*range*, accelerazione, velocità max) e della guidabilità dipendono non dalla parte termica, ma dall'elettronica e dalle batterie: ricerche applicative in questi due campi sono perciò utili a sviluppi futuri dell'ibrido-TG.

È probabile che le prime applicazioni debbano essere sviluppate per applicazioni particolari, come ad esempio il trasporto pubblico su corsie preferenziali, che, grazie a percorsi più o meno fissi e con richieste di potenza statisticamente identiche tra una corsa e l'altra, limiterebbe la gestione del TG in off-design e porterebbe a consumi più ridotti. Si tenga presente che la potenza da installare come turbogas su un autobus di linea urbana si aggira sui 100 kW, e che in questo campo di potenze esistono soluzioni commerciali a rendimento abbastanza alto che potrebbero essere facilmente adattate al funzionamento come propulsore ibrido.

Ma anche applicazioni all'altra estremità dei campi di potenze installate sono ipotizzabili: si pensi ad esempio ad una moto ibrida in cui il TG abbia solo la funzione di *range extender*: i consumi elevati di un piccolissimo turbogruppo (potenza installata di circa 1 kW) sarebbero irrilevanti di fronte al beneficio di evitare le ricariche da colonnina elettrica.

La preannunciata disponibilità commerciale di batterie con potenza ed energia specifica maggiori rispetto a quelle attuali è ovviamente un'esigenza primaria, in quanto porterebbe ad un alleggerimento del pacco necessario, o – a parità di massa del pacco batterie – ad una maggiore autonomia elettrica del veicolo.

Esiste anche la possibilità di installare accumulatori elettrici (supercondensatori) invece del volano meccanico: i due sistemi in pratica si equivalgono come prestazioni, e saranno considerazioni commerciali ad influenzare le scelte dei costruttori.

Restano invece da approfondire i problemi di sicurezza posti sia dalla tipologia intrinseca della configurazione (elevatissime velocità di rotazione del turbogruppo, alti valori di tensioni e correnti in gioco, presenza di batterie in zone di possibile impatto, disposizione della motorizzazione elettrica sulla vettura), sia dalla mancanza di normativa specifica in materia.

Prove di crash sia in simulatore sia su modello sono senz'altro indispensabili.

Non sono ipotizzabili invece problemi di stabilità, in quanto l'erogazione di potenza da parte delle motoruote non è "bruciante" (quindi il pattinamento è una ipotesi abbastanza remota), il differenziale elettronico ha ottime caratteristiche di anti-skid e di ETC, ed il baricentro del veicolo può essere molto vicino al piano di carico inferiore; inoltre, la distribuzione dei pesi può essere regolata dal progettista secondo le proprie esigenze strutturali, dinamiche o semplicemente estetiche e funzionali.

CAPITOLO 14

SISTEMI CON TRASMISSIONE A ROTISMO EPICICLOIDALE

Massimo Ceraolo

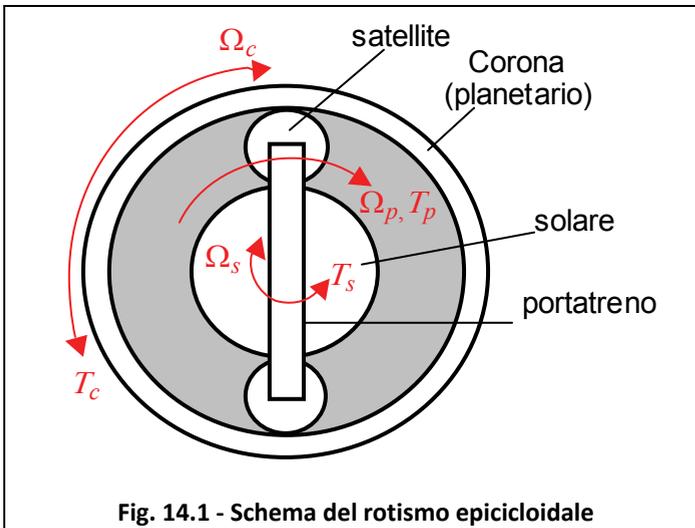
Università degli Studi di Pisa

14.1 Rotismo epicicloidale di riferimento

In taluni sistemi propulsivi di veicoli ibridi, anche di grande successo¹ sono stati utilizzati sistemi di trasmissione del moto alle ruote facenti uso di rotismi epicicloidali.

Nei rotismi epicicloidali i perni delle ruote sono accoppiati a un membro rigido, detto portatreno, che può a sua volta ruotare attorno a un asse. Le ruote i cui assi sono mobili per effetto della rotazione del portatreno sono detti satelliti.

Fra le tante tipologie possibili di rotismi epicicloidali, di particolare importanza per applicazione su veicoli ibridi è quello rappresentato in Fig. 14.1, che verrà preso a riferimento nel prosieguo della trattazione.



I satelliti fungono da ruote oziose all'interno del dispositivo e servono da collegamento fra solare, corona, e portatreno. Nella figura ne sono rappresentati solo due, ma essi possono essere in numero maggiore senza che le equazioni ricavate nel prosieguo del paragrafo perdano di validità.

¹ Non si può non citare l'autovettura Toyota Prius, che vanta più di un milione di esemplari venduti, giunta ormai alla sua terza generazione ed eletta "auto dell'anno 2005". Il relativo drive-train è stato eletto "Motore dell'anno" per il 2004, 2005, 2006.

Nel caso di veicoli ibridi la soluzione più importante riguarda la connessione del portatreno al convertitore primario (motore a combustione interna), e la corona all'albero condotto, direttamente connesso alle ruote motrici. Il solare viene invece connesso ad una macchina elettrica ausiliaria di cui si discuterà diffusamente nel seguito.

Con semplici considerazioni geometriche si può ricavare la seguente relazione fra le velocità angolari dei vari elementi del rotismo (misurate rispetto ai riferimenti riportati in figura):

$$\Omega_c = (1 + \sigma)\Omega_p - \sigma\Omega_s \quad (1)$$

essendosi indicato con σ il rapporto fra il numero di denti di solare e corona (o equivalentemente fra i rispettivi raggi dei cerchi primitivi): $\sigma = z_s / z_c$. Evidentemente la (1) può essere riscritta ponendo a primo membro una qualunque delle tre velocità angolari: note quindi due velocità, si ricava immediatamente la terza:

$$\Omega_s = (1 + \rho)\Omega_p - \rho\Omega_c \quad (2)$$

$$\Omega_p = \frac{1}{1 + \sigma}\Omega_c + \frac{1}{1 + \rho}\Omega_s \quad (3)$$

dove si è posto $\rho = 1/\sigma$.

Il rapporto fra la velocità angolare di uscita Ω_c e quella di ingresso Ω_p dipende quindi dalla velocità angolare del solare Ω_s . Agendo su quest'ultimo si può quindi modificare il rapporto di trasmissione fra ingresso e uscita, ottenendo così un sistema di trasmissione che realizza un rapporto di trasmissione variabile con continuità, purché si provveda il solare di un dispositivo in grado di controllarne la velocità angolare.

Se si trascurano le inerzie e gli attriti presenti all'interno del rotismo, si possono ricavare con estrema facilità anche le seguenti relazioni fra le coppie applicate al rotismo:

$$\begin{cases} T_s = \sigma T_c \\ T_p = (1 + \sigma)T_c \end{cases} \quad (4)$$

essendo T_c , T_s e T_p le coppie agenti dall'esterno su corona, solare e portatreno rispettivamente, misurate in senso antiorario le prime due e orario la terza.

Queste relazioni consentono di individuare T_s e T_p nota T_c ; in generale nota una qualunque delle tre coppie si individuano univocamente le altre due; infatti è:

$$\begin{cases} T_c = \rho T_s \\ T_p = (1 + \rho) T_s \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} T_c = \frac{1}{1 + \sigma} T_p \\ T_s = \frac{\sigma}{1 + \sigma} T_p \end{cases} \quad (6)$$

L'insieme di (1) e (4) costituisce un sistema di tre equazioni che legano fra loro 6 grandezze (le tre coppie e le tre velocità angolari). In particolare dalle (4) si ha che nota una qualunque delle tre coppie si ricavano immediatamente le altre due mentre dalla (1) che note due velocità angolari si ricava la terza. Pertanto una maniera semplice per definire il punto di funzionamento del rotismo è fissare attraverso azioni esterne una delle tre coppie e due delle tre velocità angolari.

Per quanto riguarda le relazioni fra le potenze che il rotismo scambia con il mondo esterno, considerando convenzionalmente positivo il verso della potenza entrante nel portatreno e uscente dal solare e dalla corona, si ha, evidentemente:

$$P_p = T_p \Omega_p \qquad P_s = T_s \Omega_s \qquad P_c = T_c \Omega_c$$

Utilizzando le (1) e (4) si verifica la neutralità energetica del rotismo, alla base delle equazioni ricavate:

$$P_c = (1 + \sigma) \Omega_p T_c - \sigma \Omega_s T_a = \Omega_p T_p - \Omega_s T_s = P_p - P_s$$

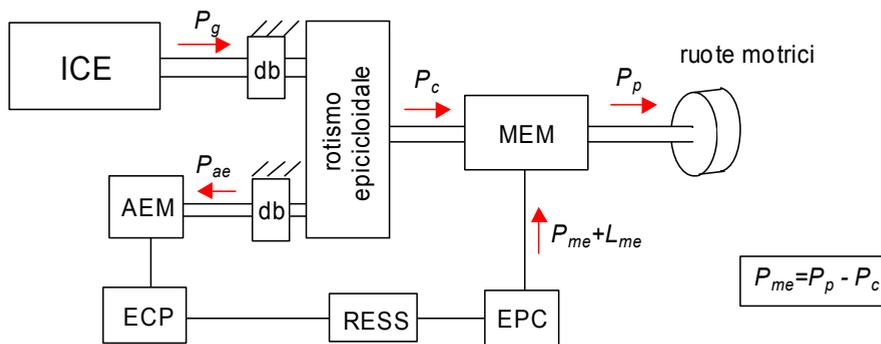
14.2 Drive train ibrido basato sul rotismo considerato

Uno schema importante di veicolo ibrido, detto spesso di tipo serie-parallelo, utilizzando il tipo di rotismo epicicloidale discusso nel precedente paragrafo, è mostrato in Fig. 14.2.

Si può osservare la presenza di due macchine elettriche: una, detta macchina elettrica principale (MEM), di maggior potenza, una seconda, detta macchina elettrica ausiliaria (AEM), di minor potenza con compiti di gestione della velocità angolare del motore a combustione interna.

Sia la macchina elettrica principale che quella ausiliaria, e i relativi convertitori di alimentazione, sono reversibili e possono quindi funzionare da generatore o da motore; peraltro, siccome nel funzionamento più frequente la MEM funziona da motore e la AEM da generatore, in taluni testi sono per l'appunto dette rispettivamente motore e generatore.

In figura sono riportati anche i dispositivi di blocco meccanico "db" sull'albero del motore a combustione interna e della AEM utilizzabili per marcia puramente elettrica e funzionamento ibrido parallelo standard rispettivamente.



AEM= Macchina elettrica Ausiliaria PEM= Macchina elettrica Principale
 db= dispositivo di blocco meccanico

Fig. 14.2 - Schema di drive train di veicolo ibrido complesso basato su rotismo epicicloidale

Legenda degli acronimi (usati anche nel resto del capitolo)

- EG Electric Generator (*generatore elettrico*)
- EM Electric Machine (*macchina elettrica*)
- Eng Engine (*motore meccanico*)
- LOE Level Of Energy (*Livello Energetico*)
- EPC Electric Power Converter (*convertitore di potenza elettrica*)
- MEM Main Electric Machine (*macchina elettrica principale*)
- AEM Auxiliary Electric Machine (*macchina elettrica ausiliaria*)

Se la coppia di stallo del motore a combustione interna è sufficientemente elevata il dispositivo di blocco sul suo asse può essere omesso.

Una configurazione particolarmente interessante è quella che associa nel rotismo la AEM al solare, il motore a combustione interna al portatreno, alla corona l'albero che, previa interposizione della MEM, porta potenza alle ruote.

Con queste connessioni le scelte dei versi di riferimento di coppie e potenze effettuate nel precedente paragrafo appaiono maggiormente giustificate: si fa infatti riferimento alla normale condizione di trazione del veicolo, in cui la potenza del motore a combustione interna è entrante nel rotismo, mentre sono uscenti le altre due potenze. Si considerino ancora le equazioni (1) e (4), riscritte evidenziando le connessioni esterne del rotismo:

$$\Omega_p = (1 + \sigma)\Omega_g - \sigma\Omega_{ae} \quad (7)$$

$$\begin{cases} T_{ae} = \sigma T_c \\ T_g = (1 + \sigma)T_c \end{cases} \quad (8)$$

Queste relazioni mostrano che, note le grandezze di uscita T_c e Ω_c sussiste una indeterminazione sulle velocità angolari di ingresso. Essa viene risolta mettendo in gioco le equazioni dinamiche del sistema, come verrà fatto nel seguito.

L'indeterminazione sulle velocità angolari di ingresso fa sì che il rotismo possa efficacemente sostituire il cambio di velocità e la frizione:

- quando il veicolo è fermo, $\Omega_c=0$, e si può trasmettere coppia dalla AEM al motore a combustione interna (secondo le nostre convenzioni nelle equazioni sopra riportate tutte le coppie saranno negative), amplificandola del fattore $1+\rho$; questa coppia deve permanere finché il motore a combustione interna non raggiunge la velocità di accensione;
- quando il motore a combustione interna è acceso esso può arrivare subito a velocità di buon rendimento anche a basse velocità del veicolo. La AEM può infatti compensare le variazioni di velocità secondo la (15), funzionando da generatore e fornendo quindi energia in batteria; al crescere delle velocità del veicolo la Ω_{ae} richiesta per mantenere Ω_g a valori ottimali si riduce, fino ad arrivare a $\Omega_{ae}=0$, a quel punto è possibile bloccare attraverso un freno meccanico il rotore della AEM e far funzionare il veicolo come un normale veicolo ibrido parallelo, funzionante, per così dire "con la marcia lunga" (minimo rapporto di riduzione fra motore e ruote);²

Fuori dell'avviamento è possibile far funzionare il veicolo secondo varie modalità:

- *assistenza elettrica alla propulsione*: la MEM contribuisce a fornire coppia propulsiva; in questa modalità di funzionamento non tutta la potenza assorbita dalla MEM va a scaricare l'accumulo, in quanto è contemporaneamente attiva la AEM come generatore;
- *frenatura elettrica a recupero*: la MEM assorbe coppia e potenza dall'albero di trasmissione; se la AEM viene mantenuta disalimentata, il motore a combustione interna rallenta fino a raggiungere eventualmente velocità nulla, altrimenti può essere prevista anche una piccola coppia di scambio che possa mantenere il motore a combustione interna in rotazione a velocità limitata;
- *propulsione puramente elettrica*: è possibile far funzionare il veicolo alle basse velocità con propulsione puramente elettrica fornendo potenza alla MEM ed eventualmente scambiando potenza anche con la AEM, mantenendo bloccato il motore a combustione interna. Raggiunta una velocità limite, oltre la quale la MEM non ha potenza sufficiente per le necessità della propulsione, si può, tramite le (8) trasferire coppie negative al motore a combustione interna per l'avviamento; naturalmente si ha coppia negativa anche all'albero condotto su cui è calettata la MEM che contribuirà, assieme all'inerzia del veicolo, all'avviamento del motore a combustione interna;

² In alternativa si può operare la AEM come motore e continuare a mantenere sotto rigido controllo la Ω_{ce} ; questa possibilità non è però messa in conto, per semplicità, nel prosieguo della trattazione. Pertanto secondo questo approccio durante la fase di trazione la AEM opererà sempre come generatore, e come motore durante il rilascio.

- *altre modalità*. In casi particolari è possibile usare altre modalità, ad esempio la modalità a AEM bloccata, nel qual in tal caso il rotismo epicicloidale realizza un rapporto di trasmissione fisso e il veicolo si comporta come un normale veicolo ibrido parallelo.

Come si vede da queste pur semplici note introduttive, i veicoli ibridi con rotismo epicicloidale presentano rispetto ai normali veicoli di tipo parallelo il vantaggio di non richiedere un cambio di velocità, in quanto un'opportuna gestione del rotismo consente di far funzionare il motore a combustione interna in campi di velocità per esso accettabili; questa funzione è però fornita a costo di una maggior complessità del sistema, e dalle perdite connesse con una certa circolazione passiva di energia elettrica: ad esempio anche nella marcia normale un convertitore elettronico (quello della AEM) è interessato da flusso di potenza; e durante l'assistenza elettrica alla propulsione una macchina converte potenza da elettrica a meccanica, mentre l'altra opera nel senso opposto, nel senso cioè di drenare potenza meccanica per convertirla in elettrica. Può infine capitare in taluni punti di funzionamento che la MEM funzioni da generatore e la AEM da motore; in tal caso si ha una situazione particolarmente svantaggiosa dal punto di vista energetico in quanto parte dell'energia generata dal motore a combustione interna viene convertita in potenza elettrica dalla MEM e poi nuovamente in meccanica dalla AEM, creando un flusso di energia, per così dire, "circolare", che comporta considerevoli perdite ed ha il solo scopo di consentire al rotismo epicicloidale di operare nel punto di lavoro considerato.

Si osserva infine che questo schema consente di realizzare sia funzioni tipicamente realizzabili con drive train ibridi di tipo parallelo (ad esempio la marcia con il solo motore a combustione interna) sia quelle realizzabili tipicamente con i drive train di tipo serie (ad esempio la selezione, a parità di potenza erogata, di coppia e velocità angolare prodotte dal motore a combustione interna).

14.3 Elementi per la gestione energetica

Si consideri ancora lo schema dell'azionamento propulsivo riportato in Fig. 14.2, ma evidenziando questa volta anche il ruolo del sistema di gestione energetica.

Si ottiene la situazione rappresentata schematicamente in Fig. 14.3, dove con $T'_{ea}*$ e $T'_{ep}*$ si sono indicati i valori desiderati delle grandezze T'_{ea} e T'_{ep} , coppie elettromagnetiche generate da AEM e MEM, T'_{ea} , in particolare è differente in condizioni non stazionarie dalla coppia T_{ea} che è quella che la AEM scambia con il rotismo.

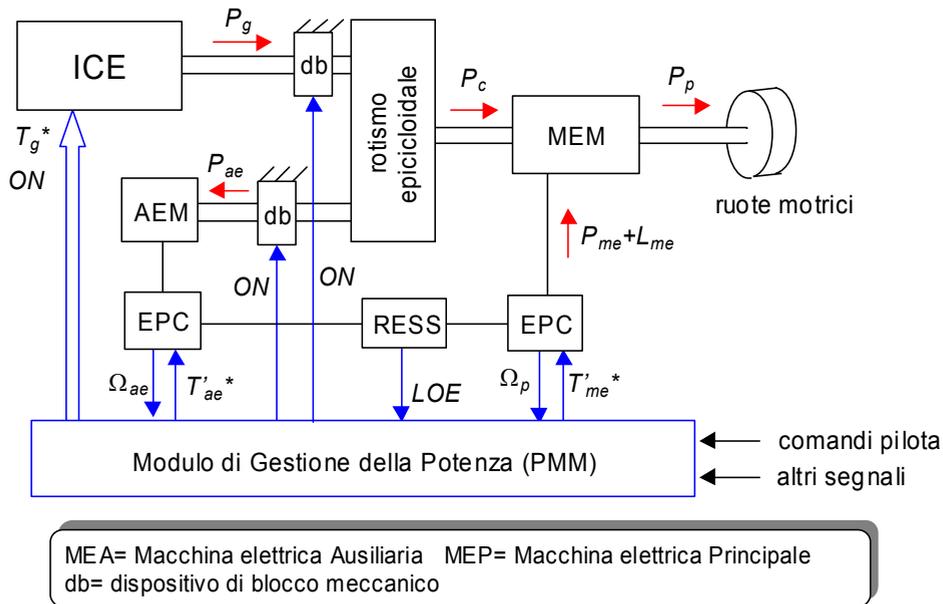


Fig. 14.3 - Schema di Fig. 14.2, con evidenziazione del ruolo del PMM, in versione semplificata

Come si vede, il PMM deve gestire in maniera ottimizzata ben tre dispositivi, i quali interagiscono attraverso il rotismo epicicloidale: AEM, MEM e motore a combustione interna. Ad essi si aggiunge il freno meccanico della AEM necessario quando si vuole evitare che essa scambi potenza on il sistema, e che viene attivato quando diviene attivo il segnale denominato "ON".

Nella maniera con cui lo schema è costruito il PMM determina i valori desiderati delle coppie elettromagnetiche delle macchine elettriche, la potenza meccanica generata dal motore a combustione interna, l'eventuale attivazione di freno meccanico per il bloccaggio del rotore della AEM, e l'eventuale spegnimento del motore a combustione interna.

Per omogeneità di lettura con il resto del presente documento, appare interessante rappresentare sinteticamente (in Fig. 14.4) la gestione energetica di questo tipo di veicolo in maniera analoga a quanto effettuato nella Fig. 10.7 (Capitolo 10), relativa agli schemi serie e parallelo.

In realtà il sistema con rotismo epicicloidale si presta un po' meno ad una descrizione con questo tipo di schemi, per la maggior varietà di scelte possibili. Inoltre il rotismo epicicloidale crea una forte interrelazione fra le grandezze meccaniche (coppie, velocità), ad esso afferenti e quindi il controllo dell'assieme deve essere strettamente integrato, e non si può demandare ad esempio al motore a combustione interna il disaccoppiamento della potenza richiesta P_g^* in coppia e velocità.

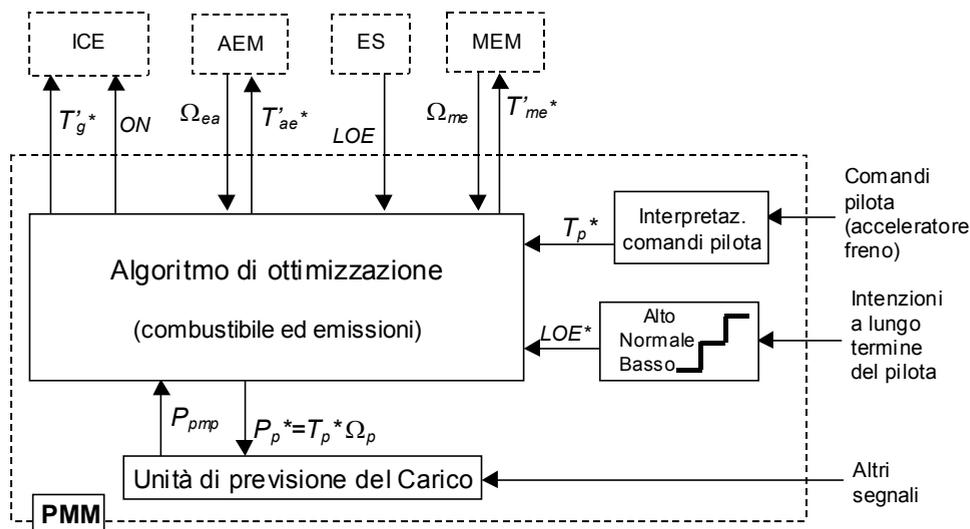


Fig. 14.4 - Schema mostrante i principali flussi di informazioni all'interno del PMM e fra il PMM e il mondo esterno in sistemi dotati di rotismo epicicloidale

Uno schema analogo a quelli mostrati in Fig. 10.7 nel Capitolo 10, seppur meno esplicito, può essere ad esempio quello riportato in Fig. 14.4. Per la conoscenza delle velocità angolari sono sufficienti due misure, e può essere conveniente effettuarle attraverso la misura di grandezze elettriche all'interno degli azionamenti presenti: questa scelta è riportata nello schema di figura.

Come da convenzioni adottate sopra, le coppie T sono considerate agenti sul rotismo e misurate rispetto a riferimenti equiversi con i riferimenti delle corrispondenti velocità angolari nel caso di portatreno e corona, controverso nel caso del solare, in modo che i riferimenti positivi delle potenze sono quelli riportati nelle precedenti Figg. 14.2 e 14.3.

Il significato delle coppie riportate in figure è il medesimo delle potenze di pari pedice riportate nelle Figg. 14.2 e 14.3.

La strutturazione interna del blocco "algoritmo di ottimizzazione" è funzione di particolari scelte progettuali su cui non ci si sofferma in maniera esaustiva.

Comunque sia, l'algoritmo di ottimizzazione, evidentemente, dovrà ragionare internamente in termini di potenze, e poi convertire le potenze in richieste di coppie. A titolo di esempio in Fig. 14.5 una possibile soluzione che implementa l'ottimizzazione energetica imponendo la velocità angolare ottimale al motore a combustione interna, e le coppie alle due macchine elettriche.

Questa scelta è particolarmente significativa in questo documento in quanto presenta interessanti analogie con la logica raffigurata in Fig. 10.8 relativa al drive train di veicolo ibrido serie.

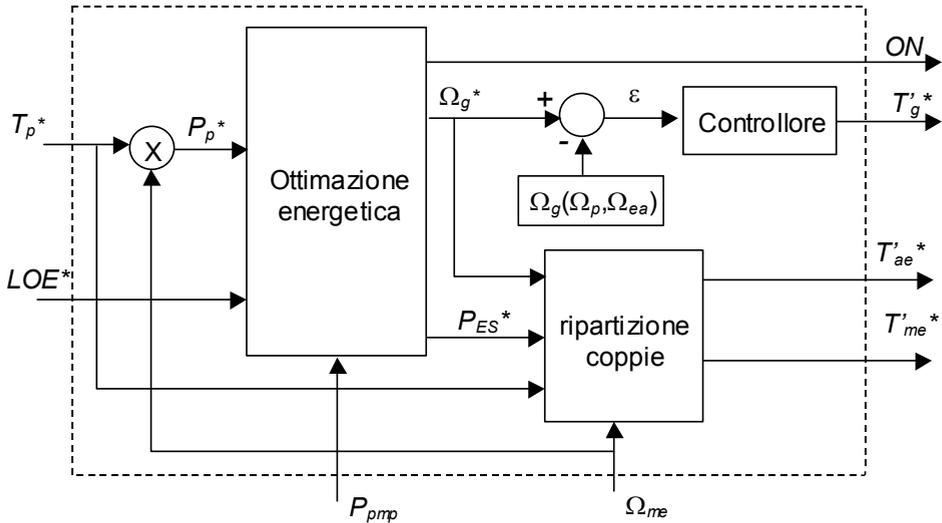


Fig. 14.5 - Possibile schema realizzativo dell' algoritmo di ottimizzazione mostrato in Fig. 14.4

All'interno del blocco "ottimizzazione energetica" è presente la scelta dei termini P_g e P_{ES} che compongono P_p , e l'individuazione del valore ottimale di velocità angolare Ω_g a cui far ruotare il motore a combustione interna.

14.3.1 Scomposizione della potenza propulsiva nelle sue componenti

Si è detto come per tutti i veicoli ibridi utilizzati in pratica il problema fondamentale della gestione energetica consiste della scomposizione della potenza propulsiva nei due componenti:

$$P_p(t) = P_g(t) + P_{ES}(t)$$

In analogia con quanto visto per gli schemi serie e parallelo (precedente par. 10.5), si può applicare la gestione a filtro di potenza, lasciar erogare al motore a combustione interna soltanto il valor medio della potenza del carico, e alle macchine elettriche il ripple:

$$P_{ES}(t) = P_{ESm} + r(t) \quad P_g(t) = P_{pm} - P_{ESm} \quad (7)$$

dove, come nei casi precedenti, P_{ES} è la potenza che si fa erogare all'accumulo energetico.

In questo caso si ha la complicazione che la potenza di scambio con l'accumulo dipende da due macchine elettriche, e in più la coppia di equilibrio della macchina ausiliaria è determinata dalle equazioni di equilibrio del rotismo, e non può quindi essere scelta in maniera indipendente.

14.3.2 Implementazione dell'ottimizzazione

Se ci limitiamo a considerare il funzionamento con tutte le macchine in funzione, quindi senza attivazione dei dispositivi di blocco meccanico, si possono agevolmente scrivere le equazioni di equilibrio che determinano il funzionamento del sistema. Ad esempio utilizzando come variabile ausiliaria la potenza P_{ES} globalmente erogata dall'accumulo, di grande importanza per la gestione pratica del sistema propulsivo, si possono scrivere le seguenti equazioni di equilibrio:

$$\begin{aligned}
 \Omega_p &= (1 + \sigma)\Omega_g - \sigma\Omega_{ae} \\
 T_{ae} &= \sigma T_c \\
 T_g &= (1 + \sigma)T_c \\
 T_p &= T_c + T_{me} \\
 P_{es} &= (P_{pe} + L_{pe}) - (P_{ae} + L_{ae}) = P_{pe} / \eta_{pe} - \eta_{ae} P_{ae} \\
 &= T_{me} \Omega_p / \eta_{me} - \eta_{ae} T_{ae} \Omega_{ae}
 \end{aligned} \tag{9}$$

I rendimenti η_{me} e η_{ae} degli azionamenti elettrici vengono normalmente individuati attraverso funzioni algebriche dei rispettivi valori di coppia e velocità angolare:

$$\eta_{me} = \eta_{me}(T_{me}, \Omega_p), \quad \eta_{ae} = \eta_{ae}(T_{ae}, \Omega_{ae})$$

In ogni istante le necessità della propulsione, come ricavabili dalla velocità del veicolo e dai comandi del pilota, determinano i valori desiderati di coppia e velocità propulsive, T_p e Ω_p ; pertanto il sistema di equazioni (9) è un set di 5 equazioni nelle 7 incognite $T_g, T_c, T_{ae}, T_{me}, \Omega_{ae}, \Omega_g, P_{ES}$. Esiste quindi un doppio grado di indeterminazione che può essere utilizzato per l'identificazione del punto di lavoro ottimale del sistema.

La potenza di scambio con l'accumulo P_{ES} può essere scelta con considerazioni che prescindono dalla ricerca dell'ottimo nell'istante considerato, ma dipendono dall'andamento nel tempo del carico del veicolo, secondo quanto esposto nel par. 10.5. Pertanto, supponendo noto P_{ES} al momento della risoluzione del sistema (9), quest'ultimo è un sistema di 5 equazioni in 6 incognite.

La soluzione può essere trovata con un criterio di ottimo³. Ad esempio si può utilizzare la soluzione proposta nella pubblicazione [24]⁴, relativa ad un sistema propulsivo a rotismo epicicloidale del tipo di quello qui analizzato, in cui il criterio scelto è di massimizzare l'efficienza globale della trasmissione così definita (rispettivamente nei casi in cui la batteria è in fase di carica o di scarica):

³ Si tratterà ovviamente di un ottimo vincolato, dovendo tutte le coppie e le velocità essere comprese fra rispettivi valori minimi e massimi.

⁴ Bibliografia del Capitolo 10.

$$\eta_{char} = \frac{T_p \Omega_p + P_{ES}}{P_{fuel}} \quad \eta_{disch} = \frac{T_p \Omega_p}{P_{fuel} + P_{ES}}$$

dove si è indicato con P_{fuel} l'energia nell'unità di tempo immessa nel sistema attraverso l'immissione di combustibile, considerando il suo potere calorifico.

Una volta risolto il sistema (9) il punto di lavoro del sistema viene determinato agendo sulle variabili manipolabili, che agiscono sulle coppie generate dal generatore e dalle due macchine elettriche. In pratica, però, non è però possibile imporre tutte le coppie autonomamente. Ad esempio se si volesse imporre autonomamente T_{ae} agendo sui comandi della AEM si dovrebbe imporre un

valore algebricamente connesso a T_g secondo la relazione $T_{ae} = \frac{\sigma}{1 + \sigma} T_g$. e ciò

potrebbe creare problemi di stabilità del controllo. Pertanto una volta imposta direttamente una delle coppie agenti sul rotismo epicicloidale, le altre vanno imposte indirettamente attraverso un loop di retroazione sulla velocità, come ad esempio effettuato per la coppia T_g^* in Fig. 10.8.

In alternativa si può imporre direttamente la coppia agente sul motore a combustione interna e determinare indirettamente la coppia sulla AEM interponendo un loop di retroazione sulla sua velocità angolare, come proposto nell'articolo [24].

14.3.3 Transizione fra i punti di lavoro

Resta ovviamente aperto il problema di come agire sulle coppie istante per istante generate dalle macchine elettriche e sull'immissione del combustibile per portare il sistema da un punto di lavoro all'altro in maniera sufficientemente rapida ma senza indurre perturbazioni sensibili sugli occupanti del veicolo, ovvero senza generare sensibili accelerazioni del veicolo non corrispondenti a richieste del pilota.

Per analizzare questa problematica occorre scrivere le equazioni dinamiche del sistema, in quanto le forze d'inerzia dei vari sottosistemi giocano un ruolo fondamentale nella modifica del punto di lavoro del drive train con rotismo epicicloidale.

Noto un modello dinamico del sistema propulsivo, sarà possibile sintetizzarne le funzioni di trasferimento delle varie parti del corrispondente sistema di controllo e procedere, come di prassi, alla simulazione del sistema controllato sulla base di casi realistici di funzionamento del veicolo. Dalle simulazioni si potranno ricavare informazioni utili alla valutazione dell'efficacia del controllo scelto, ed al suo eventuale affinamento.

Sebbene la simulazione dinamica del veicolo e la sintesi dei controllori dei vari sottosistemi esulino dagli scopi del presente volume, qualche informazione a riguardo può essere tratta dall'appendice riportata alla fine del presente capitolo.

14.4 Appendice: modellazione dinamica semplificata del drive train con rotismo epicicloidale

La presenza del rotismo epicicloidale consente di modificare il punto di lavoro del motore a combustione interna in moto da portarlo ad erogare la potenza ad esso richiesta secondo la migliore combinazione possibile (dal punto di vista dei consumi e/o delle emissioni) di velocità angolare e coppia.

Risulta in effetti possibile, agendo anche su una sola delle due macchine elettriche, modificare il punto di lavoro del motore a combustione interna a P_g , T_p , Ω_p invariati; se poi si opera in maniera coordinata su entrambe le macchine si può anche imporre un'ulteriore condizione, ad esempio un certo valore di potenza P_{ES} scambiata con l'accumulo.

Per poter valutare effettivamente come questo possa essere attuato occorre impostare le equazioni dinamiche del sistema considerato.

Con riferimento alla nomenclatura riportata nella Fig. 14.6, si ottengono le seguenti equazioni dinamiche (10), nelle quali si è evidenziato come la coppia resistente riportata all'albero della MEM T_r dipende solo (per un dato veicolo e una data pendenza del percorso) dalla velocità del veicolo, quindi dalla velocità angolare Ω_{ep} .

$$\begin{cases} T'_g - T_g = J_g \dot{\Omega}_g \\ T'_{ea} - T_{ea} = -J_{ea} \dot{\Omega}_{ea} \\ T_c + T'_{ep} - T_r(\Omega_{ep}) = (J_{ep} + J_v) \dot{\Omega}_{ep} \end{cases} \quad (10)$$

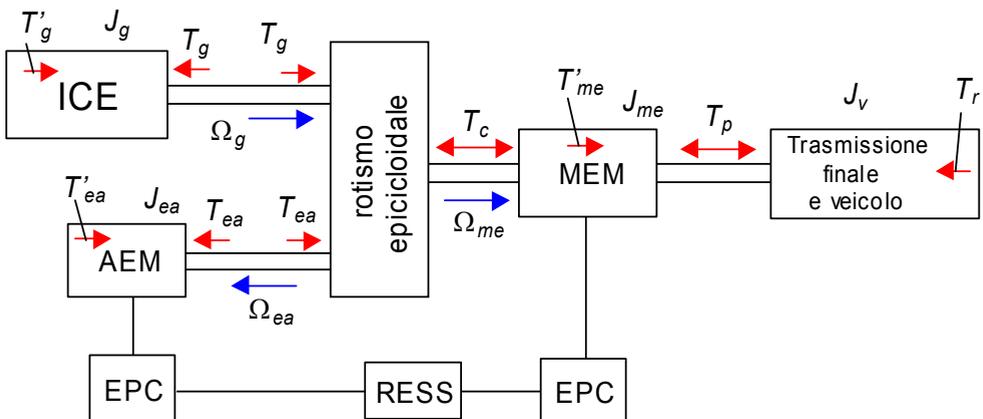


Fig. 14.6 - Schema del drive train con la nomenclatura usata per la scrittura delle equazioni dinamiche

Le (10), che descrivono le dinamiche rotazionali degli elementi i cui momenti di inerzia non sono stati considerati trascurabili, vanno ovviamente utilizzate in congiunzione con le relazioni che legano velocità e coppie del rotismo (ad es. nelle formulazioni (1) e (4), le quali consentono, nota una delle coppie, di determinare le altre due, e note due velocità angolari di determinare la terza.

Nella (10) compaiono coppie meccaniche generate dalle tre macchine che agiscono sul rotismo; esse sono determinabili con azioni del controllo che impongono i rispettivi riferimenti.

Se si modellizzano le dinamiche di queste macchine come del primo ordine, una possibile raffigurazione in diagramma a blocchi delle (10) integrato con queste modellizzazioni, posto $J_{eq}=J_{ep}+J_v$, è riportata in Fig. 14.7.

Interfacciando questo diagramma con quello di Fig. 14.5 si può realizzare un sistema di simulazione dinamica (pur semplificato) del comportamento del drive train e del relativo controllo della propulsione⁵.

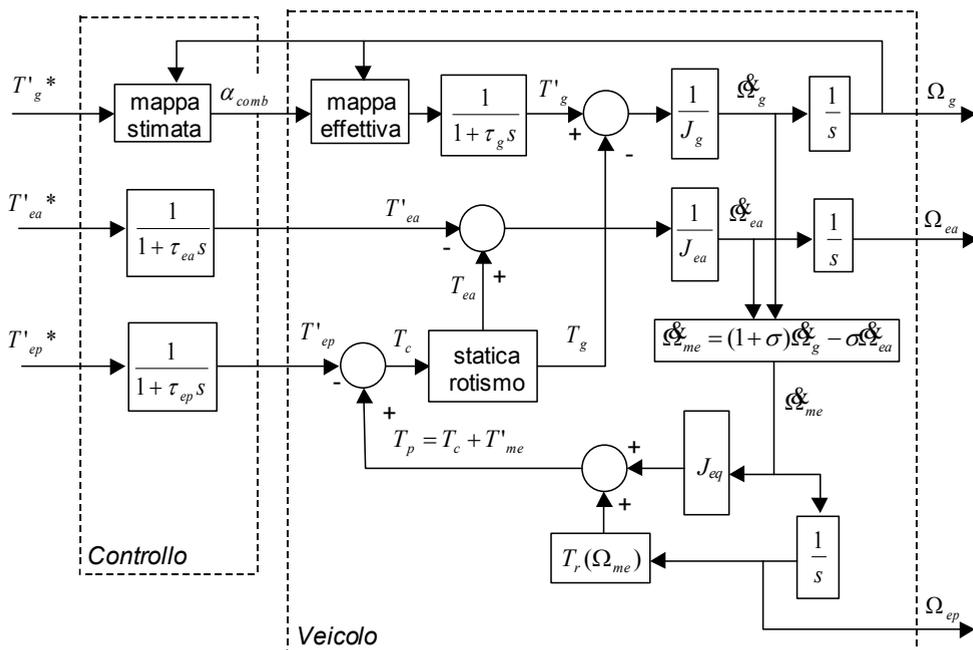


Fig. 14.7 - Esempio di diagramma a blocchi rappresentativo della dinamica di veicolo con drive train ibrido realizzato secondo lo schema di Fig. 14.6

⁵ Il diagramma di Fig. 14.7 mal si presta ad essere utilizzato tal quale per simulazioni dinamiche, in conseguenza del fatto che esso è ricavato trascurando le inerzie degli elementi del rotismo epicicloidale; ne possono discendere problemi di integrazione numerica risolvibili con artifici o con una descrizione dinamica del rotismo, non inclusa nella presente trattazione.

CAPITOLO 15

I SISTEMI DI ACCUMULO ELETTRICO DI TIPO “MISTO”

Manlio Pasquali, Giovanni Pedè

ENEA, Tecnologie per l'Energia, Fonti Rinnovabili e Risparmio Energetico

Com'è noto, il sistema di accumulo elettrico di un veicolo ibrido deve soddisfare due esigenze:

- livellare i picchi di potenza richiesta, erogando una potenza aggiuntiva (massima) P_{miss}
- erogare $P(t) \leq P_{miss}$ per tutto il tempo necessario, generando quindi l'energia $E_{miss} = \int P dt$

oltre a consentire, in misura da definirsi, il recupero dell'energia altrimenti dissipata nella frenatura meccanica. Un accumulo elettrico correttamente dimensionato dovrà pertanto garantire contemporaneamente:

- una potenza aggiuntiva (massima) P_{miss} , che è il delta tra la potenza del generatore e la potenza massima prevista:

$$P_{acc} \geq P_{miss} \quad (1)$$

- ed un contenuto energetico sufficiente ad evitarne la scarica completa durante ogni fase di richiesta di potenza.

$$E_{acc} \geq E_{miss} \quad (2)$$

Per ogni missione (veicolo & ciclo di utilizzo) è pertanto possibile definire un valore caratteristico del rapporto P/E , che chiameremo $(P/E)_{miss}$.

Mentre per alcune applicazioni, ad esempio per il veicolo a batteria, il valore del rapporto $(P/E)_{miss}$ trova un preciso riscontro nel valore dell'analogo rapporto $(P/E)_{acc}$, per altri tipi di missione questo invece non avviene, non esistendo un sistema d'accumulo che da solo soddisfi al meglio le specifiche di progetto.

Combinando le caratteristiche di batterie e SC (o volani) in un sistema “misto”, si può pensare di progettare un accumulo elettrico specializzato per la particolare applicazione considerata, dotato ad esempio di batterie per la marcia in solo elettrico e di supercondensatori per il recupero in frenata e per brevi spunti di potenza.

Un tale sistema è stato realizzato per la prima volta dalla Solectria nel 2000 ed è stato poi oggetto di studi ed esperienze in Italia ed all'estero (Francia, Germania, Cile ecc.), e si è dimostrato molto efficace per ridurre lo stress delle batterie, allungandone così la vita anche del doppio.

In questo ambito, ENEA e l'Università di Roma 3 hanno sviluppato e lungamente sperimentato l'accumulo misto rappresentato in Fig. 15.1 ed il sistema di trazione rappresentato in Fig. 15.2, cui si farà riferimento nell'esposizione di una metodologia per l'ottimizzazione del dimensionamento tecnico-economico dell'accumulo di potenza e di energia, a partire dallo studio della missione.

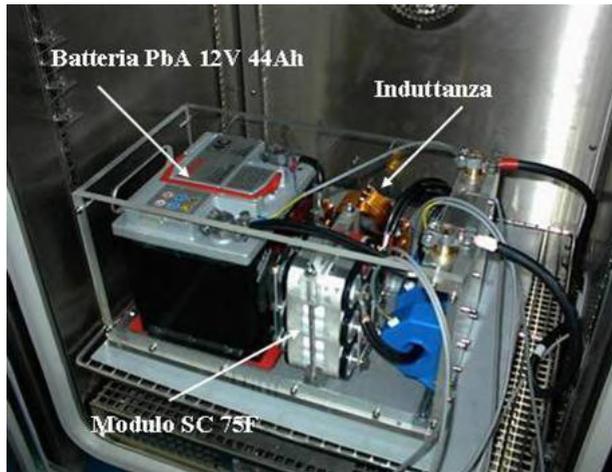


Fig. 15.1 - Accumulo "misto" sviluppato e brevettato in ENEA

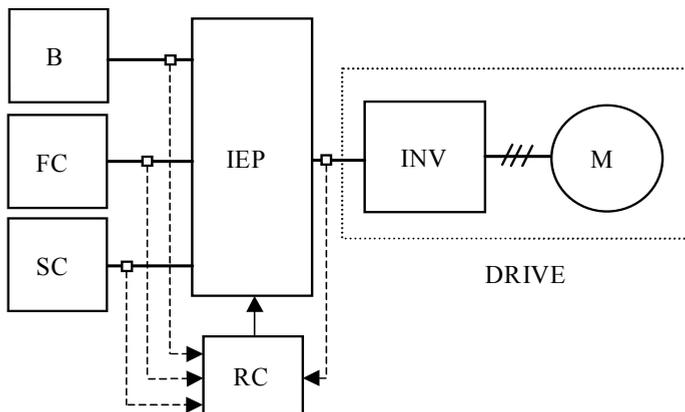


Fig. 15.2 - Schema del sistema di trazione sviluppato e sperimentato da ENEA e Università di Roma 3

LEGENDA

1. convertitore primario (cella a combustibile, FC)
2. accumulo di energia (batteria di accumulatori elettrochimici, B)
3. accumulo di potenza (banco di supercondensatori, SC)
4. interfaccia elettronica di potenza bidirezionale (IEP)
5. azionamento elettrico di propulsione (DRIVE, con inverter, INV, e motore di trazione, M)

15.1 Definizione del sistema d'accumulo in funzione del solo valore del rapporto P/E

In prima approssimazione, il sistema d'accumulo misto può essere dimensionato imponendo che il peso relativo dei due sistemi consenta di avere dall'accumulo elettrico tanta potenza ed energia quanta ne serve per soddisfare "esattamente" la richiesta di potenza e di energia propria della missione. Indicando con P1 la potenza delle batterie e con P2 quella dei supercondensatori, tipologia e numero dei moduli batteria e supercondensatori dovranno essere tali da soddisfare la:

$$P/E_{acc} = P/E_{miss} \quad (3)$$

unitamente alle condizioni (1 e (2. Una tale configurazione del sistema è anche quella di minor peso tra tutte quelle realizzabili, come è facilmente verificabile rappresentando graficamente il problema¹.

Consideriamo infatti la Fig. 15.3, che rappresenta sul piano predetto il campo ammissibile per il dimensionamento di un accumulo misto per un'auto da città.

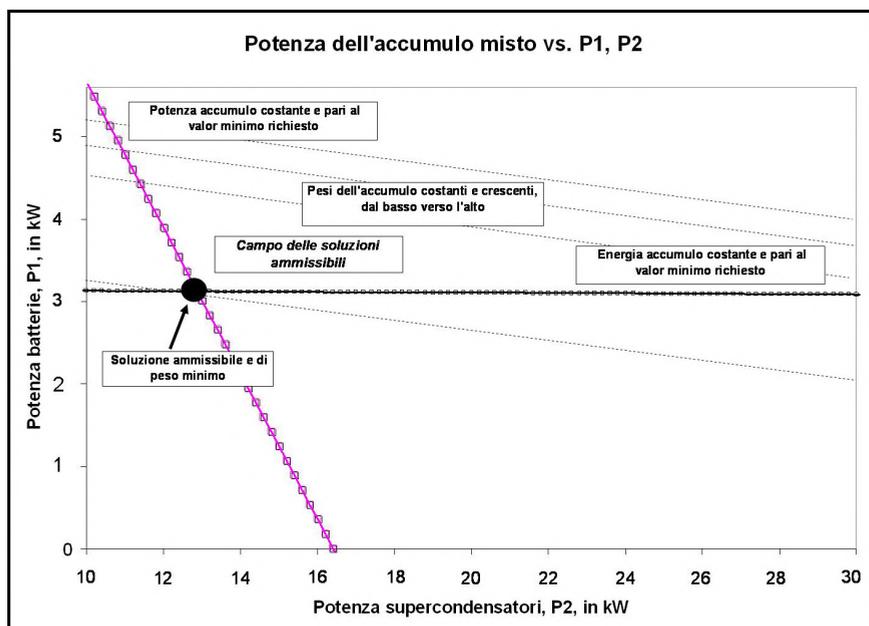


Fig. 15.3 - Campo ammissibile per l'accumulo misto per un'auto da città

¹ Basta spostarsi dal punto "soluzione ammissibile" per verificare che in qualsiasi altro punto del campo delle soluzioni ammissibili la potenza o l'energia dell'accumulo misto o entrambi i parametri sono maggiori di quanto richiesto dalla missione.

Tale campo è individuato dall'intersezione di quattro semipiani, i due semipiani per P1 ed P2 positivi e gli altri due corrispondenti alle condizioni:

$$P_{acc} \geq P_{miss} \quad E_{acc} \geq E_{miss}$$

Consideriamo poi il fascio (improprio) di rette parallele tratteggiate in figura che rappresentano sistemi di accumulo a peso costante e che hanno almeno un punto all'interno del campo delle soluzioni ammissibili.

Come già accennato, il punto contrassegnato dal pallino è il punto per il quale si realizza la condizione (3), ma è anche l'unico punto appartenente tanto al campo delle soluzioni ammissibili, quanto alla retta di peso minimo, quella più vicina all'origine tra quelle del fascio; quindi, tra le infinite soluzioni ammissibili, è la soluzione di minimo peso.

In realtà, non solo peso e costo sono i criteri da tenere in considerazione (può essere richiesto, ad esempio, di limitare il gradiente di potenza delle batterie), di conseguenza la procedura per il dimensionamento è più complessa, e richiede naturalmente la costruzione di un modello del veicolo o almeno del suo sistema di trazione.

15.2 L'ottimizzazione tecnico-economica del sistema di accumulo "ibrido"

La necessità di definire una procedura per il dimensionamento dell'accumulo misto offre lo spunto per definire in modo sistematico cosa sia il problema del dimensionamento di un veicolo o di parti di esso, a valle di questa riflessione è possibile definire una procedura che porti al dimensionamento dell'accumulo. Nel momento in cui si va a dimensionare un veicolo tramite l'utilizzo di un simulatore dello stesso, l'operatore giudica, spesso supportato dalla propria esperienza, se una determinata scelta dei componenti (per avere un modello del veicolo la configurazione è già stata fissata) e della logica con cui sono gestiti, soddisfa certi criteri.

Ad esempio, considerando la configurazione di Fig. 15.2, ed avendo fissato le caratteristiche dell'azionamento ed il ciclo di riferimento (e quindi di fatto P_{miss} ed E_{miss}) il dimensionamento per tentativi dell'accumulo si sviluppa come segue:

1. si impostano le caratteristiche fisiche del sistema di generazione/accumulo
2. si impostano i valori dei parametri della logica di gestione
3. si simula il comportamento del veicolo sul ciclo di dimensionamento
4. si verifica il rispetto dei vincoli di progetto
5. se i vincoli non sono rispettati si variano le impostazioni e si torna al punto 3)
6. se più soluzioni rispettano i vincoli si sceglie quella più adatta agli scopi prefissi.

I vincoli di progetto al punto 4) sono il campo di variazione ammesso per la tensione a monte dei convertitori (la minima e massima tensione ammissibile per i pacchi delle batterie e dei supercondensatori), le correnti massime erogabili ed assorbibili, i SOC minimi e massimi di lavoro mentre i parametri della logica di gestione (punto 2) possono essere, ad esempio, la massima velocità di variazione ammissibile per la corrente di cella e quella di batteria.

Si noti che con questo approccio il numero di prove che si possono eseguire è limitato ed il criterio di giudizio dei risultati non è oggettivo .

Si consideri ora il punto 4) verifica dei vincoli di progetto: se si riuscisse a tradurre questa verifica in un valore numerico, il risultato della simulazione sarebbe un dato oggettivo e di conseguenza sarebbe possibile rendere automatico tutto il processo; l'idea è quella di scrivere una 'funzione' che quantifichi i risultati ottenuti dal simulatore al variare delle caratteristiche fisiche del sistema e dei parametri di gestione.

La funzione può essere impostata in modo che ad un dimensionamento 'perfetto' corrisponda un suo massimo o un minimo assoluto, traducendo così il problema del dimensionamento in quello della massimizzazione o minimizzazione di una funzione.

La funzione può essere scritta come una sommatoria pesata di termini che esprimono lo scarto tra i risultati ottenuti dalla simulazione e quelli richiesti dal progettista. Normalizzando gli scarti ed i pesi della sommatoria si ottiene un valore che varia tra zero ed uno: è possibile impostare il tutto in modo che, ad esempio, si abbia un dimensionamento 'perfetto' al valore zero.

Per scrivere la funzione occorre definire cosa si intende per configurazione, ovvero scegliere quali grandezze far partecipare al processo di minimizzazione e quali stabilire indipendentemente da esso: nel caso presente si decide, fissato il ciclo di riferimento e le caratteristiche dell'azionamento, di variare oltre alle tipologie ed al numero di batterie e di supercondensatori, anche la potenza della cella a combustibile ed i valori dei gradienti della logica di gestione.

Nella scrittura della relazione si tratteranno in modo diverso i vincoli fisici di funzionamento del sistema (ad esempio i limiti di tensione al quale esso può lavorare) e le prestazioni effettive ottenute sul ciclo: in caso di violazione dei primi si imporrà una crescita esponenziale della funzione (per segnalare un'anomalia inaccettabile) mentre le prestazioni verranno quantificate con valori compresi tra zero (perfetta) ed uno (massimo scarto). La struttura risultante da questa impostazione sarà quindi la seguente:

$$f(nstack, tipob, nb, tipouc, nuc, gfc_{chg}, gfc_{dchg}, gb_{chg}, gb_{dchg}) = \sum_i p_i t_i + \sum_j V_j \quad (4)$$

dove con p si intendono i pesi, con t le prestazioni e con V i vincoli, valgono le relazioni:

$$\sum_i p_i = 1; \quad 0 \leq t_i \leq 1; \quad 0 \leq V_i \leq \infty \quad (5)$$

in particolare V_i assume valori maggiori di zero solo se il vincolo i non è rispettato.

La Fig. 15.3 rappresenta schematicamente il processo che porta alla valutazione della funzione di dimensionamento, eseguita tramite l'utilizzo di una procedura che a sua volta sfrutta il simulatore già introdotto: una volta assegnati i valori di ingresso si verifica che essi non violino i vincoli di funzionamento: in caso contrario si valuta la funzione tramite le V_i , che crescono in modo esponenziale al crescere della differenza tra l'ingresso assegnato ed il valore ammissibile ad esso più vicino.

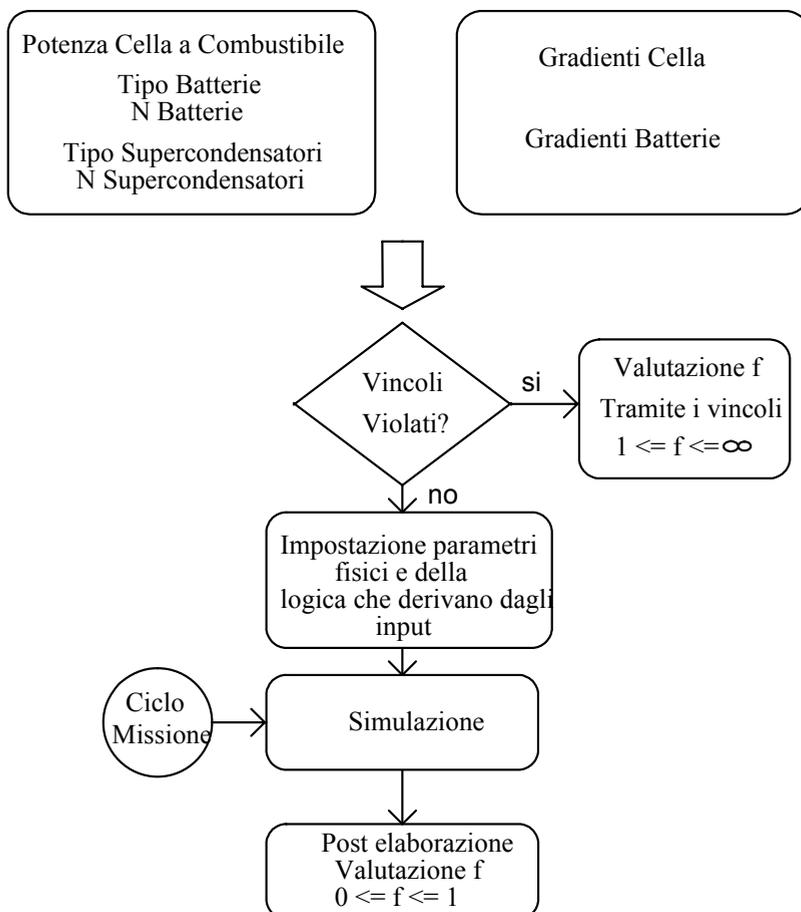


Fig. 15.4 - Valutazione della funzione di dimensionamento

Se i vincoli sono rispettati si pongono tutti i termini V_i pari a zero e si impostano le variabili della logica di gestione legati ai valori di input (ad esempio i SOC massimi e minimi di funzionamento), successivamente si esegue la simulazione sul ciclo di missione e, tramite post-elaborazione dei risultati, si calcola f .

Nella Fig. 15.4 è messo in evidenza il ciclo di missione, che costituisce un input del simulatore, ma che rimane fisso per ogni operazione di dimensionamento (si dimensiona su di un ciclo); si noti che finché si rimane all'interno dei vincoli la funzione risulterà essere continua, mentre la loro violazione introduce una discontinuità. La funzione così impostata può essere utilizzata per automatizzare il punto 4) della procedura di dimensionamento manuale descritta precedentemente, fornendo all'operatore uno strumento per la valutazione oggettiva dei risultati ottenuti, ma a questo punto è opportuno rendere il tutto automatico sfruttando una procedura numerica di ottimizzazione che modifica i valori di input fino a minimizzare la f operando come mostrato in Fig. 15.45.

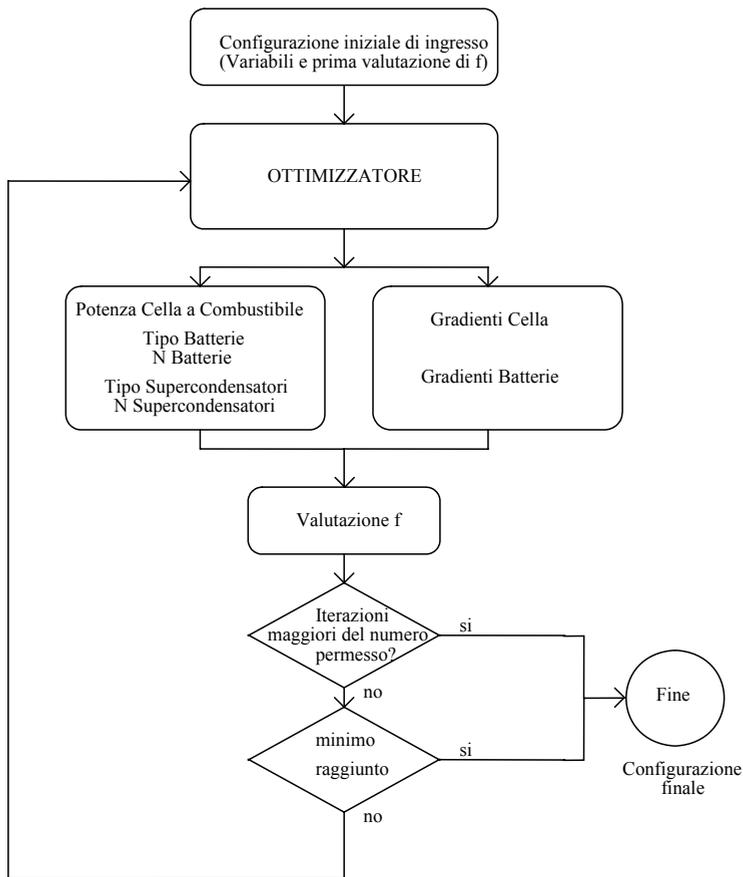


Fig. 15.5 - Dimensionamento tramite un ottimizzatore numerico

In generale, a differenza di una metodologia classica di dimensionamento, quali ad esempio quelle applicabili alle macchine elettriche convenzionali, le procedure basate sull'utilizzo di modelli numerici e sulla minimizzazione di funzioni obiettivo hanno il vantaggio di fornire risultati estremamente accurati a fronte di una minore conoscenza teorica del problema in esame. In pratica si segue un approccio a tentativi, l'ottimizzatore genera una serie di tentativi non casuali ma sistematici per isolare la migliore soluzione al problema proposto e lo fa da un punto di vista puramente matematico, che prescinde dal problema in esame.

15.3 L'impostazione della funzione obiettivo ed i metodi di risoluzione

L'ottimizzazione di una funzione di n variabili, denominata funzione obiettivo, del tipo:

$$g = f(y_1 \dots y_n) \quad (6)$$

consiste nella ricerca di un minimo locale o, preferibilmente, globale, della funzione in questione.

Il problema dell'ottimizzazione può essere riformulato aggiungendo dei vincoli sul campo di variazione dei singoli termini y_i , una tecnica semplice è quella di considerare delle funzioni peso f' aggiuntive alla f , ridefinendo la funzione obiettivo stessa nel modo seguente:

$$g = f(y_1 \dots y_n) + f'(y_1 \dots y_n) \quad (7)$$

dove la

$$f'(y_1 \dots y_n) \quad (8)$$

è una funzione che ha andamento crescente nei punti in cui non si vuole effettuare la ricerca dei minimi della (5.3).

I metodi di ottimizzazione sono stati oggetto di numerosi studi, ed hanno pertanto avuto un notevole sviluppo negli ultimi anni; in generale si hanno due possibili approcci al problema:

- approccio di tipo analitico
- approccio di tipo numerico.

L'approccio di tipo analitico richiede la conoscenza esplicita dell'espressione della funzione da analizzare e delle sue derivate, quello di tipo numerico la considera invece come una 'scatola chiusa' nella quale entrano dei numeri e ne escono altri.

Gli approcci di tipo numerico si dividono a loro volta in due grandi categorie, deterministico e stocastico: la differenza fondamentale tra di essi è che il primo assicura di trovare solamente un minimo della funzione obiettivo, disinteressandosi del fatto che questo sia assoluto o relativo, mentre il secondo tenta di isolare il minimo assoluto.

I metodi stocastici non possono garantire in termini strettamente analitici di trovare il minimo assoluto, ma lo fanno in termini statistici, in generale essi richiedono un onere computazionale maggiore dei deterministici a fronte di un risultato migliore.

15.4 Il metodo "downhill"

La Fig. 15.6 ripropone il classico metodo di bisezione per la ricerca di una zero di una funzione e lo riadatta alla ricerca di un minimo della stessa: la figura può essere interpretata come un esempio del modo di operare del metodo downhill.

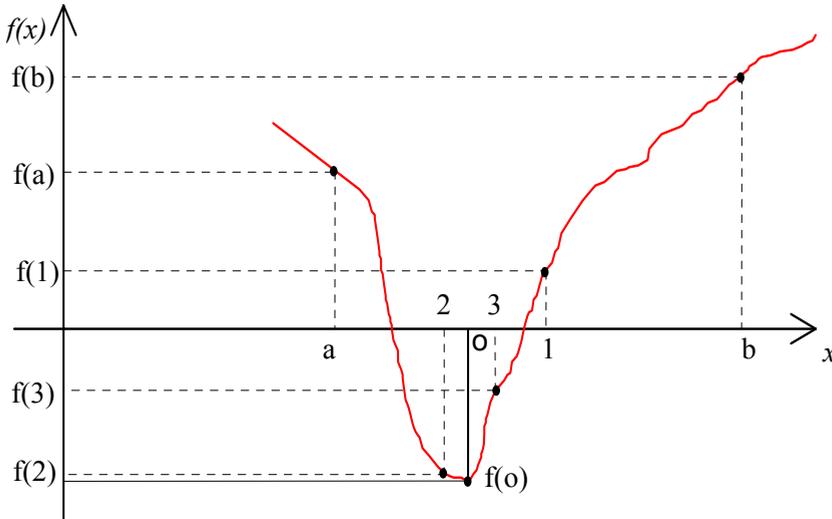


Fig. 15.6 - Metodo di bisezione o di downhill monodimensionale

La ricerca del minimo inizia partendo da due valori dell'ascissa, a e b , assegnati dall'utente: questi valori definiscono un intervallo nell'asse delle x , si noti che la funzione dipende da una variabile e l'intervallo iniziale di ricerca è definito da due valori assegnati dall'operatore (per n variabili occorrono $n+1$ punti): scopo del metodo è quello di far collapsare i due valori in un punto (il minimo relativo), ovvero di annullare la distanza tra i due.

Nella figura è posto $f(b) > f(a)$: la prima operazione consiste nel sostituire il punto b con un punto, denominato 1, in cui $f(1)$ abbia un valore minore di $f(b)$, si individua così il punto medio nell'intervallo (a,b) e si definisce un nuovo intervallo $(a,1)$, se fosse stato $f(1) > f(b)$ allora si sarebbe cercato un punto esterno all'intervallo. Una volta definito il nuovo intervallo $(a,1)$ si ha $f(a) > f(1)$ per cui si opera su $f(a)$ individuando il punto 2 e l'intervallo $(1,2)$, iterando il procedimento infinite volte l'intervallo collassa nel punto o che è la soluzione cercata.

La successiva Fig. 15.7 illustra un caso in cui viene isolato un minimo locale anziché globale, si noti che il punto 1 è esterno all'intervallo (a,b) e che il nuovo intervallo è $(a,1)$ di ampiezza maggiore del primo, alla fine la procedura individuerà il punto 2 e convergerà in o .

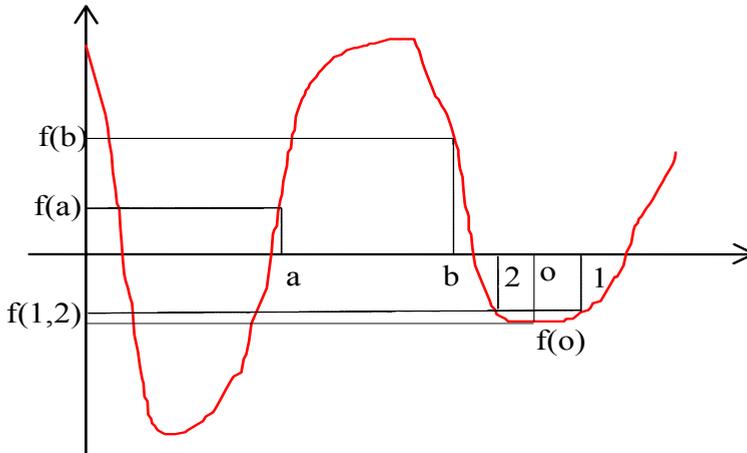


Fig. 15.7 - Ricerca del minimo locale

Generalizzando quanto visto il metodo downhill opera su di una figura geometrica detta *simplexso*: un *simplexso* è una figura non degenera di $n+1$ dimensioni in uno spazio vettoriale ad n dimensioni, ad esempio in un piano, ($n=2$), un *simplexso* è un triangolo non degenera, ovvero di area non nulla, in uno spazio ($n=3$) un tetraedro.

Si consideri un *simplexso* in uno spazio n -dimensionale: si può assumere uno dei suoi $n+1$ punti come origine di un vettore, di cui gli altri n punti siano le componenti.

L'idea del metodo downhill è quella di agire su questo vettore muovendolo fino ad incontrare un minimo locale, si parte da una data sequenza iniziale di punti, e si assume uno di questi punti come origine del vettore da orientare, si indichi con P_0 il punto origine, è possibile identificare gli altri n punti del *simplexso* come:

$$P_i = P_0 + \lambda_i e_i \quad (9)$$

avendo decomposto la distanza vettoriale ΔP tra P_i e P_0 in un prodotto tra gli n versori unitari e_i e gli scalari λ_i , che rappresentano così la scala di variazione delle n grandezze in esame.

Operando nel modo descritto si è quantificata l'entità delle variazioni da eseguire sull' i -esimo elemento in studio, occorre ora definire il criterio con cui far muovere il vettore nello spazio n dimensionale: il metodo prevede di calcolare la funzione obiettivo negli $n+1$ punti e muovere il vettore nella direzione individuata dai punti a valor massimo e minimo, procedendo dal primo verso il secondo, questa operazione è indicata con il termine di riflessione. La riflessione viene costruita in modo da garantire che il *simplexso* sia non degenera e si arresta allorché si trova un minimo nella direzione indicata: se il minimo è all'interno della congiungente i punti di partenza, si parla di contrazione del *simplexso*, altrimenti si ha l'espansione dello stesso.

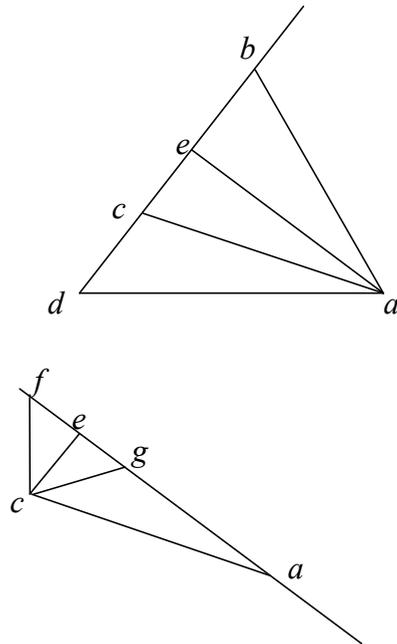


Fig. 15.8 - Metodo downhill a due dimensioni

A questo punto si ridefiniscono i punti massimo e minimo e si ripete il processo, dopo una serie finita di passi si trova un intorno di un minimo locale e si avranno quindi contrazioni multiple che, muovendosi con continuità, dopo infiniti passi porterebbero il semplice a degenerare in un punto.

Nella Fig. 15.8 viene mostrato il modo di procedere del metodo nel caso di funzioni a due variabili: inizialmente si ha il triangolo indicato con le lettere abc, al punto b corrisponda il massimo valore della funzione obiettivo, e al punto c il valor minimo, il metodo esamina il valore della funzione nei punti definiti dalla congiungente bc. Sono possibili due situazioni:

- 1) il valor minimo viene individuato all'interno del segmento bc (punto e, contrazione)
- 2) il valore è esterno a tale segmento (punto d, espansione).

Si consideri la prima ipotesi: in tal caso il processo viene ripetuto sul triangolo individuato dalle lettere ace, il valor massimo è ora in a ed il minimo in e per cui si muove lungo il segmento ae (seconda parte della figura), è possibile trovare un minimo all'interno di tale segmento, (punto g), o all'esterno di esso, (punto f), nel primo caso si è in presenza di un minimo locale e il triangolo inizia a contrarsi su se stesso.

Il metodo downhill è un algoritmo di ottimizzazione di bassa efficienza ma presenta il vantaggio di poter operare su funzioni di classe C^0 non richiedendo l'utilizzo, come avviene in altri casi, del calcolo di derivate parziali; a questo vantaggio esso aggiunge quello della semplicità di implementazione e di utilizzo, per questi motivi si è deciso di adottarlo in questo studio.

15.5 Il problema dell'ottimizzazione in uno spazio bidimensionale

Ritorniamo al problema di dimensionamento rappresentato in Fig. 15.3. Partendo dalla costruzione illustrata, è facile costruire il campo di esistenza delle soluzioni ammissibili che, pur soddisfacendo le condizioni (1) e (2), hanno un peso compreso tra il valore minimo precedentemente trovato ed un valore massimo ammissibile, definito a priori in base a considerazioni veicolistiche e prestazionali.

Poiché batterie e supercondensatori hanno costi unitari (per kg) diversi, potrebbe infatti verificarsi che una soluzione di accumulo misto più pesante, ma di peso inferiore al massimo ammissibile, risulti più economica della soluzione di peso minimo.

Tutto questo può essere espresso da una funzione obiettivo che dia un peso opportuno ad ogni suo termine (ed a quanti altri vincoli si vogliono introdurre), da risolvere con i metodi sopra indicati, ma è possibile definire un approccio semplificato al problema utilizzando l'assunzione che esso sia lineare: in tal caso esso può essere affrontato anche per via grafica applicando il Metodo del Simplexso.

L'approssimazione della linearità del problema non è necessariamente una forzatura: per adottarla occorre fissare una volta per tutte la massa del veicolo, assumere che l'accumulo lavori in condizioni ottimali (fissare l'intervallo di variazione del SOC di batterie e condensatori in valori compresi, ad es. tra 0,3 e 0,8) e stabilire i gradienti di variazione della corrente di batteria. Si tratta di assunzioni che in molti casi sono legittime e non vengono introdotte per semplificare il problema, in altri non lo sono, ma permettono comunque di individuare una fascia di possibili soluzioni ad esso.

Da queste assunzioni deriva che il simplexso è la regione di esistenza di tutte le soluzioni compatibili con i vincoli imposti sull'energia e potenza minime, sul peso massimo e sul numero minimo delle batterie.

La possibilità di utilizzare il metodo per la scelta della combinazione "ottimale" di batterie e supercondensatori è dovuta in questo caso:

- dalla convessità del simplexso², per cui ogni massimo locale di una funzione obiettivo lineare è anche un massimo globale
- dalla linearità delle funzioni che esprimono peso e costo del sistema di

² In un dominio "convesso", comunque presi due punti il segmento che li unisce è tutto interno al dominio.

accumulo in funzione delle variabili che rappresentano la composizione dei due accumuli (di energia e di potenza), ad esempio del tipo e numero dei moduli considerati per batterie, N1, e supercondensatori N2. La scelta a priori di due moduli di riferimento³, rende poi bidimensionale il problema (Fig. 15.9).

In questa ipotesi, il teorema del sempliceo ci dice che le soluzioni di massimo e minimo peso e quelle di massimo e minimo costo corrispondono ai vertici del sempliceo costruito sulla base dei vincoli imposti al sistema.

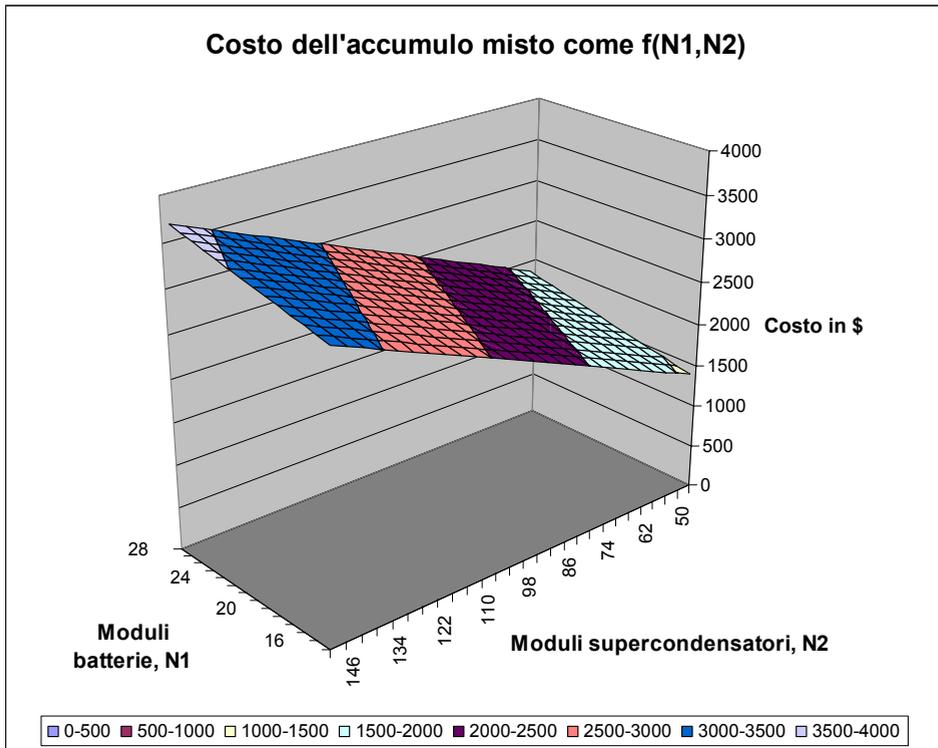


Fig. 15.9 - Costo dell'accumulo misto in funzione dei moduli di batterie e supercondensatori

15.6 Il metodo del sempliceo

Il dimensionamento tecnico-economico ottimale del sistema di accumulo elettrico costituito da batterie e supercondensatori richiede la massimizzazione, subordinata al rispetto di precisi vincoli tecnici, di una funzione lineare Z:

$$\text{Risparmio atteso a fine vita } (Z) = \text{Costo accumulo semplice} - \text{Costo accumulo misto}$$

³scegliendo ad esempio tre moduli "standard" per veicoli di taglia piccola, media e grande.

dove il costo del sistema misto (batterie + supercondensatori) è funzione dei pesi e dei costi complessivi imputabili ai due componenti, e che chiameremo x_1 , C_1 con riferimento alle batterie e x_2 , C_2 per i supercondensatori.

Considerando il costo a fine vita dei due tipi di batterie si tiene conto della diversa durata (cicli vita) delle due tipologie prescelte, si è trascurato invece, per semplicità, il maggior consumo della soluzione più pesante, considerato che il fattore percentuale di incremento di consumi è pari a 0,5⁴ e che si imporrà un incremento di peso del veicolo non superiore al 2-3% sul peso totale.

Abbiamo perciò che la funzione obiettivo Z:

$$Z = \text{Costo batteria al Litio} - (C_1 x_1 + C_2 x_2) \quad (10)$$

va massimizzata in presenza di una serie di vincoli funzionali rappresentati come segue:

1. *Il peso complessivo deve essere uguale o minore di G*
2. *La potenza massima deve essere uguale o maggiore di P*
3. *L'energia accumulata deve essere uguale o maggiore di E*

dove:

Peso accumulo Litio: G; Potenza accumulo Litio: P; Energia accumulo Litio: E; calcolando P ed E dalla simulazione della missione del veicolo e dimensionando corrispondentemente G.

Queste tre condizioni esprimono l'invarianza complessiva delle prestazioni del veicolo.

Indicando con a_{11} e a_{12} la potenza per unità di peso di batterie e supercondensatori, e con a_{21} e a_{22} le rispettive energie per unità di peso, le tre condizioni suddette divengono:

$$x_1 + x_2 \leq G \quad (11)$$

$$a_{11} x_1 + a_{12} x_2 \geq P \quad (12)$$

$$a_{21} x_1 + a_{22} x_2 \geq E \quad (13)$$

Per ottenere una soluzione che abbia un'immediata applicazione ad un sistema di accumulo reale, che è vincolato:

- dalla disponibilità commerciale dei moduli unitari che costituiranno i due sistemi d'accumulo, pesi e tensioni dei quali variano evidentemente in modo discontinuo,
- dalla necessità che la tensione nominale del pacco batterie e del banco supercondensatori sia mantenuta in un certo campo, determinato dai criteri di dimensionamento corretto dell'interfaccia,

⁴ Dalla simulazione (e da riscontri statistici su una numerosa popolazione di modelli di autovetture), si verifica che nel ciclo di omologazione un incremento dell'1% del peso del veicolo comporta un incremento dei consumi minore dello 0,5%.

dobbiamo porre altre condizioni e riformulare il sistema di equazioni suddetto. Poniamo quindi :

$$x_1 = N_1 m_1 \quad V_1 = N_1 v_1 \quad x_2 = N_2 m_2 \quad V_2 = N_2 v_2$$

dove N_1, N_2, V_1, V_2 sono numero di moduli e tensione totale dei due sistemi, mentre m_1, m_2, v_1, v_2 sono pesi e tensioni dei singoli moduli.

Per tener conto quindi del vincolo sulla disponibilità commerciale dei moduli, trasformiamo le tre condizioni (11) (12) (13) introducendo al posto delle incognite x_1 , e x_2 le nuove incognite N_1, N_2 :

- $N_1 m_1 + N_2 m_2 < = G$ (14)

- $a_{11} N_1 m_1 + a_{12} N_2 m_2 > = P$ (15)

- $a_{21} N_1 m_1 + a_{22} N_2 m_2 > = E$ (16)

mentre per tener conto del vincolo sul campo di variabilità delle tensioni totali introduciamo le condizioni aggiuntive :

$$V_{bmin} < V_1 < V_{bmax}, \quad V_{scmin} < V_2 < V_{scmax}$$

che ridurremo a due condizioni sole, sulle due tensioni minime ammissibili, che riportiamo di seguito:

- $N_1 V_1 > = V_{bmim}$ (17)

- $N_2 V_2 > = V_{scmin}$ (18)

Il suddetto sistema di disequazioni può essere rappresentato graficamente sul piano N_1, N_2 ed può avere una, nessuna o infinite soluzioni, tra le quali deve essere individuata quella di costo minimo.

Il teorema su cui si fonda il metodo del sempliceo afferma che la soluzione ottima è una di quelle, in numero finito, che corrispondono ai vertici del poligono individuato sul piano N_1, N_2 dal suddetto sistema di disequazioni.

Il problema verrà quindi affrontato costruendo il poligono stesso e calcolando successivamente, in accordo con la teoria, il valore della funzione obiettivo in corrispondenza ai vertici del poligono.

Per applicare il metodo occorre conoscere, oltre al rapporto $(P/E)_{miss}$, energie e potenze specifiche dei componenti, batterie e supercondensatori, in condizioni il più possibili simili a quelle che si incontreranno durante l'esercizio del veicolo.

15.7 Un esempio di applicazione del metodo del sempliceo

Il veicolo scelto a riferimento è una vettura ibrida, di tipo "serie", del peso di 1400 kg, il ciclo è derivato, con alcune modifiche, dal ciclo di omologazione (vedi il capitolo sul dimensionamento dell'ibrido serie).

Sceghieremo il tipo di batteria e di supercondensatori tra i moduli più piccoli disponibili in commercio per avvicinarci al caso ideale di una distribuzione continua dei valori. Il modulo batteria scelto sarà quindi una batteria piombo-acido 13Ah/12V, il modulo supercondensatori un modulo da 1500 F.

15.7.1 Calcolo del rapporto $(P/E)_{miss}$

Per calcolare potenza ed energia richieste all'accumulo elettrico utilizzeremo in prima approssimazione un modello puramente energetico (che tiene quindi conto delle perdite ohmiche ma non dei limiti di tensione dei dispositivi) basato sull'analisi dei flussi di potenza.

Prima ancora bisogna però progettare il sistema di generazione, in uno dei diversi modi illustrati parlando del dimensionamento preliminare dell'ibrido serie.

Nell'esempio di seguito illustrato adotteremo il criterio della prestazione di riferimento e lo sceglieremo di potenza adeguata ad assicurare al veicolo una "gradeability" corrispondente ad una velocità massima continuativa di 70 km/h su di una rampa del 2%, e pari a 14 kW.

Il controllo adottato per la gestione del generatore è di tipo "Load following", e questo già prefigura una configurazione dell'accumulo "di potenza", con bassi valori dell'energia da accumulare.

Dalla simulazione sul ciclo di riferimento si derivano i diagrammi delle Figg. 15.10 e 15.11, da cui i valori di potenza P ed energia E caratteristici del ciclo (Tab. 15.1).

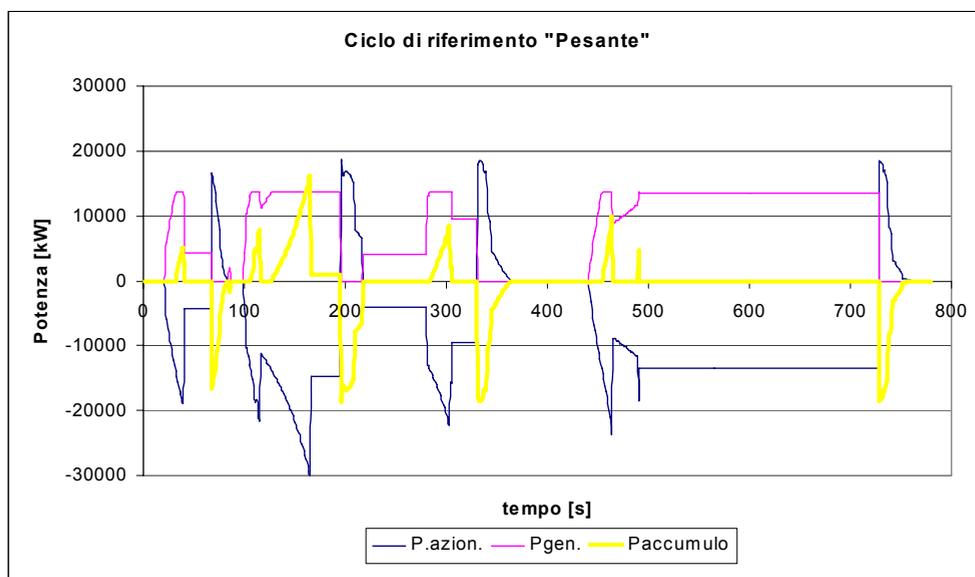


Fig. 15.10 - Andamento delle potenze nel ciclo

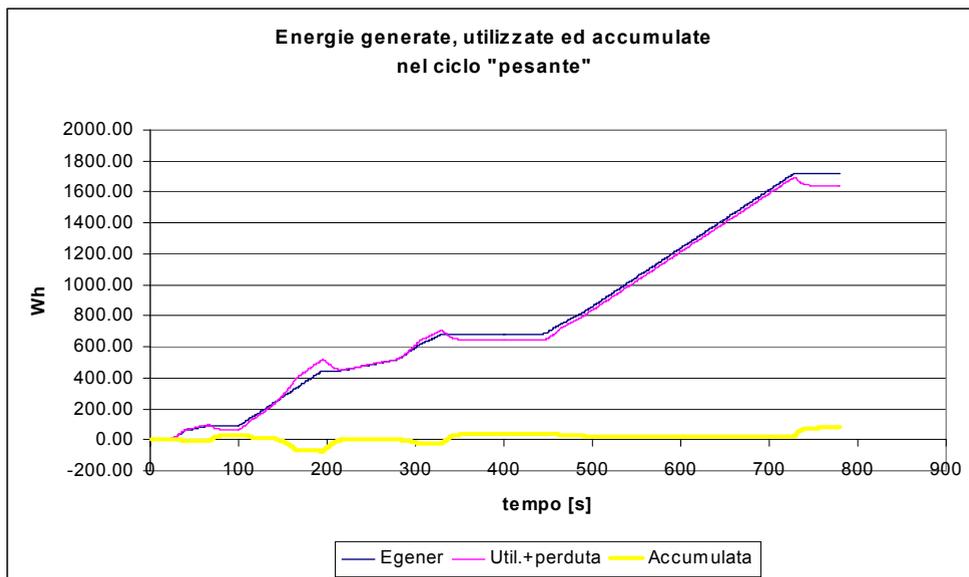


Fig. 15.11 - Andamento delle energie nel ciclo

Tab. 15.1 - Risultati della simulazione

| | |
|---|----------|
| ΔP_{max} | 16 kW |
| ΔE_{max} | 155 Wh |
| $P/E = \Delta P_{max} / \Delta E_{max}$ | 105 W/Wh |

Con un rapporto $(P/E)_{miss}$ pari a 105 kW/kWh un sistema “ideale” sarebbe quindi molto sbilanciato verso i supercondensatori, vedi il diagramma di Ragone più volte presentato nei capitoli precedenti. È invece opportuno, anche per meglio illustrare le possibilità offerte dalla combinazione opportuna di batterie e supercondensatori, porre tra le specifiche la possibilità per l’accumulo di alimentare a generatore primario spento il sistema di trazione per consentire al mezzo un’autonomia (a prestazioni ridotte, per difetto di potenza disponibile) in solo elettrico di 10 km, per cui le specifiche del sistema si modificano come mostrato in Tab. 15.2.

Tab. 15.2 - Specifiche del sistema di accumulo elettrico

| | |
|---|---------|
| ΔP_{max} | 16 kW |
| ΔE_{max} | 1650 Wh |
| $P/E = \Delta P_{max} / \Delta E_{max}$ | 10 W/Wh |

15.7.2 Parametri di progetto dell'accumulo

Per il progetto di un sistema di accumulo è necessario scegliere ed introdurre nella logica del controllo:

- il valore delle massime potenze specifiche che possono essere rese effettivamente disponibile da batterie e SC durante le fasi di accelerazione e sulle rampe
- le energie specifiche corrispondenti.

Tenendo conto delle energie specifiche dei supercondensatori e delle batterie, i primi potranno erogare la potenza massima per durate dell'ordine di poche decine di secondi, le batterie per durate dell'ordine delle decine di minuti.

Per quel che riguarda le batterie al piombo (7 \$/kg), dal diagramma di Ragone (Fig. 15.12), che riporta i valori sperimentali della potenza specifica e dell'energia specifica⁵, sceglieremo la coppia di valori 45 W/kg e 22 Wh/kg corrispondenti ad un regime di scarica a potenza costante della durata 30 1' (gradeability).

Per i SC (70 \$/kg) cercheremo invece il gradiente di potenza massimo compatibile con una durata di scarica dell'ordine della decina di secondi (accelerazione).

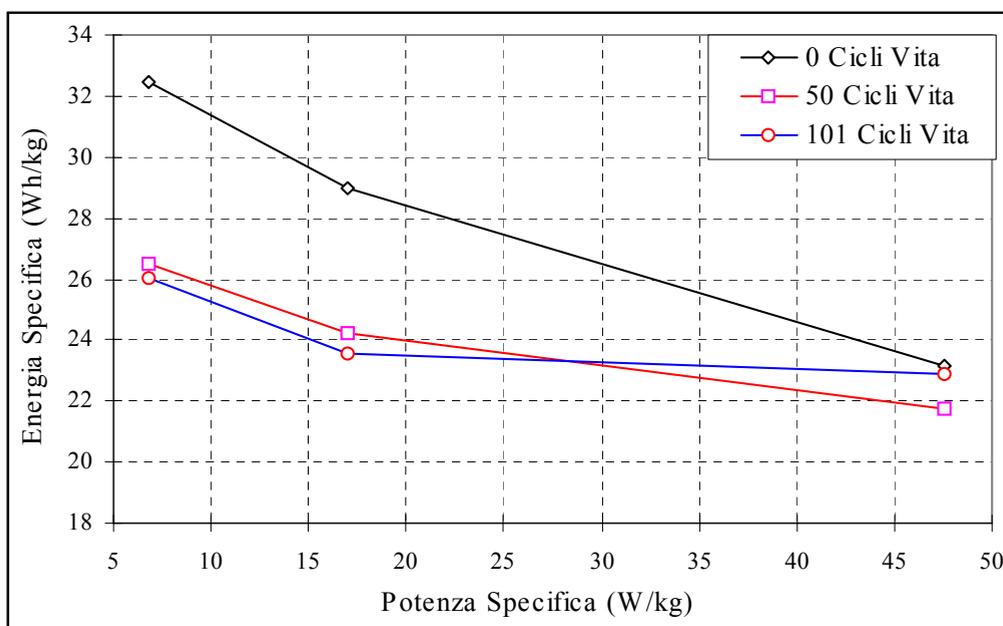


Fig. 15.12 - Diagramma di Ragone per le batterie al piombo Hawker Genesis Serie EP

⁵ Per il gradiente, che pure è essenziale per la vita della batteria, non si hanno né di indicazioni da parte dei costruttori né dati sperimentali.

Come per le batterie, la coppia di valori energia e potenza specifiche faranno quindi riferimento ad un particolare regime di scarica che si suppone rappresentativo della condizione di funzionamento. Vanno perciò preventivamente scelti il profilo di carica/scarica e le condizioni iniziali del dispositivo.

15.7.2.1 Profilo di scarica SC

Tanto in accelerazione che in frenatura, per ottenere un valore costante della coppia accelerante e frenante occorre adeguare linearmente la potenza alla velocità del mezzo. Quindi il dispositivo erogherà corrente in accelerazione ed assorbirà corrente in frenata seguendo una caratteristica a potenza crescente linearmente nel primo caso e decrescente linearmente nel secondo caso:

$$1. P(t) = V_{SC}(t) I(t) = r t$$

dove r è il rateo di potenza dP/dt ai morsetti del banco di SC, $V_{SC}(t) I(t)$ sono le correnti e le tensioni del banco.

15.7.2.2 Condizioni iniziali SC

Il dispositivo, inoltre, dovrà essere in grado in ogni momento di erogare o accettare corrente; di conseguenza dovrà sempre trovarsi in uno stato (tensione) di equilibrio intermedio tra la tensione massima e quella minima. Il sistema di controllo provvederà, a tale scopo, a ricaricarlo dopo una scarica che lo abbia portato al livello minimo accettabile di tensione e a scaricarlo dopo una carica (frenata) che lo abbia portato al livello massimo di tensione.

15.7.2.3 Simulazione comportamento SC

In generale per rappresentare i supercondensatori si adottano semplici circuiti elettrici equivalenti come quello descritto in Fig. 15.13, in cui i valori delle resistenze e della capacità possono essere costanti o funzioni di varie grandezze (in particolare della corrente). La Epr schematizza il fenomeno dell'autoscarica, fenomeno per il quale un supercondensatore lasciato a riposo carico alla tensione massima si riporta a tensione nulla in un tempo variabile tra ore e giorni: il rapporto Epr/Esr può variare tra 10^3 e 10^6 , per tale motivo è lecito trascurare la Epr nelle normali condizioni di funzionamento.

Le equazioni utilizzate sono quindi le seguenti:

$$2. Q(t) = C U_c(t)$$

$$3. U_c(t) - I(t) R_{int} = V_{SC}(t)$$

Si riportano in Tab. 15.3 le caratteristiche del dispositivo e gli altri parametri di funzionamento. La tensione massima prevista di funzionamento dei supercondensatori è quella fornita dal costruttore dei dispositivi, e quindi 2,7 V.

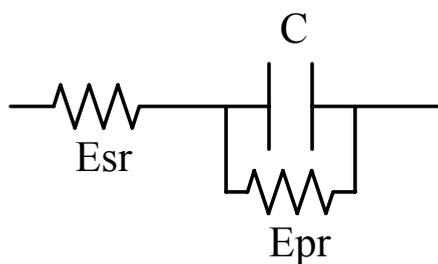


Fig. 15.13 - Circuito elettrico equivalente SC

Tab. 15.3 - Caratteristiche dei supercondensatori

| | | |
|------------------------------|-------|-----|
| <i>Boostcap 1200 F/2.5 V</i> | | |
| Capacità | 1200 | F |
| Imax | 300 | A |
| Resistenza equivalente | 0,016 | Ohm |
| Peso | 0,3 | kg |

La tensione minima prevista di funzionamento dei supercondensatori è stata calcolata considerando l'interfaccia utilizzata ed è pari a 1,1 V.

Limitando la tensione minima, inoltre, si riesce a limitare la potenza dissipata a fine scarica, (quando la tensione è bassa e quindi la corrente è massima) e si mantiene così un buon valore per il rendimento dell'accumulo.

La tensione di equilibrio è stata infine scelta pari a 1,9 V. Il range di funzionamento è quindi compreso tra 1,9 e 2,7 V in carica e 1,9 e 1,1 V in scarica.

Per trovare la massima potenza utilizzabile, e da questa il parametro che ci occorre per la progettazione, la massima potenza specifica, si calcola il valore del rateo di potenza dP/dt , che nel tempo prefissato porta alla tensione minima, partendo da quella di equilibrio.

La simulazione del circuito (equazioni 1,2,3) dà i risultati rappresentati in Tab. 15.4, dove si vede che la coppia di valori corrispondenti "potenza specifica" ed "energia specifica" per una scarica di 12s sono 650 W/kg e 0,8 Wh/kg.

Tab. 15.4 - Risultati della simulazione

| | <i>Scarica</i> | <i>Unità</i> |
|-----------------------|----------------|--------------|
| Tempo | 12 | s |
| Pmaxsp | 450 | W/kg |
| Esp | 0,8 | Wh/kg |
| Rendimento di scarica | 93% | % |

15.7.3 Risultati dello studio

Lo studio effettuato per via grafica consente di individuare il semplice nel caso considerato (Fig. 15.14).

I tre vertici, punti di minimo o di massimo della funzione costo, sono numerati in Fig. 15.14 mentre in Fig. 15.15 e in Tab. 15.5 sono riportati i tre valori della funzione costo, che comprendono il valor massimo e quello minimo.

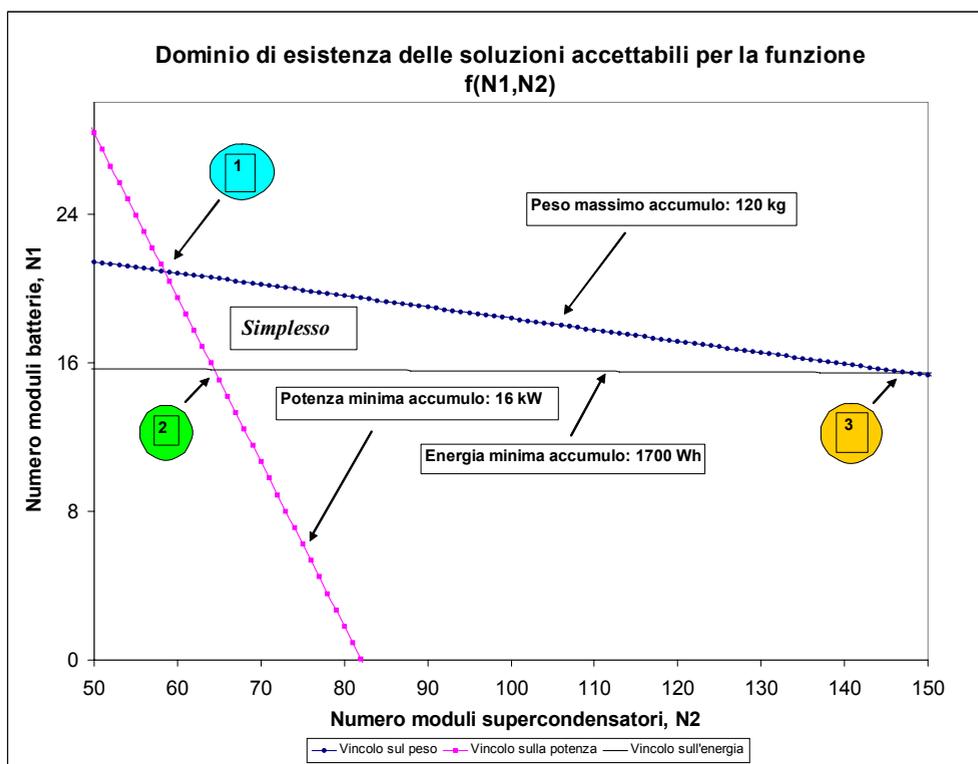


Fig. 15.14 - Dominio di esistenza delle soluzioni accettabili

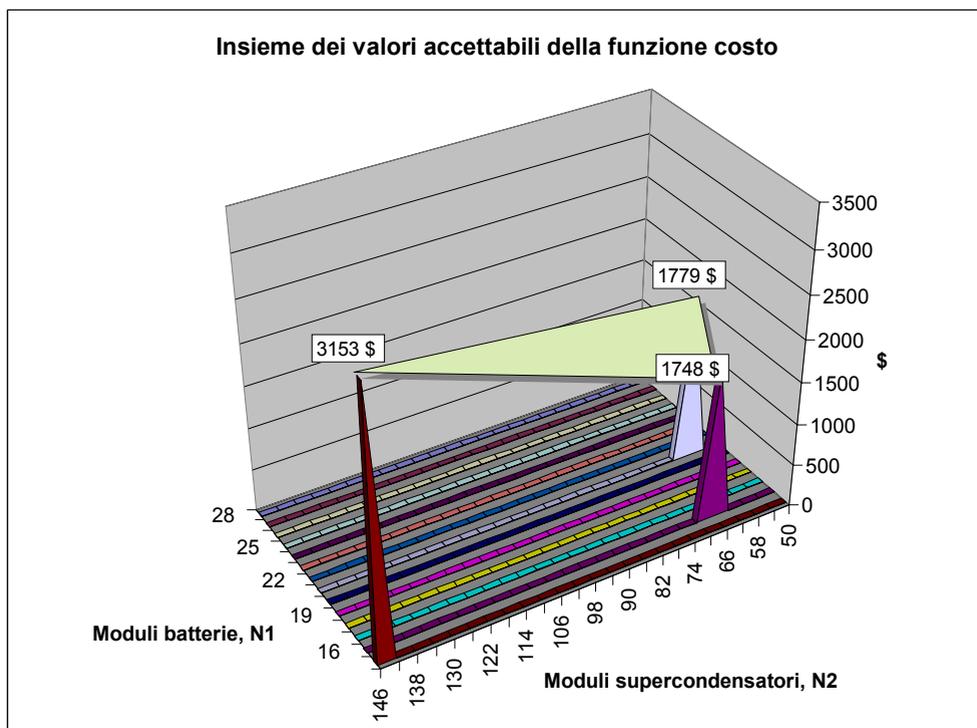


Fig. 15.15 - Insieme dei valori accettabili della funzione costo

Tab. 15.5 - Soluzioni ottenute per l'accumulo "misto", per confronto l'accumulo semplice

| | <i>Soluzione 1</i> | <i>Soluzione 2</i> | <i>Soluzione 3</i> | <i>Solo batterie (Pb)</i> |
|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| <i>N2</i> | 58 | 66 | 147 | |
| <i>N1</i> | 21 | 16 | 15 | 73 |
| <i>V batterie</i> | 252 | 192 | 180 | 871 |
| <i>V supercondensatori</i> | 145 | 165 | 367,5 | |
| <i>Peso totale</i> | 120 | 98 | 118 | 356 |
| <i>Potenza totale</i> | 16 | 16 | 32 | 16 |
| <i>Energia totale</i> | 2278 | 1741 | 1652 | 7822 |
| <i>P/E</i> | 7 | 9 | 19 | 2,0 |
| <i>Costo totale</i> | 1779 | 1748 | 3153 | 2524 |

Come può vedersi in Tab. 15.5, le prime due soluzioni sono quasi equivalenti in termini di costo, e sceglieremo quindi la soluzione 2), quella "esatta", che è anche quella di peso minimo.

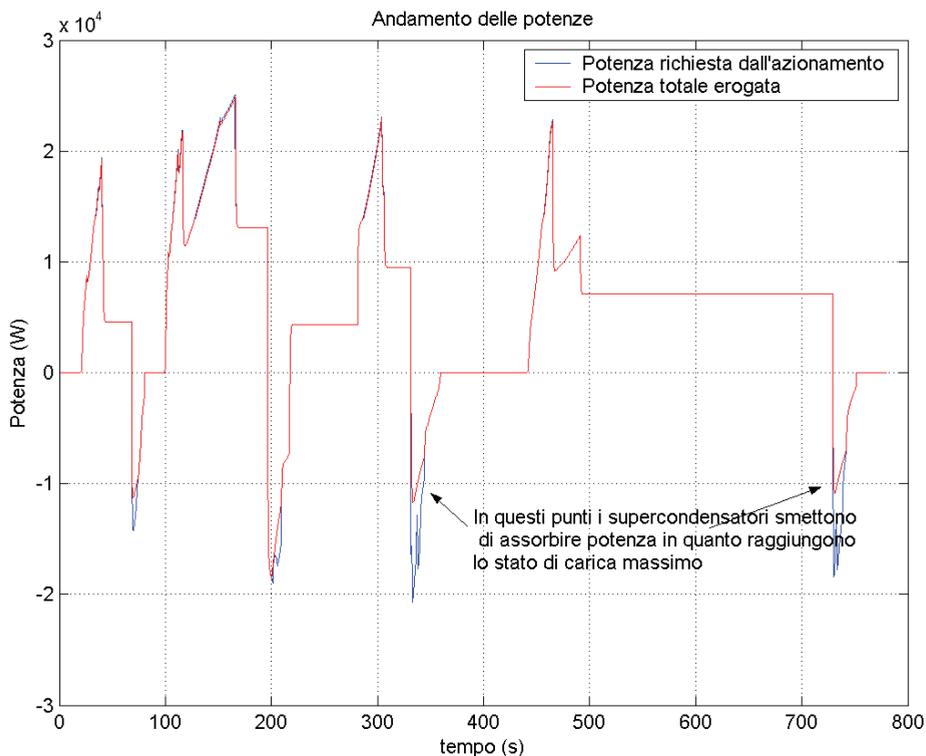


Fig. 15.16 - Esecuzione del ciclo con i soli supercondensatori

A questo punto è necessario verificare la scelta progettuale, simulando il ciclo con un modello circuitale completo. L'accumulo così dimensionato risulta in grado di consentire l'esecuzione di tutte le fasi di accelerazione del ciclo prescelto (Fig. 15.16).

I supercondensatori non sono invece in grado di recuperare tutta l'energia disponibile in frenata, non per un limite sulla corrente (Fig. 15.17), ma per un problema di raggiungimento dello stato di carica massimo e quindi di energia accumulabile (Fig. 15.18).

Una gestione dei supercondensatori che tenga meglio conto di questi aspetti, come quella basata sulla variazione della tensione di equilibrio in funzione della velocità del mezzo, potrebbe migliorare ancora il rendimento energetico del sistema.

In definitiva il dimensionamento di prima approssimazione è dato in Tab. 15.6, insieme a quello ottenuto il metodo downhill (più oneroso in termini di tempo di calcolo), e per confronto si riporta anche il dimensionamento di una batteria al litio di uguale potenza massima (16 kW).

Nella Tab. 15.7 sono riportati i valori numerici dei parametri utilizzati per i tre dimensionamenti.

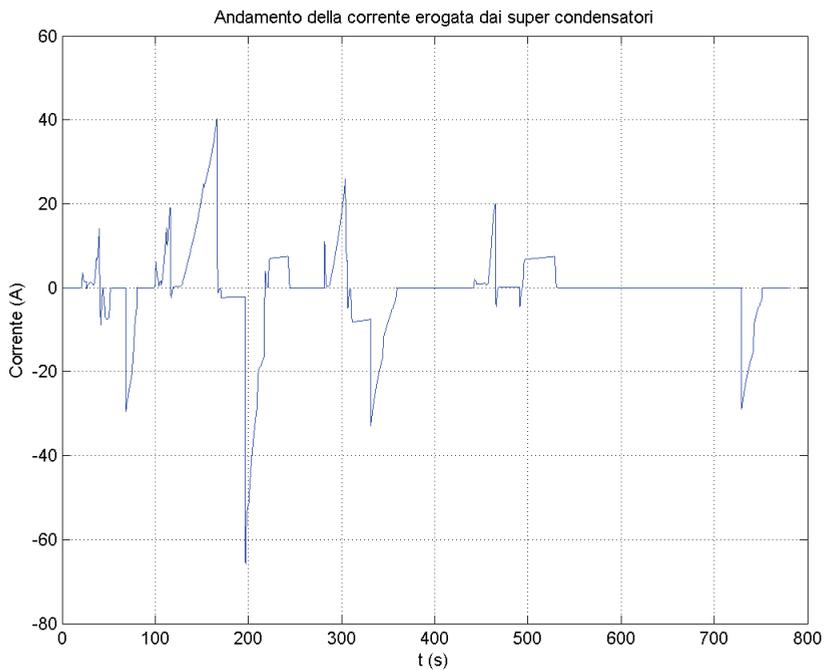


Fig. 15.17 - Corrente erogata dai supercondensatori

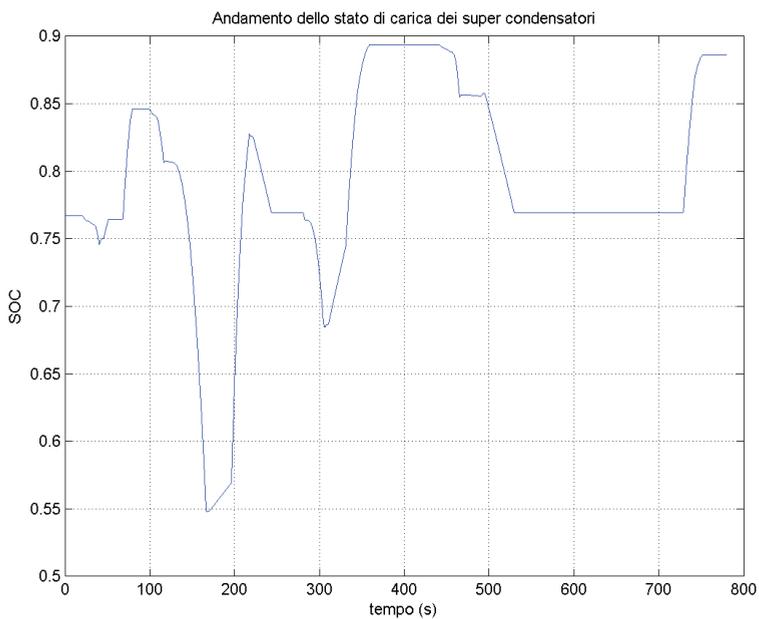


Fig. 15.18 - SOC dei supercondensatori

Tab. 15.6 - Dimensionamento risultante

| | <i>Batteria al Litio</i> | <i>Accumulo misto, metodo del semplice</i> | | <i>Accumulo misto, metodo Downhill</i> | |
|-------------------|--------------------------|--|--------------|--|--------------|
| | Tipo e numero componenti | Tipo e numero componenti | Pesi e costi | Tipo e numero componenti | Pesi e costi |
| Supercondensatori | / | 1200 F/n. 66 moduli | 20 kg | 200 F/n. 72 moduli | 4 kg |
| Batterie | 12Ah/n. 73 moduli | 13 Ah/n.16 moduli | 78.4 kg | 13 Ah/n.19 moduli | 93 kg |
| Peso totale | 80 kg | | 98 kg | | 97 kg |
| Costo | 6640 \$ | | 1748 \$ | | 1347 \$ |

Tab. 15.7 - Valori numerici dei parametri utilizzati per i tre dimensionamenti

| | <i>Batteria al litio</i> | <i>Piombo + Supercondensatori</i> | |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------|
| Energia specifica batteria | 110 | 22 | Wh/kg |
| Energia specifica supercap | | 0,8 | Wh/kg |
| Potenza specifica batteria | 0,2 | 0,045 | kW/kg |
| Potenza specifica supercap | | 0,45 | kW/kg |
| Costo specifico batteria | 750 | 250 | \$/kWh |
| Costo specifico supercap | | 85 | \$/kW |

15.8 Conclusioni

Dallo studio risulta evidente come non sia possibile affermare in termini generali quali sia preferibile tra i diversi accumuli elettrici disponibili (batterie, supercondensatori, volani, misto); la prima verifica è sempre quella relativa alla missione del veicolo, rappresentata sinteticamente dal rapporto (P/E)_{miss}, da confrontare con il diagramma di Ragone (vedi capitolo dedicato al dimensionamento):

- se il valore di tale rapporto è compreso tra 1 e 10 la scelta più opportuna è quella di una batteria⁶, di energia o di potenza secondo che il parametro sia più prossimo ad 1 o a 10
- se (P/E)_{miss} è maggiore, si verifichi l'applicabilità dell'accumulo misto⁷
- se si avvicina a 50, è preferibile l'uso dei supercondensatori da soli.⁸

⁶ È il caso della locomotiva GE, [11], per la quale P = 1500 kW, E = 750 Wh, P/E = 2.

⁷ È il caso dell'ibrido minimo, [12], dove P = 15 kW, E = 1 kWh, P/E = 15.

⁸ È il caso del treno regionale [13], dove P = 800 kW (1' di scarica), E = 18 kWh, P/E = 43.

Nel caso di applicabilità dell'accumulo misto, occorre ulteriormente riflettere, caso per caso, sui seguenti punti:

- 1) complessità, affidabilità e costo del sistema
- 2) caratteristiche del sistema di generazione
- 3) criterio di dimensionamento, sul ciclo o sulle prestazioni.

Per quanto riguarda il punto 1), la soluzione tradizionale è più semplice e, apparentemente, più affidabile; l'affidabilità va vista però anche in termini di vita delle batterie, che negli ibridi è spesso compromessa dalla gravosità dei carichi elettrici cui sono sottoposte, in genere maggiori che nei veicoli a batteria. Introdurre l'accumulo misto comporta quindi svantaggi in termini di costo, peso ed affidabilità dell'elettronica, ma aumenta l'affidabilità delle batterie e ne riduce costi e pesi. È inoltre possibile pensare a strutture di convertitori che limitino al minimo gli svantaggi della maggiore complessità.

Il punto 2) è di importanza fondamentale. Si consideri ad esempio la differenza tra una cella a combustibile alimentata a idrogeno ed un motore a combustione interna: nel primo caso non si hanno emissioni e la dinamica del convertitore di energia primaria può essere estremamente elevata, mentre per limitare le emissioni di un motogeneratore occorre farlo lavorare in condizioni semistazionarie.

Inoltre, per non inquinare, ad un ibrido provvisto di motogeneratore può essere talvolta richiesto di marciare a motore spento (in solo elettrico), mentre non è necessario spegnere la cella, a meno che non sia alimentata da un reformer.

L'accumulo misto trova giustificazione, quindi, più nel caso del motogeneratore che in quello della cella a combustibile: infatti sembra conveniente utilizzare la cella da sola o accoppiata ai supercondensatori per i picchi di potenza, ottenendo così un sistema semplice da gestire ed estremamente affidabile. Nel caso di un bus con motogeneratore la necessità di limitare la variazione di potenza di quest'ultimo porta a dare importanza alle batterie ed anche, in modo naturale, ad introdurre i gradienti ed utilizzare i supercondensatori, per cui occorrerebbe prendere in considerazione questo esempio negli studi futuri.

Il punto 3) (dimensionamento su ciclo o per prestazioni) è anch'esso fondamentale per la scelta di adottare un accumulo misto: se il veicolo è dimensionato sulle prestazioni, la potenza del convertitore di energia primaria deve essere almeno uguale alla massima continuativa assorbita dall'azionamento e questo rende inutile un accumulo che abbia più energia di quella necessaria per la durata consentita del sovraccarico, in genere 1-2 minuti. In questo caso l'installazione di supercondensatori a bordo può essere sufficiente ed è comunque giustificabile in base alle loro capacità di recupero energetico, basso peso ed elevata dinamica, che permettono, in un circolo virtuoso, di ridurre la potenza del convertitore di energia primaria ed il peso del veicolo, aumentando inoltre l'efficienza.

L'uso delle batterie nel caso di un veicolo dimensionato sulle prestazioni ha senso invece solo se si tratta di un ibrido con motogeneratore per il quale si vuole limitare al massimo la dinamica del motore termico. È possibile in questa condizione avere casi in cui un ridotto pacco batterie serva da supporto ai supercondensatori perché questi non possiedono tutta l'energia necessaria a soddisfare nel tempo tutta la richiesta di potenza.

Una condizione, infine, che rende obbligatorio l'utilizzo delle batterie a bordo è la richiesta di marcia in solo elettrico. Se si ha spesso questa esigenza sui veicoli dimensionati su di un ciclo (che comprende appunto una parte in solo elettrico), è però poco probabile che essa venga introdotta su di un veicolo dimensionato sulle prestazioni perché comporterebbe un notevole aumento del peso del costo e dell'ingombro del sistema di generazione/accumulo. Si possono quindi considerare casi di veicoli dimensionati sulle prestazioni equipaggiati con accumulo misto, ma come casi particolari, dove la capacità energetica delle batterie è comunque molto ridotta.

Bibliografia

- [1] "Combining Ultra-Capacitors with lead-acid Batteries", B.J.Arnet, L.P. Haines, Solectria Corporation, EVS-17, Montreal, 2000
- [2] "Ultracapacitor and Battery Storage System Supporting Fuel-Cell Powered Vehicles, F. Crescimbin, A. Di Napoli, L. Solero, University "ROMA TRE", Dept. of Mechanical & Industrial Engineering, G. Lo Bianco, M. Pasquali, G. Pedè, ENEA Research Center "Casaccia", Electrical & Hybrid Vehicles Testing Laboratories, EVS 18, Berlin 2001
- [3] "Hybrid Storage System: an optimization case" A. Di Napoli, University Roma 3, G. Pedè, ENEA, in "Hydrogen and Its Future as a Transportation Fuel", PT-95, SAE 2003
- [4] "A Fuel cell powered propulsion system supported by a Hybrid UC Battery Storage", A. Di Napoli, F. Crescimbin, A. Lidozzi, L. Solero, M. Pasquali, G. Pedè, E. Rossi, Evs-20 Long Beach - California 2003
- [5] Inductor tied Ultracapacitor Module devoted to 12V Battery Starter Alternator Systems, Luca SOLERO, Angelo PUCETTI, Michele PENNESE, Magneti Marelli Powertrain S.p.A., Global Powertrain Congress, 2007
- [6] "Experimental Validation of an ESS-Battery Combination as a Hybrid Source for Heavy Duty Vehicles", O. Briat, J.M. Vinassa, W. Lajnef, S. Azzopardi, C. Zardini, J.L. Aucoutourier, IXL CNRS UMR 5818, EVS-20
- [7] "Energy Management System for Combined Electric Storage System for High Energy and High Power", R. Stanislawski, Univ. of Bremen, C. Ament, University of Freiburg, C. Bredemeier, G. Goch, University of Bremen, EVS-20

- [8] "Sistemi di alimentazione mista per trazione stradale: una possibile tecnica di controllo", S. D'Arco, D. Iannuzzi, E. Pagano, P. Tricoli, Università di Napoli "Federico II", 15° Seminario ANAE, Bressanone, 2004
- [9] "An electric storage system optimization study, based on the "down-hill" method, for a FC hybrid car", F.Parasiliti, M. Pepe, Università dell'Aquila, M. Pasquali, G. Pede, ENEA, EVS-21, April 2005, Monaco
- [10] "Sistema di Generazione a Celle a Combustibile ed Accumulo Misto. Criteri di Modellazione, Principi di Dimensionamento, Metodologia di Gestione" F. Parasiliti, M. Pepe, Università dell'Aquila, M. Pasquali, G. Pede, ENEA, RT/2006/1/ENE
- [11] "Test Results In An Electric Vehicle Using A Combination Of Ultracapacitors And Zebra Battery", J. W. Dixon, I. Nakashima, F. Arcos, M. Ortúzar, Pontificia Universidad Católica De Chile, Evs-22, Yokohama, 2006
- [12] "Application of energy storage batteries to hybrid locomotives and mine trucks", L. Salasoo, Ajit Kane, R.D. King, T. Richter, GE Global Research; Ajith K. Kumar, GE Transportation Systems, EVS-23, Anaheim, 2007
- [13] "Ultracapacitors and Batteries for Hybrid Vehicle Applications", Andrew Burke, Marshall Mille, Eric Van Gelder, University of California, Davis, EVS-23, Anaheim, 2007
- [14] "L'ibrido e l'ambiente nella trazione ferroviaria", R. Cheli, Trenitalia; A. Laganà, FS; A. Di Donato, Università di Pisa; G. Pede. ENEA, Ingegneria Ferroviaria, Novembre 2007
- [15] "Tecnologie elettriche e nanotecnologie per accumulatori avanzati", Angelo Puccetti e Michele Pennese, Technology Review –La Rivista del Massachusetts Institute of Technology per l'Innovazione, Edizione Italiana N°5 settembre-ottobre 2008
- [16] Manuale di Ricerca Operativa, M. Sasieni, A.Yaspan, L. Friedman, Franco Angeli Editore, 1978

CAPITOLO 16

METODI SPERIMENTALI ED APPARECCHIATURE/IMPIANTI DI PROVA

Fernando Ortenzi *, Ennio Rossi **

* *Centro di ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL),
"Università di Roma La Sapienza"*

** *ENEA, Tecnologie per l'Energia, Fonti Rinnovabili e Risparmio Energetico*

16.1 Il freno motore

Come è ben noto i banchi freni sono attrezzature per misurare le prestazioni di un motore mediante l'erogazione controllata di potenza da parte del motore in prova. Se il sistema di trazione è elettrico-ibrido ne va provato il funzionamento anche in frenata, quando l'erogazione di potenza va dal freno all'azionamento.

Le principali grandezze da misurare sono: velocità di rotazione e momento torcente trasmesso da un albero all'altro.

La velocità di rotazione è misurabile con una dinamo tachimetrica o con un encoder. Il primo sistema è in genere utilizzato per le esigenze di controllo del freno dal momento che il segnale è analogico, per cui è continuo e non necessita di conversione.

Il secondo sistema è di tipo digitale basato sul conteggio di impulsi; è di grande precisione ed in genere è utilizzato nei sistemi basati su software per la visualizzazione e la misura della grandezza.

Anche per la misura della coppia trasmessa attraverso la flangia di accoppiamento esistono due tecniche: l'impiego di un torsionmetro tra i due alberi accoppiati o l'impiego di una cella di carico e dell'allestimento basculante del freno. Entrambe le tecniche sono affidabili e precise nei limiti della bontà degli apparecchi e dei convertitori.

In entrambi i sistemi di misura e purché il senso di rotazione non cambi il segnale proveniente dal sensore di coppia è di segno convenzionalmente positivo in caso di motore in tiro e freno in azione frenante (flusso di energia dal motore al freno); di segno negativo in caso di motore in fase di freno-motore e freno in azione propulsiva (flusso di energia dal freno al motore).

Si riassumono le condizioni operative nella Tab. 16.1. dove il verso di rotazione positivo è convenzionalmente marcia avanti e la coppia positiva è, convenzionalmente, motore in tiro, freno in opposizione.

Per il calcolo dell'azione frenante si rimanda alla sezione dedicata al banco a rulli.

Tab. 16.1 - Condizioni operative

| VELOCITÀ | COPPIA | |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | Positiva | Negativa |
| Positiva (marcia avanti) | Motore in tiro, freno resistente | Freno in tiro, motore resistente |
| Negativa (marcia indietro) | Freno in tiro, motore frenante | Motore in tiro, freno resistente |

16.1.1 Strategie di controllo dei freni

I freni motore tradizionalmente impiegati per le prove di motori termici sono in genere utilizzati per prove di lunga durata, con periodi di funzionamento a vari regimi di rotazione e con varie parzializzazioni del sistema di alimentazione di carburante (pedale dell'acceleratore).

Le prove sono finalizzate alla costruzione delle curve caratteristiche in condizioni stazionarie. Se il freno è stato progettato in questa ottica di funzionamento, l'operatore imposta un programma temporale di velocità di rotazione del freno ed un parallelo programma temporale di apertura dell'organo accelerante del motore. Questa logica di controllo può essere chiamata "preprogrammata".

Altra strategia di controllo di un freno in alternativa alla precedente consiste nel realizzare un algoritmo per il calcolo in linea della coppia frenante del freno, cioè un controllo che per ogni passo temporale del sistema di regolazione del freno esegua la misura della velocità, esegua il calcolo $F=f(v)$ della $\Delta v/\Delta t$ e comandi il freno affinché eroghi il valore di forza resistente risultante della formula sopra detta. Questa logica di controllo può essere denominata "real time".

Entrambe le logiche possono realizzare la similitudine del veicolo al comportamento su strada ma, oltre ad alcune differenze che si vedranno, solo la seconda permette di "fare un giro", cioè mettersi ai comandi dell'azionamento e accelerare e frenare a piacimento per vedere la risposta immediata del veicolo simulato.

16.1.2 Gestione della prova con comando manuale

Il banco può essere condotta in modalità "manuale" quando si eseguono prove stazionarie, oppure in "automatico", per prove che richiedono frequenti variazioni di condizioni, ripetitività, durata notevole.

Il comando manuale del freno viene effettuato imponendo al freno con un apposito potenziometro un desiderato valore di velocità o di coppia.

Il comando manuale del motore viene effettuato tramite una manopola che regola la potenza del motore. Dal momento che freno e motore sono meccanicamente accoppiati ne risulta che chi dei due può erogare una coppia maggiore governa il gruppo. Per esempio mettendo in prova un motore debole rispetto al freno il comportamento del gruppo sarà guidato dal freno. In questo caso chiedendo una certa velocità al freno si è certi che questa verrà raggiunta e mantenuta, qualsiasi sia la posizione del potenziometro acceleratore del motore in prova. La posizione dell'acceleratore del motore in prova deciderà del valore della grandezza non bloccata, cioè la coppia, che quindi potrà risultare positiva o negativa, e il motore in prova funzionerà da motore in tiro o da freno motore. Questa configurazione, detta controllo in giri del freno, è particolarmente tranquillizzante per l'operatore perché il gruppo è perfettamente controllato.

Si può al contrario chiedere al freno di erogare un dato momento torcente. In questo caso il potenziometro acceleratore del motore in prova funzionerà da comando di velocità e permetterà di esplorare un campo di velocità entro il quale è in grado di contrastare la coppia del freno. Questa modalità di funzionamento, denominato controllo del freno in coppia, comporta per l'operatore una certa attenzione perché non deve scendere con il potenziometro acceleratore del motore al di sotto di una certa soglia. Se ciò dovesse accadere, o peggio se dovesse mancare completamente l'alimentazione al motore, questo verrebbe trascinato in retromarcia (velocità negative) dal freno fino a raggiungere un probabile fuori giri (fuga causata dal freno). Un paragone con il caso di un veicolo reale su una strada potrebbe essere la circostanza di una marcia in salita in cui si venga a spegnere il motore: la vettura comincerà a retrocedere a velocità crescente.

Si è detto della prova di un motore di potenza molto inferiore a quella massima del freno, ma bisogna dire che la prova di un motore più potente del freno è in partenza incompleta in quanto non si riuscirebbero ad evidenziare le massime prestazioni del motore stesso. L'uso corretto del freno è quindi in un campo di utilizzo in cui la sua curva di coppia è superiore a quella del motore.

16.1.3 Gestione in automatico

I comandi sia del freno che del motore possono essere automatizzati. Esiste con i moderni sistemi di controllo computerizzati la possibilità di impostare un andamento temporale desiderato per una determinata grandezza. Ciò sia per la coppia che per la velocità.

Il raggiungimento del valore desiderato della grandezza (riferimento) è assistito da un regolatore funzionante secondo la logica PID realizzato da una routine software. In questo modo la grandezza di riferimento viene raggiunta nel più breve tempo possibile e senza gravi penzolamenti (smorzamento critico).

I PID impiegati sono quindi due, uno per controllare la grandezza impostata sul freno e uno per controllare la grandezza impostata sul motore.

È chiaro che se al freno si chiederà l'esecuzione di un profilo di velocità nel tempo, al motore si chiederà un profilo di coppia e viceversa. Ciò in quanto la richiesta di un dato valore della stessa grandezza, per esempio velocità = 30 km/h ad entrambi i componenti, cioè freno e motore, è realizzabile in corrispondenza di infiniti valori di coppia, per cui la condizione operativa non è definita univocamente.

Esistono pertanto due modi di controllo del gruppo motore-freno, come di seguito illustrato.

Si noti che con questa tecnica è possibile, circostanza particolarmente utile nel caso degli azionamenti ibridi, programmare le velocità e le coppie con valori che corrispondono esattamente a quelli che sarebbero eseguiti con l'intera vettura in marcia. Infatti un semplice calcolo permette di tener conto dei rapporti di riduzione al cambio impostati e quindi permette di impostare velocità di rotazione pari a quelle tenute dal motore qualora fosse installato nel cofano della vettura. Parimenti le coppie possono essere impostate tenendo conto delle resistenze all'avanzamento, comprensive di inerzia, pendenza ecc. Si riesce in sostanza a simulare l'esecuzione la marcia su strada di una vettura avendo a disposizione il solo azionamento di trazione.

16.1.3.1 Controllo "freno in giri, motore in coppia"

Produce una perfetta esecuzione delle velocità richieste dal ciclo; il riferimento di coppia può invece essere eseguito meno perfettamente, e ciò dipende anche dalla docilità del motore in prova.

Si noti bene che occorre una verifica preventiva del fatto che il motore sia effettivamente in grado di eseguire il ciclo. In caso contrario l'operatore sarebbe ingannato dal fatto che le velocità sono perfettamente rispettate e perdere di vista il fatto che il tracciato della coppia reale è inferiore a quello impostato.

Altra condizione particolare che può verificarsi è quella della energica frenata, la cui energia venga in parte recuperata (implica l'esistenza di un sistema motore in prova in grado di effettuare la frenata a recupero) ed in parte dissipata nei freni ad attrito.

Siccome in questo tipo di banchi in genere non esiste un reale freno ad attrito si verifica una discrepanza tra la coppia di riferimento impostata (calcolata in base alla decelerazione richiesta) e quella effettivamente conseguita. Ciò a causa del fatto che la parte di coppia destinata alla frenatura dissipativa non viene realizzata.

Il fatto, sebbene esteticamente non bello, non produce effetti ai fini dei risultati e tutte le considerazioni energetiche – meno quelle sulla frenata dissipativa – sono salve.

16.1.3.2 Controllo “freno in coppia, motore in giri”

Questa modalità operativa è la più simile a quella “real time” adottata nei banchi a rulli, ma sebbene possa apparire ad una prima valutazione più aderente alla realtà di marcia di una vettura su strada, può portare ai seguenti inconvenienti:

- in caso di perdita di potenza del motore in prova (interruzione dell'alimentazione elettrica se trattasi di motore elettrico o del flusso di carburante se trattasi di motore termico) il freno trascina il motore in retromarcia fino a fuorigiri inaccettabili;
- in fase di rallentamento, qualora il motore in prova abbia un effetto frenante insufficiente a produrre la decelerazione richiesta, l'assenza del freno ad attrito fa sì che il riferimento di coppia non viene raggiunto, la decelerazione richiesta non viene eseguita e la velocità decresce più lentamente del dovuto. Ciò ovviamente rende vana la prova;
- in caso di mancato o difettoso sincronismo tra i riferimenti di velocità e di coppia, o più semplicemente nel caso frequente di risposta del motore più lenta di quanto faccia il freno, si ha, in fase di brusca accelerazione, che ad una improvvisa coppia erogata dal freno non corrisponde l'altrettanto immediata ed energica risposta del motore. Il motore potrebbe fermarsi e addirittura andrebbe in retromarcia;
- essendo la regolazione della velocità affidata al motore – che presumibilmente ha un controllo meno preciso di un freno costituito da un azionamento elettrico – il rispetto della cinematica del ciclo potrebbe essere problematico e la percorrenza chilometrica di ogni ciclo potrebbe non essere costantemente ripetuta.

16.2 Il banco a rulli

Lo strumento principale per la prova di un prototipo, sia esso convenzionale che ibrido, è il banco a rulli. Consiste in una serie di apparecchiature il cui scopo è quello di permettere al veicolo di funzionare pienamente in tutte (o quasi) le sue funzionalità ma in una condizione di veicolo fermo. Rispetto alle prove di componenti al banco porta vantaggi per quanto riguarda la verosimiglianza della prova all'uso cui la vettura è destinata: i componenti non sono più al banco con caratteristiche simulate o calcolate, ma sono realmente montati su una vettura vera. Inoltre sono verificabili i comportamenti di parti non prese in considerazione alle prove al banco, quali pneumatici, cambio, freni, impianti elettrici, di raffreddamento ecc. Lo svantaggio consiste invece nella minore ripetitività delle prove rispetto a quelle al banco.

Infatti al banco a rulli intervengono fattori quali il riscaldamento dei pneumatici, la minor precisione di servomeccanismi o addirittura l'operato di un gui-

datore che portano fattori di aleatorietà nella prova che non esistono nelle prove di componenti al banco.

La prova al banco a rulli ha evidenti vantaggi in confronto alla prova su strada dal momento che avere una vettura fissa in un ambiente di sperimentazione ben attrezzato permette l'uso di strumenti e metodi di lavoro impossibili a bordo di una vettura in corsa (si consideri ad esempio la difficoltà di impiegare strumenti di misura alimentati a 220 V nell'abitacolo dei veicoli).

È pur vero che al banco a rulli alcune caratteristiche della marcia dal vero non sono realizzabili e pertanto alcuni componenti del prototipo in effetti non lavorano. Per esempio non è simulabile l'esecuzione di curve, le sospensioni sono ferme, la circolazione dell'aria intorno al veicolo non c'è, non esiste la pioggia, la neve, il vento trasversale ecc.

Le tre fasi di sperimentazione del prototipo, al banco prova, al banco a rulli e su strada sono in definitiva tre passi di successivo avvicinamento al funzionamento reale del veicolo: al banco prova si ottengono risultati molto precisi, con errori inferiori all'1%, di caratteristiche di componenti in condizioni di laboratorio che raramente si verificheranno nell'uso reale; al banco a rulli si misurano prestazioni vicine alla realtà ma con errori del 5-10%; su strada si verifica l'impiego pressoché reale ma con limitata strumentazione e risultati orientativi.

I rulli, posti sotto le ruote motrici, raccolgono la potenza della vettura e la trasmettono al sistema di dissipazione. In effetti si oppongono al movimento delle ruote fornendo la giusta resistenza al movimento di queste. I rulli possono essere due per ogni ruota motrice, affiancati e con assi paralleli in modo che nella culla da essi generata possa sistemarsi la ruota del veicolo. Il banco in questo modo viene detto birullo. Sotto ogni ruota motrice potrebbe trovarsi un solo rullo; è il tipo monorullo. Il primo tipo è più semplice ed economico e consente un rapido posizionamento della vettura. Il secondo tipo permette velocità più elevate dal momento che il rullo, di dimensioni maggiori, comporta un contatto minore con lo pneumatico e in una sola zona.

L'intera potenza resa disponibile dal motore alla periferia delle ruote motrici deve venire dissipata in un opportuno sistema di smaltimento. Come per i banchi prova i metodi di dissipare energia si sono evoluti negli anni e i dispositivi attualmente in uso sono i seguenti:

- freni elettrici a correnti parassite. Consentono un ampio intervallo di potenze frenabili e permettono una buona regolazione della coppia frenante. Affidabili ed economici sono ancora diffusi nel campo automobilistico;
- freni a macchina elettrica reversibile e controllata. È il metodo migliore in quanto controllando su quattro quadranti, consente due sensi di rotazione dei rulli, e può simulare le forze resistenti all'avanzamento o al contrario, come per la marcia in discesa, forze esterne acceleranti.

Inoltre con questi freni non esiste il problema della dissipazione dell'energia in quanto la macchina elettrica è sempre in parallelo con la rete, per cui l'energia viene totalmente inviata in rete realizzando con questo anche una certa economia sui consumi elettrici dell'impianto. Le macchine elettriche sono controllabili in coppia e in velocità ed in genere, almeno per potenze fino a 150 kW, sono azionamenti in corrente continua.

Esistono anche banchi a rulli in cui l'energia viene immagazzinata nella rotazione di opportuni volani che vengono, al termine della prova, rallentati con freni ad attrito. Sono impiegati per la sola prova di accelerazione e consentono con un impianto semplice di poter provare vetture molto potenti.

I moderni banchi, oltre che funzionare su 4 quadranti, sono equipaggiati con software per l'acquisizione dei dati, per il controllo del freno e per la gestione globale della prova.

Il funzionamento del banco a rulli è il seguente: la vettura in prova eroga potenza ed il dissipatore del banco vi si oppone. La potenza da frenare viene spesso erroneamente identificata come quella erogata dal motore. Indicate con:

P_m = potenza erogata all'uscita dell'albero motore;

P_t = potenza dissipata nella trasmissione (cambio, differenziale, riduzione finale);

P_r = potenza dissipata dai pneumatici delle ruote;

P_{br} = potenza frenante offerta dal banco a rulli;

risulta evidentemente che ad ogni istante deve essere verificata la relazione:

$$P_m = P_t + P_r + P_{br}$$

da cui è chiaro che la potenza che finisce nel sistema di dissipazione del banco è una frazione di quella massima del motore. Rimane comunque come condizione di garanzia di stabilità e buon controllo del banco che la potenza del sistema frenante sia esuberante rispetto alla necessità. Per esemplificare, nel caso di prova di una vettura con motorizzazione da 100 kW, al freno possono giungere circa 70 kW, ma per assicurare il controllo del fenomeno è bene che questo sia almeno di 90 kW.

16.2.1 Modalità di gestione della prova

La funzionalità più semplice del banco è quella a velocità costante e consiste nell'utilizzo del controllo in velocità del freno per imporre la costanza della velocità qualunque sia la richiesta di potenza del pilota tramite l'acceleratore della vettura. La velocità è quindi impostata sul banco dall'operatore di consolle e la vettura viaggia a velocità costante e coppia variabile a piacimento del pilota.

Un'altra modalità di funzionamento simile alla precedente è a coppia costante. Il banco impone una coppia costante e il pilota, agendo sull'acceleratore, imposta un pari coppia contraria in modo da raggiungere un funzionamento stabile a velocità costante. Il funzionamento può essere paragonato ad una marcia in salita. Questa modalità può andare incontro ad una instabilità perché nel caso in cui la vettura non fosse in grado di erogare la coppia antagonista a quella del banco si realizzerebbe un surplus di coppia che porterebbe ad una rotazione inversa delle ruote del veicolo con velocità crescente (esistono comunque vari controlli di sicurezza sul banco che impediscono il verificarsi di condizioni di rischio, tra cui quello della massima velocità).

Il miglior modo di utilizzare un moderno banco fornito di un azionamento elettrico funzionante su 4 quadranti e un controllo computerizzato è quello della simulazione della marcia su strada. Si vuole riprodurre al banco la somma delle resistenze all'avanzamento che si verificano in una marcia libera su strada. La marcia di un veicolo è regolata dall'equazione:

$$F_m = F_{ri} + F_{ra} + F_{ac} + F_p$$

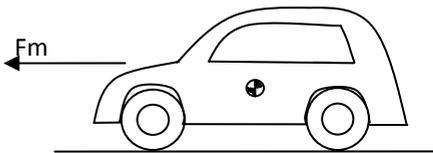


Fig. 16.1

in cui:

- F_m = Forza di trazione che deve essere fornita dal motore ed attuata dal contatto tra i pneumatici ed il terreno nella zona di contatto;
- F_{ri} = Forza per resistenze degli organi di trasmissione, tra cui quella per il rotolamento dei pneumatici;
- F_{ra} = Forza di resistenza aerodinamica dell'aria sulla carrozzeria;
- F_{ac} = Forza per effettuare accelerazioni (inerzia);
- F_p = Forza per vincere la pendenza della strada.

In questa schematizzazione l'esigenza di trazione F_m può essere immaginata come tiro da applicare ad una fune per trainare la vettura.

Le componenti si possono valutare nel seguente modo.

F_{ri} è data principalmente dalla resistenza dei pneumatici al rotolamento. Il valore di F_{ri} può essere in prima approssimazione (almeno per velocità sotto i 120 km/h) posto come proporzionale al carico gravante sulle ruote e quindi $F_{ri} = \alpha m g$, con "m" pari alla massa del veicolo, "g" pari all'accelerazione di gravità ed "α" coefficiente di resistenza dei pneumatici variabile da 0,010 per vetture con pneumatici moderni a 0,015 per motocicli o pneumatici da fuoristrada.

La resistenza aerodinamica è pari a $F_{ra} = C_x \frac{1}{2} \rho v^2 S$ con ρ pari alla densità dell'aria, mediamente $1,22 \text{ kg/m}^3$; S pari all'area frontale del veicolo; C_x pari al coefficiente di penetrazione aerodinamica variabile da 0,3 per le auto ben profilate a 0,5 per i monovolumi per arrivare oltre l'unità per i motocicli.

F_{ac} è pari alla massa del veicolo per l'accelerazione cui è soggetto.

$F_p = m g \text{sen}(\gamma)$, con γ pari all'angolo di inclinazione della strada rispetto all'orizzontale. In genere la pendenza di una strada si esprime come rapporto tra innalzamento ed avanzamento orizzontale in numero percentuale. Essendo questo valore la $\text{tan}(\gamma)$ e potendo assimilare il seno con la tangente, si può semplificare F_p come una percentuale della forza peso del veicolo pari alla pendenza della strada.

L'equazione del moto, nel caso di velocità costante, è in definitiva, nella rappresentazione cartesiana $F = F(v)$, una parabola con asse coincidente con l'asse delle ordinate, esprimibile nella forma:

$$F = k_1 + k_2 v^2.$$

Nel banco a rulli in prima approssimazione si può considerare che il termine F_{ri} è implicitamente generato dalla presenza degli pneumatici realmente rotolanti sulla superficie dei rulli che può essere paragonata alla strada. La forza frenante che deve essere generata dal freno si riduce pertanto a:

$$F_{freno} = C_x \frac{1}{2} \rho v^2 S + m a + m g \text{sen}(\gamma)$$



Fig. 16.2 - La Urb-e¹, la micro vettura ibrido serie sviluppata in ENEA

¹ La carrozzeria della vettura è opera dell'arch. Davide Giorgi

L'inerzia viene in genere realizzata in parte meccanicamente sfruttando l'inerzia di rotazione dei rulli ed aggiungendo a questa alcune masse volatiche in ghisa mosse dall'albero dei rulli (l'inerzia di rotazione viene ricondotta ad inerzia di massa traslante della vettura che altrimenti, essendo ferma sull'impianto, non sarebbe soggetta ad inerzia. L'equiparazione delle inerzie di rotazione e di traslazione viene fatta imponendo l'uguaglianza delle energie cinetiche dei volani e della vettura).

Nel caso delle micro vetture (Fig. 16.2), le masse ridotte in gioco richiedono banchi idonei ed una particolare attenzione nel trattamento dei dati sperimentali. L'azionamento elettrico del banco realizza in aggiunta a questa l'eventuale parte mancante dell'inerzia pilotando opportunamente la macchina elettrica in occasione delle variazioni di velocità.

Il sistema di controllo del banco viene impostato con tre coefficienti F_0 , F_1 ed F_2 che rappresentano i tre coefficienti (termine noto, coefficiente della variabile di primo grado, coefficiente della variabile di secondo grado) che identificano la parabola che è la curva resistente per marcia stazionaria in piano. In pratica, misurando le forze in N e le velocità in km/h, tenendo conto dei termini fissi e delle conversioni di unità di misura, si usano i coefficienti:

$$F_0 = \alpha m 9,81; \quad F_1 = 0; \quad F_2 = 0,0463 C_x S.$$

Nella messa a punto del banco si effettua una ulteriore operazione. I tre coefficienti sopra detti sono quelli che descrivono la resistenza reale incontrata dalla vettura su marcia stazionaria su strada, quindi nella prova al banco sono quelli "desiderati" come parametri finali di funzionamento del banco.

In effetti, per conoscere le resistenze offerte dal contatto degli pneumatici con i rulli, che sono in genere alquanto diverse da quelle con la strada, si effettua una prova di coast down consistente nel portare la vettura ad una velocità piuttosto alta e nel lasciarla rallentare con il cambio in folle. Il sistema di controllo del banco, misurando i tempi e le velocità del rallentamento, calcola le forze resistenti che hanno causato il rallentamento e le schematizza sotto forma di una parabola individuata da una terna di coefficienti F_{0p} , F_{1p} ed F_{2p} in cui il pedice "p" indica che sono forze resistenti relative ai pneumatici. Infine, come ultima operazione, il software del banco calcola un'altra terna di coefficienti F_0 , F_1 ed F_2 per differenza tra quelle desiderati e quelli dei pneumatici. In questa terna il pedice "d" come "dinamo" indica che sono le forze che devono essere generate dalla dinamo del banco.

In definitiva la realizzazione delle resistenze al moto relative alla marcia su strada in piano e in regime stazionario, è una parabola, e nel banco a rulli viene prodotta come somma di due componenti: la resistenza implicita nel contatto pneumatico-rullo e l'azione frenante della dinamo. Le resistenze, essendo rappresentate da parabole nel piano velocità-forza, possono essere descritte da terne di coefficienti, e tra queste esiste la relazione:

$$F_{0p} + F_{0d} = F_0 \quad F_{1p} + F_{1d} = F_1 \quad F_{2p} + F_{2d} = F_2$$

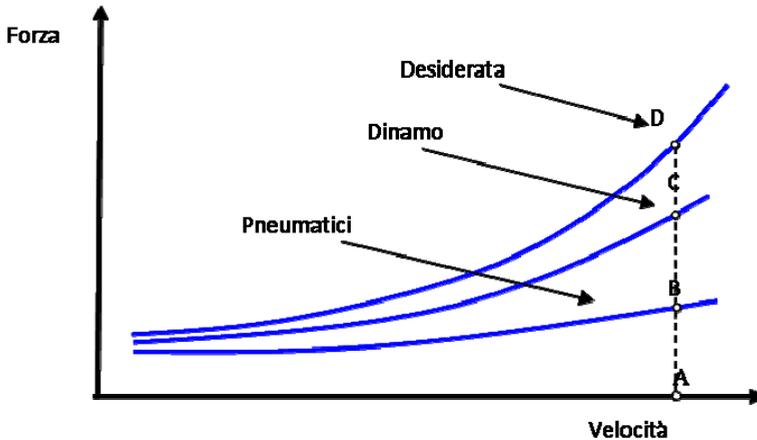


Fig. 16.3

Nella messa a punto, quindi, il software, avendo misurato le perdite dovute al rotolamento dei pneumatici sui rulli, pilota il freno in modo che eroghi il surplus di resistenza necessario ad eguagliare quelle che si incontrerebbero su strada piana a quella velocità.

Nella Fig. 16.3 è riportata un'interpretazione grafica del funzionamento: ogni terna di coefficienti descrive una parabola. Quella più alta è quella relativa alla marcia su strada piana in stazionario; quella più bassa è misurata ed è frutto dell'attrito tra pneumatici e rulli; quella intermedia viene calcolata per differenza ed è generata dalla dinamo.

Vale sempre la relazione: $AB + AC = AD$.

16.3 La strumentazione per la sperimentazione su strada

Per poter caratterizzare un veicolo, sia esso ibrido o convenzionale, bisogna misurare un numero abbastanza elevato di parametri, che vanno dal numero di giri del motore, alla velocità del veicolo, allo stato di carica delle batterie, alla potenza erogata dal sistema elettrico ecc.

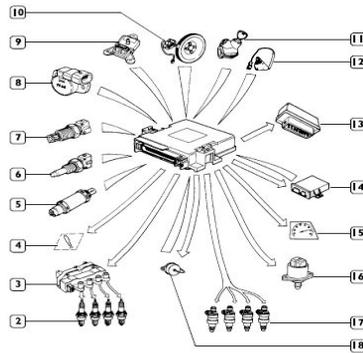
Una installazione completa di tutti i sensori necessari richiede ingombri, pesi, costi e manutenzione molto ingenti, soprattutto se le prove vengono eseguite su strada. La metodologia di seguito descritta permette invece di utilizzare dati ricavabili dalla strumentazione del veicolo stesso (ossia i sensori che sono installati a bordo) tramite la presa di diagnosi OBD oppure EOBD oppure OBD2 ¹. Infatti i veicoli di ultima generazione, equipaggiati di un sistema elet-

¹ L'attività sperimentale di acquisizione su strada dei veicoli è un'attività del CTL (Centro di Ricerca de "La Sapienza" per il Trasporto e la Logistica) in collaborazione col l'unità TER ENE TEC dell'ENEA. Il CTL è nato nel novembre del 2003 grazie ad un finanziamento del

tronico di iniezione di carburante, posseggono, installati a bordo dalla casa madre, un elevato numero di sensori per il controllo del funzionamento del motore. La centralina elettronica infatti, avendo il compito principale di regolare la dosatura del combustibile e l'anticipo di accensione, ha bisogno di conoscere istantaneamente un certo numero di parametri motoristici, quali ad esempio: portata d'aria aspirata, temperatura e pressione della miscela in aspirazione, numero di giri, velocità del veicolo, tensione della sonda lambda allo scarico ecc.

Nella Fig. 16.4 è riportato un esempio di un sistema elettronico di gestione del motore di un autocarro leggero, l'IVECO Daily CNG (alimentato a metano).

Accedere a tali sensori risulta molto comodo per conoscere il funzionamento del veicolo dal punto di vista energetico-ambientale. Le modalità di comunicazione sono state standardizzate da qualche anno, così che è facilmente reperibile sia l'hardware, sia i protocolli di comunicazione necessari per interrogare le centraline elettroniche (ve ne possono essere più d'una a bordo) ed accedere a tali informazioni.



| RIF. | DESCRIZIONE | RIF. | DESCRIZIONE |
|------|-------------------------------------|------|--------------------------------------|
| 1 | Centralina elettronica | 10 | Sensore PMS/giri |
| 2 | Candele d'accensione | 11 | Commutatore d'accensione |
| 3 | Bobina d'accensione | 12 | Sensore di fase |
| 4 | Spia avaria iniezione | 13 | Teleruttore doppio |
| 5 | Sonda lambda | 14 | Centralina immobilizer (se presente) |
| 6 | Sensore liquido refrigerante motore | 15 | Contagiri |
| 7 | Sensore temperatura aria aspirata | 16 | Attuatore regime minimo |
| 8 | Potenziometro farfalla | 17 | Elettroiniettori |
| 9 | Sensore di pressione assoluta | 18 | Presa di diagnosi |

Fig. 16.4 - Sistema elettronico di gestione del motore di un autocarro leggero, l'IVECO Daily alimentato a metano

Per quanto riguarda l'hardware per la comunicazione con il veicolo, esistono i seguenti standard:

1. ISO 9141-2 e ISO 14230 (KWP2000). Vengono utilizzati in genere dai veicoli di produzione europea ed asiatica. I veicoli ad accensione comandata sono compatibili con tali standard dal 2001; i diesel dal 2004.
2. PWM, VPW (SAE J1850). Riguarda maggiormente i veicoli di produzione americana (Ford e GM). Già dal 1996 tali veicoli sono compatibili con questo standard.
3. ISO 15765 (CAN). È lo standard CAN per gli autoveicoli; è in vigore dal 2008. Il suo vantaggio è la velocità di comunicazione: si possono acquisire anche centinaia di parametri al secondo (con i precedenti standard la velocità è limitata a 5-6 parametri al secondo).
4. SAE J1939. È lo standard utilizzato dagli autocarri. Adotta un protocollo CAN di tipo 2.0b a 256 kbit/s.

Per quanto riguarda invece il protocollo di comunicazione (ossia le regole per poter interrogare le centraline, leggere i dati dei sensori e interpretare i messaggi) ci sono due standard che risultano interessanti:

1. SAE J1979. Può essere utilizzato quando il veicolo è compatibile con uno dei protocolli riportati nei primi 3 punti. La struttura di un software che utilizza tale standard è in grado di inviare dei comandi alla centralina motore e di interpretare le risposte che riceve da essa. In questo standard ci sono anche tutte le regole per effettuare una interrogazione alla centralina (PID) per richiedere i valori rilevati dai sensori.

Nella Fig. 16.5 è riportata una pagina di un software per acquisizione dati tramite presa diagnostica OBD. Sulla destra si vedono il numero di parametri acquisiti dalla centralina motore del veicolo.

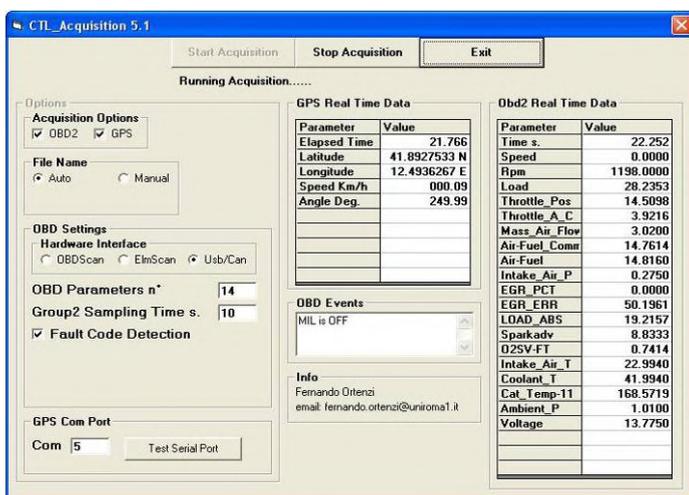


Fig. 16.5 - Schermata di un software per acquisizione dati tramite presa diagnostica OBD

2. SAE J1939-71. Se il veicolo in questione è un autocarro ed è compatibile con lo standard SAE J1939 allora, una volta collegata una interfaccia sulla linea CAN del veicolo, sarà possibile leggere tutti i messaggi che le centraline montate a bordo si scambiano. Tali messaggi sono in gran parte standardizzati e tra di essi ci sono i valori letti dai sensori.

Questi dati vengono forniti direttamente dalla “presa di diagnosi” della vettura, in genere comodamente posizionata all’interno dell’abitacolo, per cui risulta anche abbastanza agevole allestire una piccola postazione a bordo per la lettura dei dati. Gli standard sono originariamente stati sviluppati per la diagnostica del veicolo, quindi è possibile anche conoscere la presenza di eventuali malfunzionamenti presenti sui vari sistemi del veicolo (motore, frenata, controllori di assetto, impianto elettrico ecc.).

16.3.1 Misura delle emissioni

Per misurare le emissioni gassose prodotte da un veicolo nel suo reale utilizzo è necessaria una strumentazione mobile che sia compatibile con gli spazi e le possibilità di alloggiamento all’interno di un veicolo. Un esempio di strumentazione che può essere utilizzata per questo tipo di applicazioni è l’OBS 1300 prodotto dalla Horiba, di cui si riportano due immagini relative ad una installazione su un veicolo ibrido (Fig. 16.6).

Questo tipo di strumentazione è in grado di misurare gli inquinanti prodotti da un veicolo in marcia, sia ad accensione comandata che diesel. Senza entrare nel dettaglio del principio di funzionamento di ogni singolo sensore, si riportano i parametri che possono essere misurate:

1. concentrazione di CO, CO₂ [% Vol] ed HC, NO_x [ppm];
2. rapporto aria combustibile;
3. portata in volume dei gas di scarico (Exh flow rate) [litri/minuto];
4. temperatura e pressione dei gas di scarico (Exh temp) [°C];
5. condizioni ambientali (pressione, temperatura, umidità);
6. velocità [km/h] e posizione calcolate tramite GPS.



Fig. 16.6 - Strumentazione per misurare le emissioni gassose

16.3.2 Alcuni risultati

Una considerazione va fatta per il calcolo della potenza istantanea erogata dal motore termico. Una definizione standardizzata dalla SAE per il calcolo del carico motore (Calculated Load Value) è:

$$Load\% = \frac{Current_Airflow}{Peak_Airflow_WOT @ STP (Rpm) \cdot \left(\frac{BARO}{29.92}\right) \cdot SQRT\left(\frac{298}{(AAT + 273)}\right)} \cdot 100$$

ed ha le seguenti caratteristiche:

1. il valore massimo che assume è 100, a pieno carico per ogni altitudine, temperatura e pressione o numero di giri del motore sia per motori aspirati che turbo-compressi;
2. indica la percentuale di coppia massima disponibile;
3. è correlato linearmente con la pressione in aspirazione;
4. è utilizzato anche per la costruzione delle mappe di iniezione ed anticipo del motore;
5. i motori diesel utilizzano nel calcolo sopra riportato la portata di combustibile invece della portata di aria aspirata.

Grazie a questo parametro ed alle definizioni sopra riportate è possibile verificare che, fissato un numero di giri del motore, il valore del carico e la potenza erogata sono correlati tra di loro linearmente.

Tale linearità è stata poi verificata sperimentalmente come si vede nella Fig. 16.7, che mostra la relazione tra carico e potenza erogata dal motore termico per diversi regimi di rotazione.

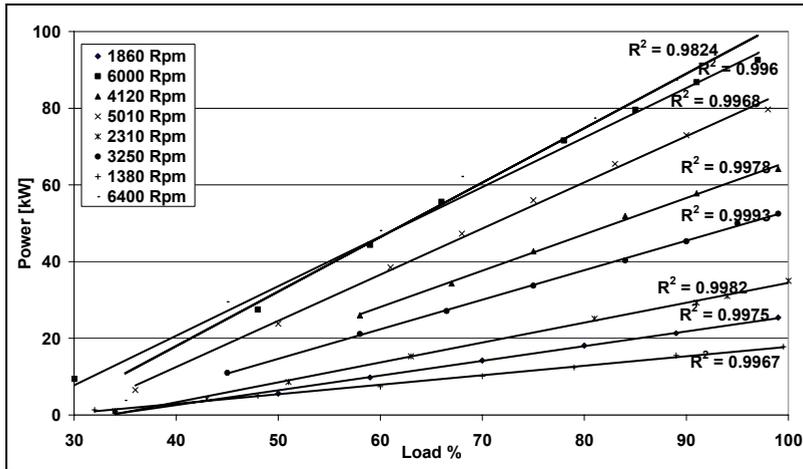


Fig. 16.7 - Relazione tra carico e potenza erogata dal motore termico per diversi regimi di rotazione

Da questo ne deriva che conoscendo due valori di potenza per ogni numero di giri è possibile conoscere tutti i valori di potenza erogabili dal motore: tali valori possono essere ricavati ad esempio dalla curva di potenza massima e da una prova a vuoto (assumendo in questo caso nulla la potenza).

Avendo a disposizione una strumentazione in grado di acquisire i parametri motoristici dalla centralina motore e un analizzatore dei gas di scarico (ad esempio il modello precedentemente riportato) è possibile caratterizzare qualunque tipologia di veicolo, sia esso ad accensione comandata che diesel, convenzionale o ibrido.

Come esempio si riportano alcuni risultati di una campagna di acquisizione effettuata su un veicolo ibrido parallelo in una missione svolta a Roma nei pressi della facoltà di ingegneria dell'Università "La Sapienza".

Trattandosi di un veicolo ibrido di ultima generazione, dotato di linea Can (ISO 15765), la velocità di trasmissione dei dati è molto elevata ed è in grado di fornire circa 10 valori in 0,25 secondi. I parametri acquisiti su tale veicolo sono: velocità veicolo, giri/min (RPM), carico motore, posizione pedale acceleratore, portata d'aria aspirata, rapporto aria-combustibile, pressione e temperatura in aspirazione, EGR%, anticipo accensione, tensione sonda lambda, temperatura refrigerante, temperatura catalizzatore, pressione ambiente, tensione batteria.

Nei grafici sono riportati gli andamenti temporali (ottenuti tramite l'interfaccia di comunicazione OBD) della velocità del veicolo e del regime di rotazione del motore (Fig. 16.8) e del valore della portata in massa aspirata dal motore e del rapporto aria combustibile (Fig. 16.9).

Si può notare come quest'ultimo parametro, principale responsabile della produzione delle emissioni di CO, NOx ed HC, vari sensibilmente nel tempo. Il rapporto aria-combustibile, pur essendo sempre vicino allo stechiometrico, in alcuni momenti arriva quasi a 30 (fase di rilascio), in altri cui va verso le miscele ricche (generalmente in fase di accelerazione e a pieno carico).

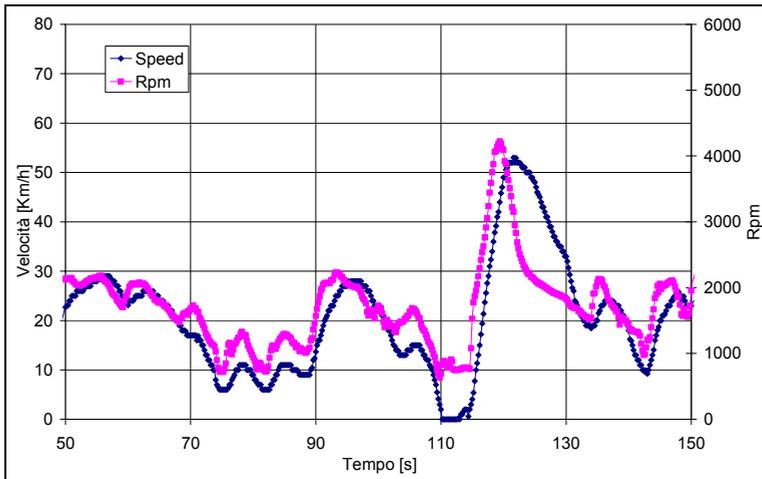


Fig. 16.8 - Andamento temporale della velocità del veicolo e del regime di rotazione del motore

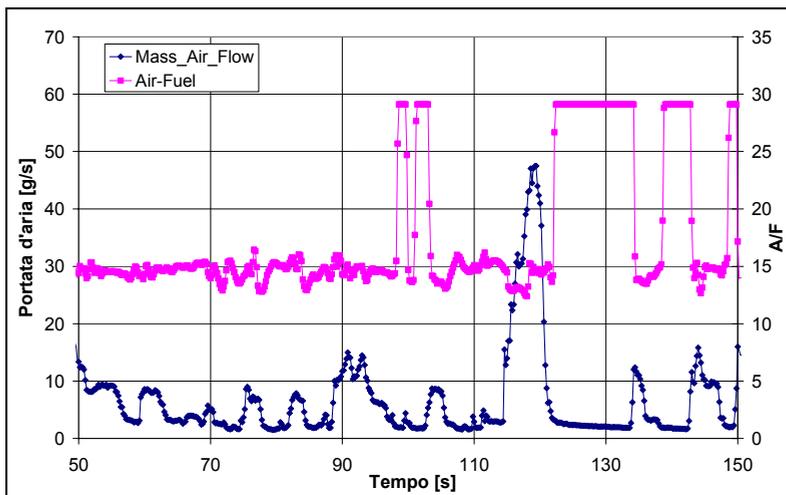


Fig. 16.9 - Andamento temporale del valore della portata in massa aspirata dal motore e del rapporto aria combustibile

Nella Fig. 16.10 è tracciato l'andamento temporale della potenza erogata dal motore termico e del consumo istantaneo ricavati dai dati acquisiti dalla centralina motore tramite la presa di diagnosi OBD (in alto). Si noti che è presente un certo ritardo nella misura del consumo.

Dai dati acquisiti poi dalla strumentazione per la misura delle emissioni si ottengono poi i valori in massa dei composti nocivi prodotti: in questo caso per larga parte dell'utilizzo del veicolo esso emette valori molto bassi di NOx e CO. I tratti in cui si producono quantità apprezzabili di gas inquinanti sono quelli a pieno carico in cui il motore funziona alimentato con miscele ricche (che danno maggiore potenza).

Le emissioni prodotte in questo percorso, di circa 4,5 km sono dell'ordine di 0,75 g/km per il CO e di 0,07 g/km per l'NOx; e quindi al di sotto dei limiti della normativa EURO IV, ma, circostanza importante, non solo sul ciclo di omologazione ma in un percorso reale.

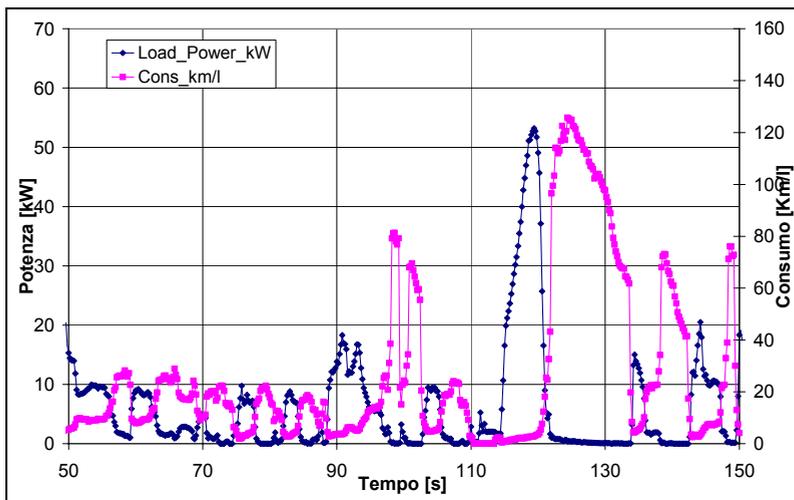


Fig. 16.10 - Andamento temporale della potenza erogata dal motore termico e del consumo istantaneo

Parte V
Esperienze ed applicazioni

CAPITOLO 17

ANALISI TECNOLOGICA DELLE SOLUZIONI E DELLE STRATEGIE DI SVILUPPO PROPOSTE DALLE GRANDI CASE AUTOMOBILISTICHE

Fabio Orecchini, Adriano Santiangeli, Fabrizio Zuccari

GEA – Gruppo Energia Ambiente

CIRPS – Centro Interuniversitario di Ricerca Per lo Sviluppo sostenibile

Università di Roma “La Sapienza”

17.1 Le ragioni dell’ibrido

L’ibrido nell’evoluzione dell’auto è un passaggio assolutamente logico, realizzabile in tempi brevi ed indubbiamente auspicabile. Una soluzione che permette di usare meglio l’energia contenuta nel combustibile, sia esso tradizionale o alternativo, sviluppando al contempo tecnologie utili per avvicinare l’arrivo dell’auto che tutti vogliamo: quella che non consuma petrolio e non emette inquinanti.

L’auto ibrida ha alcuni pregi indiscutibilmente interessanti per chi ama le auto:

- fa salire a bordo i motori elettrici, le batterie ed un sistema di controllo dei flussi di potenza, aprendo così la strada ad una prospettiva, anche a breve termine, di auto che potranno non inquinare affatto, perlomeno per alcuni tratti della loro percorrenza;
- evolve il sistema di trazione dell’automobile da semplice “macchina” a vero sistema energetico, aprendo così la strada ad un nuovo sviluppo che può portare fino all’auto a idrogeno a celle a combustibile, con cui l’auto ibrida condivide l’architettura tecnologica. O magari qualcos’altro, ma comunque decisamente più intelligente e più efficiente rispetto a dove ci si può spingere con il solo motore a combustione interna;
- ispira nuove sensazioni ed anche un nuovo piacere di guida in chi è al volante. Provare per credere: ci si scopre ad inseguire il gusto di gestire al meglio più motori di diversa tipologia (a combustione interna ed elettrici), cercando di allungare all’ossesso la percorrenza in solo elettrico, per ora, purtroppo, molto limitata in tutti i modelli sul mercato ma che potrà crescere proprio e soltanto con la consapevolezza e la richiesta del cliente;
- permette di risparmiare combustibile, ed ancor di più di evitare emissioni inquinanti; infatti il motore elettrico dà una mano proprio quando il motore a combustione interna diventa maggiormente inquinante per

inseguire le richieste di coppia e potenza da parte del guidatore, i cosiddetti “transitori”, durante i quali alla prova sperimentale le auto attuali vanno fuori con l'accuso rispetto ai parametri d'inquinamento (e di consumo) di omologazione. Mentre le ibride tengono i parametri sotto controllo;

- rende l'auto finalmente più moderna anche “da dentro”, aprendole così nuove, innumerevoli e forse sconosciute possibilità di sviluppo, oggi negate da una presunta quanto troppo comoda “semplicità” da mantenere a tutti i costi.

Le ragioni dell'ibrido sono tecniche, ingegneristiche e passionali, quindi. Perché l'auto migliori, possa inquinare meno fin da subito, ma soprattutto si evolva in maniera logica per poter veramente arrivare un giorno (prima possibile) a non inquinare affatto. Chi ama l'auto, ama guidarla nella natura e nella bellezza, non a scapito della natura e della bellezza.

17.2 Il caso Toyota Prius

L'auto ibrida, nel mondo delle grandi case auto, ha un cognome ed un nome: si chiama Toyota Prius.

E in questi anni, alla parola “Prius”, la cantilena della concorrenza è stata sempre la stessa: “La Toyota ci rimette, non riuscirà a vendere tante auto ibride da arrivare a guadagnarci dei soldi”. Così hanno tuonato anche molti esperti, mentre gli analisti finanziari facevano le pulci al progetto Prius per capire se ci fossero gli estremi per un'accusa di dumping, cioè di vendita sotto costo. E sì, perché la Toyota ibrida non è mai costata troppo; qualcosa in più delle auto con un solo motore, ma meno di quanto si supponesse. Intanto loro, i grandi capi dagli occhi a mandorla, hanno sempre ribadito: “Con l'auto ibrida ci guadagniamo. E arriveremo a venderne centinaia di migliaia nel mondo”.

I costi, appunto. Questo è l'argomento che ha caratterizzato finora la sfida dell'ibrido, sistema più intelligente per definizione rispetto al solo motore a combustione interna ma che per definizione è anche più costoso per chi produce, vista la presenza di più motori, di sistemi di controllo e batterie. “Bello, ma costa troppo” è sempre stata l'affermazione più diffusa, accettata per anni passivamente, troppo passivamente, da tutto il mondo dell'auto. Fino al mese di ottobre del 1997, quando quel sistema “costoso”, ma anche tanto amato dalle giovani generazioni di tecnici, non è sceso dalle lavagne delle aule universitarie – dove era già presente da almeno un decennio – ed è entrato in un'auto di serie, la Toyota Prius, appunto. A prezzi di mercato, non con sovraccosti insopportabili per i clienti.

Bruttina, per niente avveniristica nell'estetica, la berlinetta cinque posti e quattro porte della Toyota, quel giorno a Tokyo, ha spiazzato tutti. Di ibrido si parlava, naturalmente, ma ancora soltanto come tema di ricerca.

Invece Hiroshi Okuda, illuminato presidente del grande gruppo giapponese, aveva già chiesto ai suoi ingegneri nella prima metà del 1996 quello che non ci si aspettava ancora per almeno cinque o addirittura dieci anni: realizzare un'auto ibrida con motore elettrico, batterie agli idruri metallici e sistema di ripartizione dell'energia di tipo epicicloidale (pertanto semplice ed affidabile) da produrre in serie e da lanciare sul mercato. Tutto questo era successo soltanto diciotto mesi prima rispetto al giorno del lancio dell'ottobre 1997. Soltanto un anno mezzo, quindi, per trasformare un'ipotesi in una realtà industriale. Un traguardo ambizioso, tanto ambizioso da far dire oggi che Okuda è stato capace di tirar fuori "più del massimo" dalle pur elevate capacità innovative della Toyota.

La Prius arriva così sul mercato in Giappone. E poi anche negli USA e in Europa, dove però l'ascesa del diesel ne offusca lo splendore. Da noi tutti parlano di *common rail* e gasolio, di potenza elevata insieme ai bassi consumi, e anche in America continuano a crescere i Suv e la gigantografie fatte automobile. Si sviluppano più i muscoli che la coscienza ambientale. La filosofia Prius è invece quella della riduzione massima dell'inquinamento, anche a prezzo di prestazioni non proprio briose. Piace, quindi, ma non conquista.

La svolta arriva nel 2003, con la nuova Prius.

A guidare gli ingegneri nel suo sviluppo non è più soltanto l'inseguimento del minor impatto ambientale, cioè minori consumi di carburante e minori emissioni nocive, ma anche l'inseguimento del maggior piacere di guida. Con due motori, uno a benzina ed uno elettrico, la Prius può dare più potenza, più accelerazione, più divertimento, garantendo al tempo stesso di ridurre i consumi a parità di prestazioni. L'ibrido, quindi, comincia a parlare la lingua degli automobilisti e propone miglioramenti, non rinunce. Con questa nuova via tecnologica arrivano i titoli di "auto dell'anno" in Nord America e in Europa, per la prima volta nella storia assegnati allo stesso modello. E arrivano ordini a bizzeffe, tanto da rendere lunghissimi i tempi d'attesa negli USA e in parecchi paesi europei. La Prius indica così la giusta dimensione per il successo dell'auto ibrida, quella che la può portare molto lontano. Una tecnologia diventa fenomeno di massa soltanto se è in grado di offrire di più rispetto ad altre. E la maggiore complessità dell'ibrido ha acquistato un irresistibile fascino quando ha dimostrato non solo di poter limitare l'impatto sull'ambiente, ma di poterlo fare addirittura migliorando le prestazioni.

E l'evoluzione continua. A gennaio 2009, al salone di Detroit, è stata presentata la terza generazione della Prius, più grande (misure esterne e interne maggiori), più elettrica della precedente (potenza elettrica di 80 cavalli), più potente (dall'1,5 litri al 1,8 litri con 150 cavalli di potenza istantanea) ed al tempo stesso meno assetata di combustibile (consumi ridotti del 10%), con tetto con pannelli solari e con emissioni inquinanti ulteriormente ridotte (fino ai 90 g/km).



Fig. 17.1 - La terza generazione della Prius, versione 2009

In applicazioni sperimentali di flotta dimostrativa in Giappone, California e Francia, la Prius dal 2009 è anche plug-in con batterie al litio, cioè consente di ricaricare le batterie dalla normale presa elettrica.



Fig. 17.2 - Particolare del tetto con pannelli solari della terza generazione della Prius

Non solo, già si pensa alle piccole ibride. È pronta in rampa di lancio una Prius Compact, sempre in concorrenza con la Honda.

17.3 La sfida Honda: Insight, Civic IMA e le altre

L'unica casa che ha immediatamente risposto all'accelerazione ibrida della Toyota è la Honda. Subito dopo il lancio della Prius, infatti, la Honda Insight ibrida è stata lanciata in Giappone, negli USA ed in alcuni paesi europei. La Insight ha anche l'onore di essere stata la prima auto ibrida ad arrivare sul mercato in America, sei mesi prima della stessa Toyota Prius.

In Europa, la Honda ha sempre portato i suoi modelli ibridi vecchi e nuovi, dalla Insight, alla Civic IMA e Civic Hybrid, fino alla Nuova Insight.

Mentre la prima versione della Insight non è mai arrivata sul mercato italiano, pur se esistono in Italia pochi esemplari immatricolati direttamente dalla filiale Honda nazionale, la Nuova Honda Insight, presentata nella sua versione definitiva al salone di Detroit nel gennaio 2009, è stata commercializzata in Italia nell'aprile 2009 vantando, prima di quella data, migliaia di ordini in attesa.

Nell'aprile 2009 la Insight ha stabilito un altro primato, diventando l'auto più venduta in Giappone, fatto mai accaduto per un'auto ibrida su nessun grande mercato del mondo.

La nuova Honda Insight, proprio come la sua concorrente Prius, è disponibile esclusivamente in versione ibrida. E come la sua rivale ha una linea esterna che certamente non piacerà a tutti, ma che altrettanto sicuramente si fa riconoscere a prima vista. Chi compra ibrido, chi guida consumando ed inquinando meno, vuole mostrare chiaramente la sua scelta.

La tecnologia IMA (Integrated Motor Assist) della Honda è più semplice e meno costosa di quella Toyota. Il motore elettrico della Insight ha una potenza di 10 kilowatt e non permette mai di partire da fermo in sola modalità elettrica. La sua funzione è quella di aiutare il motore principale a benzina, 1.3 litri di cilindrata e 65 kW di potenza, a consumare ed emettere il meno possibile senza però ricorrere a troppi componenti aggiuntivi pesanti o ancora costosi. Le batterie con tecnologia nichel-idruri metallici arrivano così a pesare soltanto 38 kg, contro i 53 kg della dotazione della Honda Civic Hybrid, modello ibrido del 2006 che rimane sul mercato anche con l'arrivo della Insight. E la modalità di marcia "solo elettrica" è realizzabile, ma con l'auto già in velocità e dosando con grande attenzione la pressione sul pedale dell'acceleratore.

Il risultato finale è un consumo sul ciclo di omologazione misto di 4,4 litri di benzina ogni 100 chilometri (quasi 23 chilometri al litro), pari ad emissioni di CO₂ di 101 grammi al km e ad emissioni di inquinanti abbondantemente al di sotto dei limiti Euro 5 e probabilmente anche Euro 6.



Fig. 17.3 - La nuova Honda Insight

Numeri che sono ottenuti con un'auto lunga quasi 4 metri e mezzo, con spazio adeguato a bordo per cinque passeggeri ed un bagagliaio di 400 litri, più spazioso di quello delle più diffuse concorrenti "non ibride". Il vecchio difetto dello spazio sottratto al bagagliaio dalle batterie di trazione è così superato, con un grande passo in avanti anche nella versatilità di utilizzo dello spazio interno, visto che nella Insight basta un gesto per abbattere le due parti dello schienale posteriore, arrivando ben oltre i 1000 litri di capacità di carico.

Nella Civic Hybrid questo non è possibile, essendo le batterie collocate proprio dietro lo schienale.

Altra caratteristica della nuova ibrida è la volontà di dialogo continuo con il guidatore, per una sua vera educazione alla guida ecologica.

Il sistema Eco-assist rende visibile la capacità di chi è alla guida di limitare i consumi, aiuta a dosare le accelerazioni, permette di tenere la serie storica delle proprie prestazioni e consegna “premi” ad ogni miglioramento nel tempo, grazie all’attribuzione di veri e propri “voti ecologici”, dati dall’auto a chi è al volante.

Come per la Civic Hybrid, anche per la Insight la Honda toglie ogni dubbio ai potenziali clienti in termini di affidabilità del sistema con una garanzia su tutti i componenti dell’ibrido e sulle batterie di ben otto anni o 160.000 chilometri

La Honda Civic IMA era invece disponibile soltanto in versione berlina quattro porte e con un motore da 1.300 cc a benzina, unito a batterie e motore elettrico, in grado di abbattere i consumi fino al livello di un 1.000 (4,9 litri/100 chilometri sul ciclo misto) e di migliorare le prestazioni fino al livello del 1.600. Naturalmente inquinando decisamente di meno. La Honda ha ottenuto tutto questo in maniera particolarmente semplice ed economica, aggiungendo soltanto un piccolo motore elettrico da 6 kW (che fa anche da starter e generatore), una centralina di controllo e delle batterie, garantite otto anni o 250.000 km.

Con l’arrivo della nuova Honda Civic ad inizio 2006, completamente diversa rispetto alla precedente, arriva anche la nuova versione ibrida. Innanzitutto, dalla definizione ermetica di Civic IMA che derivava dalla denominazione del sistema tecnico messo a punto degli ingegneri giapponesi, si passa al più esplicito nome di Civic Hybrid. Poi, l’importanza della parte elettrica nell’auto cresce, grazie a un motore da 15 kW al posto di quello da 6 kW usato in precedenza, le batterie diventano più compatte e più resistenti alle sollecitazioni, le prestazioni aumentano notevolmente.

Se la Civic IMA veniva presentata come un’auto con motore da 1.300 cc che garantiva le prestazioni di un 1.600 con i consumi di un mille, la Civic Hybrid viene descritta in grado di arrivare alle prestazioni di una 1.800, mantenendo la cilindrata “reale” invariata a 1.300 cc ed abbattendo ulteriormente i consumi del 5-10%, con livelli di emissioni inquinanti veramente ai minimi storici.

Il motore i-Vtec a tre stadi permette infatti di chiudere completamente le valvole di alimentazione quando si è a velocità costante, facendo sì che l’energia alle ruote arrivi dal solo insieme batterie-motore elettrico. Ed anche nelle lievi accelerazioni è la parte elettrica a fornire la potenza richiesta, non il motore a combustione interna, con questo riducendo notevolmente consumi ed emissioni.

La carrozzeria sulla quale è disponibile il sistema ibrido rimane soltanto la berlinea tre volumi, poco amata da noi ma richiesta nei paesi anglosassoni, che risultano così ancora una volta preferiti nella commercializzazione dell’ibrido.



Fig. 17.4 - La Honda Civic Hybrid, con motore a benzina da 1.300 ed elettrico da 15 kW

Il CTL, Centro di ricerca Trasporti e Logistica dell'Università di Roma "La Sapienza", ha provato per due mesi su strada a Roma la Honda Civic Hybrid, mettendo a punto un rapporto di ricerca che ne indica i dati reali in termini di emissioni, consumi, intervento della funzione "stop and go", influenza del guidatore sul comportamento energetico ed ambientale della vettura. Ne esce fuori un quadro interessantissimo, che rende merito al sistema ibrido Honda in condizioni di marcia cittadina.

Il sistema ibrido, grazie all'interazione di motore a combustione interna, motore elettrico e batterie di bordo, consente un contenimento estremamente efficace delle emissioni di monossido di carbonio (CO) ed ossidi di azoto (NO_x), quindi di due dei principali inquinanti - dannosi per la salute dell'uomo - presenti allo scarico dalle attuali auto a benzina. Nelle condizioni reali di utilizzo CO ed NO_x rimangono praticamente sempre al di sotto dei limiti Euro 4, cosa che non avviene affatto con auto "non ibride", omologate come Euro 4 ma che poi su strada emettono ben al di là dei valori di omologazione.

La possibilità di far intervenire il motore elettrico, cioè, rende l'auto ibrida molto più pulita di quella "normale". La Honda Civic Hybrid mantiene così su strada molte delle promesse fatte in laboratorio, dove sono stati registrati i dati per l'omologazione.

Per quanto riguarda il risparmio in termini di combustibile, spicca il ruolo della funzione "stop and go", che spegnendo il motore a combustione interna nelle soste al semaforo ed a velocità costante, contribuisce da sola al risparmio del 6-8% di benzina. In totale, la riduzione dei consumi vale dal 10 al 15%, in

funzione dell'uso che si fa dell'automobile. Dai dati rilevati su strada risulta inoltre evidente l'importanza del guidatore e della sua maniera di schiacciare l'acceleratore ed usare il freno. E qui i numeri del CTL nella prova Honda Civic Hybrid parlano chiaro: le donne guidano più "risparmioso" ed inquinano meno.

Infine la FcX Clarity, gioiello tecnologico attuale di casa Honda, trazione elettrica, idrogeno e celle a combustibile, ha un motore elettrico da 140 CV alimentato da fuel cell (celle a combustibile in cui la combinazione dell'idrogeno, proveniente dal serbatoio, con l'ossigeno dell'aria genera energia elettrica utilizzata dal motore, calore e vapor d'acqua). L'elettricità prodotta dalle *fuel cell* viene anche in parte stoccata in batterie agli ioni di litio nelle quali viene immagazzinata anche l'energia cinetica recuperata in frenata e decelerazione, rendendo disponibile questa energia quando richiesta.

Presentato il prototipo della FcX Clarity al salone di Los Angeles nel novembre del 2007, nel 2008 l'auto è stata messa sul mercato in California (dove i distributori di idrogeno sono già circa 200), con la formula del leasing anche per i clienti privati, ed in Giappone.

Nel 2009 la FcX Clarity ha vinto il premio di World Green Car 2009. La Honda se lo aggiudica ancora, dopo quello conferitole per la Civic Hybrid nel 2006.

Infine, sul versante delle piccole ibride, è la stata la Honda ad annunciare la prima auto da città dotata di tecnologia ibrida, cioè la Jazz il cui lancio con batterie e motori elettrici a bordo è fissato per il 2011.



Fig. 17.5 - La Honda FcX Clarity

17.4 La scelta General Motors: il sistema E-Flex e il prototipo Chevrolet Volt

La General Motors ha presentato nel gennaio 2007 al salone di Detroit il suo primo sistema di trazione elettrica completamente flessibile. Si chiama GM E-Flex e trasferisce nell'automobile la più grande dote dell'energia elettrica, quella di poter essere generata a partire da diverse fonti tra loro alternative.

GM E-Flex è così il primo sistema di trazione flessibile per auto con batterie e motore elettrico. E-Flex può essere alimentato ricaricando le batterie direttamente dalla presa della corrente, quindi dalla rete elettrica, oppure facendo il pieno di un combustibile tradizionale, come gasolio o benzina, o con un combustibile rinnovabile come il bioetanolo, oppure utilizzando l'idrogeno con celle a combustibile. O ancora, per sfruttare al meglio la flessibilità E-Flex, utilizzando sia energia presa dalla rete elettrica e accumulata nelle batterie, sia elettricità prodotta direttamente a bordo da un sistema motore a combustione interna + generatore.

“Noi crediamo che l'auto di domani dovrà essere tanto flessibile da poter essere alimentata da diversi combustibili. Una componente chiave di questa flessibilità è lo sviluppo di auto con trazione elettrica”, ha affermato Rick Wagoner, allora numero uno della GM, aprendo la strada al concetto E-Flex.

Il sistema E-Flex comprende uno o più motori elettrici che assicurano la trazione del veicolo, uniti a batterie al litio capaci di garantire la necessaria capacità di accumulo di energia in spazi e con pesi ridotti, e con anche la possibilità di auto-generazione di bordo dell'energia elettrica grazie ad un insieme motore a combustione interna + generatore. Il motore a combustione interna, che non è mai utilizzato per fornire energia direttamente alle ruote, può avere cilindrata molto ridotta e funzionare sempre al meglio delle sue possibilità, in termini di rendimento e di limitazione delle emissioni inquinanti. In questo modo l'auto risulta silenziosa e piacevole da guidare grazie alle caratteristiche del motore elettrico che ne garantisce la trazione, ma arriva anche ad avere eccellenti caratteristiche in termini di autonomia, grazie alla riserva supplementare di energia assicurata dal combustibile contenuto nel serbatoio.

Senza variare affatto il sistema di trazione, elettrica, l'auto può utilizzare un motore a combustione interna funzionante con combustibili alternativi secondo le necessità del mercato nel quale essa viene introdotta. L'E-Flex è pronto inoltre ad ospitare il sistema di generazione di bordo che risolve completamente i problemi di dipendenza dal petrolio e di emissione di sostanze inquinanti che caratterizzano l'auto attuale, quello con celle a combustibile alimentate a idrogeno.

Il sistema E-Flex, capace di rendere flessibile l'auto grazie all'unione di trazione elettrica, batterie, motore alimentato da un combustibile e generazione di bordo dell'elettricità, dimostra subito la sua reale fattibilità grazie al prototipo Chevrolet Volt.

Il nome del prototipo parla chiaro e rende omaggio ad Alessandro Volta, scienziato italiano inventore della pila elettrica. La Chevrolet Volt è un'auto elettrica che rende evidente come questo sistema di trazione, unito al concetto E-Flex, possa fornire le due principali caratteristiche che gli esperti individuano come cruciali per il futuro dell'auto: la possibilità di alimentazione con combustibili non petroliferi e un bassissimo livello di emissioni inquinanti. Con in più la capacità di marciare in funzione "ZEV" – con livello zero di emissioni allo scarico – per una distanza sufficiente a coprire la richiesta di mobilità quotidiana in oltre l'80% dei casi.

Nel 2009, il progetto chiave per il futuro della General Motors si chiama, invece, Tecnologia Voltec e raccoglie l'eredità del sopra descritto E-Flex, o più semplicemente Volt – come il prototipo che per primo ne è stato equipaggiato.

La tecnologia Voltec si svela per la prima volta a Russelsheim in Germania, presso il centro di ricerca e sviluppo della Opel, e subito riserva qualche sorpresa rispetto alle aspettative. La definizione E-Rev, utilizzata dalla GM per indicare il suo futuro Extended range electric vehicle, cioè veicolo elettrico ad autonomia estesa, è sempre stata intesa (e presentata) come relativa ad un sistema ibrido serie. Nell'ibrido serie le batterie, ricaricabili dalla presa elettrica, forniscono una certa autonomia, e il funzionamento a bordo di un motore a scoppio che aziona un generatore di corrente permette di aggiungerne dell'altra, estendendo la percorrenza del veicolo ben oltre la sola capacità degli accumulatori elettrochimici. Normalmente il piccolo elettrogeneratore di bordo entra in funzione con dovuto anticipo rispetto alla scarica delle batterie, quindi l'autonomia in sola modalità elettrica risulta piuttosto penalizzata, benché il rendimento totale risulti eccellente e così anche l'emissione di sostanze inquinanti dannose per l'uomo.

La soluzione svelata dalla General Motors per la tecnologia Voltec non è invece un ibrido serie. Il motore a combustione interna è un 1.400 cc a benzina che non ha il compito di ricaricare le batterie, ma quello di provvedere da solo alla marcia del veicolo dopo la scarica del pacco accumulatori. L'energia erogata dal motore a benzina viene tutta convertita in elettricità e la trazione dell'auto continua ad essere soltanto elettrica, ma il motore deve essere capace di fornire istantaneamente tutta l'energia di cui si ha bisogno alle ruote. Quella scelta per il sistema Voltec è perciò una formula totalmente inedita per un'auto destinata alla produzione di serie ed è finalizzata a massimizzare l'autonomia soltanto elettrica che le batterie sono capaci di garantire con la ricarica domestica operata di norma durante il rimessaggio notturno. Unendo a queste specifiche il tranquillizzante valore di oltre 500 chilometri di autonomia con un pieno di benzina (o etanolo E85) che tolgono al guidatore l'ansia da ricarica che i soli chilometri offerti dalla ricarica elettrica genererebbero, almeno secondo l'esperienza GM maturata con la brevissima parentesi di commercializzazione della ormai mitica auto elettrica EV1 in California negli anni Novanta.

Le future Chevrolet Volt e Opel Ampera, commercializzate secondo i piani rispettivamente dal 2010 negli USA e dal 2011 in Europa, saranno comunque delle auto il più possibile elettriche, che dovranno garantire almeno 60 chilometri di autonomia in modalità emissioni zero grazie alla ricarica casalinga. Evidentemente le batterie al litio di ultima generazione prodotte dalla LGChem e scelte dalla GM per equipaggiare il suo gioiello vanno scaricate quasi completamente (rispetto alla capacità utile, che non è superiore al 70% di quella totale) per fornire un'autonomia di quel livello, quindi la modalità ibrido serie non è realizzabile.

Le batterie della tecnologia Voltec sono attualmente in fase di test in America ed a Russelsheim in speciali cabine termiche che riproducono in versione accelerata il susseguirsi delle temperature stagionali. La durata in condizioni reali, infatti, dovrà essere garantita in 15 anni e 300.000 chilometri, perché non sia in pratica mai necessaria una sostituzione durante tutta la vita utile del veicolo.

Il pacco batterie pesa 180 chili ed è posizionato a "T" all'interno del pianale, con una parte consistente degli accumulatori posta longitudinalmente rispetto alla cabina passeggeri, all'interno del tunnel centrale (quello destinato all'alloggiamento dell'albero di trasmissione nelle auto con motore anteriore e trazione posteriore) ed un'altra frazione posizionata in modo trasversale, subito prima dell'asse posteriore. Le emissioni reali di CO₂ dell'auto, così come i consumi di combustibile dei quali sono praticamente un "sinonimo", non sono al momento quantificabili, non esistendo ancora un prototipo marciante della Chevrolet Volt - Opel Ampera equipaggiato con il sistema Voltec appena presentato. Il valore comunicato dalla GM di 60 grammi al km è infatti frutto di test al banco di prova di laboratorio ed è ottenuto unendo dati sul ciclo di omologazione misto europeo comprendenti l'autonomia nel funzionamento in modalità solo elettrica fino alla scarica delle batterie (ad emissioni zero, quindi) con dati sullo stesso ciclo registrati con il motore a benzina acceso.

17.5 PSA Peugeot Citroen e l'ibrido diesel

L'Europa scende finalmente in pista nella corsa verso l'auto ibrida soltanto nel 2006. Lo fa con la soluzione più ambiziosa e per ora anche inedita sul mercato, quella che unisce uno o più motori elettrici, le batterie ed un sistema elettronico di controllo dei flussi di potenza ad un motore ciclo diesel. Il tutto ad opera di PSA Peugeot Citroen, secondo gruppo continentale del settore auto e leader mondiale insieme alla Ford nella produzione di motori a gasolio.

"La tecnologia ibrida diesel - afferma Jean Martin Folz, numero uno di PSA al momento della presentazione dei primi due prototipi a Parigi - rappresenta il futuro dell'auto europea". Questa affermazione è basata sulla caratteristica dei motori diesel di consumare già oggi decisamente meno rispetto ai motori a benzina.

Caratteristica che arriva a riduzioni dei consumi veramente interessanti quando si fa un ulteriore passo avanti, con lo sviluppo dell'intero sistema ibrido, aggiungendo cioè anche la trazione elettrica, le batterie e il recupero dell'energia in frenata.

I numeri finali dichiarati per i due prototipi Citroen C4 Hdi Hybride e Peugeot 307 Hdi Hybride messi in pista sul circuito di collaudo di Mortfontaine, vicino Parigi, sono di tutto rispetto: consumo di 3,4 litri di gasolio ogni 100 chilometri sul ciclo misto europeo, con una riduzione del 30% rispetto alla versione di serie attuale. Le emissioni di CO₂ arrivano così al livello record di 90 grammi per chilometro, mentre le auto hanno migliori prestazioni dinamiche, sia in accelerazione che ripresa.

Numeri che permettono di affermare che l'industria europea – se vuole – può rilanciare di netto nella partita dell'auto ibrida. Non limitarsi ad inseguire Toyota e Honda, lepri giapponesi che – in barba agli scetticismi tattici e parecchio miopi degli altri marchi – si sono portate un bel pezzo avanti nello sviluppo e nella diffusione di mercato delle auto ibride in USA, Giappone ed Europa negli ultimi anni.

Un "rilancio" che avviene soltanto in parte, grazie alla presentazione dei due prototipi ed all'annuncio del gruppo francese di voler arrivare veramente sul mercato con modelli di massima diffusione, come appunto le medie compatte Citroen C4 e Peugeot 307. L'annuncio, nel 2007, prometteva un arrivo sul mercato non prima di tre anni, cioè sicuramente dopo il 2010. Anni importanti e lunghissimi, durante i quali chi ha voluto o vorrà un'auto ibrida non nel settore del lusso potrebbe quindi continuare a trovarla soltanto nella concessionaria di un marchio con gli occhi a mandorla.

PSA Peugeot Citroen ha il merito di aver posto la questione, e di aver mostrato anche la reale fattibilità della soluzione tecnologica che a suo parere è di particolare interesse per il cliente europeo, cioè quella ibrida con motore diesel e motore elettrico. Per di più applicata al segmento di maggior volume in Europa, quello delle medie compatte come la C4 e la 307.

Adesso però, l'industria europea nel suo complesso deve accettare la sfida e dare realmente attenzione alla soluzione con doppia motorizzazione per il nostro mercato, oltre che per rimanere in corsa negli Stati Uniti. Con motorizzazione diesel, se è questa la tecnologia dove si ritiene di essere maggiormente competitivi. Oppure con motorizzazione a benzina, se i costi per tenere il diesel al di sotto dei limiti di emissione di sostanze inquinanti (soprattutto polveri e ossidi di azoto) fissati dalle norme attuali e future, oltre che dal buonsenso e dalla tanto sbandierata attenzione all'ambiente ed alla salute delle città, dovessero rivelarsi non accettabili.

Il fatto che attorno alla motorizzazione diesel si stiano giocando partite planetarie di grandissime proporzioni, prima tra tutte quella per una sua introduzione significativa negli Stati Uniti, fa pensare che proprio l'auto ibrida diesel

potrebbe essere una carta importante tra le mani dei costruttori del Vecchio Continente. Negli ultimi saloni di Detroit tutti i grandi costruttori americani hanno mostrato prototipi ibridi con motore a gasolio, da General Motors, a Ford, a DaimlerChrysler¹. Nessuno, però, ha poi portato realmente su strada la sua tecnologia a bordo di un'auto "normale" come le due PSA Peugeot Citroen. E questo ha addirittura alimentato una specie di mito, cioè che la tecnologia ibrida non fosse tecnicamente applicabile alle auto a gasolio, viste le troppe sollecitazioni e le troppe vibrazioni indotte dai continui spegnimenti del motore a combustione interna – cioè proprio della principale funzione che fa dell'ibrido una tecnologia realmente più intelligente rispetto all'usuale disponibilità del solo motore a scoppio.

La prova dei prototipi PSA Peugeot Citroen sul circuito di Mortfontaine fugò ogni dubbio: le auto a gasolio possono funzionare in maniera silenziosa ed assolutamente confortevole anche quando dotate dell'accoppiamento con motori elettrici. La riaccensione del motore 1.600 Hdi diesel non è mai fastidiosa ed il più delle volte è addirittura quasi impercettibile per chi è a bordo come passeggero. Inoltre, la disponibilità di un pulsante "ZEV" (cioè Zero Emission Vehicle) per chiedere all'auto di funzionare in modalità "solo elettrico" per cinque chilometri con velocità fino a 50 km/h, del tutto silenziosamente e senza alcuna emissione allo scarico, aggiunge una possibilità incredibilmente gradita per chi guida.



Fig. 17.6 - Citroen porta al salone di Parigi 2008 la Hypnos Hybrid

¹ Nel 2007, dopo un'unione di nove anni, la tedesca Daimler, produttrice della Mercedes, e l'americana Chrysler – che controlla anche i marchi Jeep e Dodge – si separano. Nel 2009, il presidente degli Stati Uniti d'America, Barack Obama, annuncia pubblicamente la storica intesa di alleanza tra Fiat e Chrysler.

La prima auto ibrida di Peugeot dovrebbe essere lanciata a partire dal 2011, sulla base della tecnologia svelata a bordo del prototipo Peugeot 3008 Hybrid 4. La tecnologia ibrida Peugeot è quindi confermata con motore elettrico e batterie affiancati a un motore a gasolio.

Quest'auto potrà contare sui due motori: il 2,0 litri HDI FAP Euro 5 (163 cavalli di potenza) e l'elettrico da 37 cavalli. La Peugeot Hybrid potrà così sviluppare una potenza totale di 200 cavalli. La vettura, a trazione anteriore, potrà contare anche sulla trazione a quattro ruote motrici quando, in ripartenza ed in determinate condizioni, interverrà anche il motore elettrico che agisce sulle ruote posteriori. Dotata di sistema Start&Stop, la Peugeot dichiara consumi di 4,1 litri di gasolio per 100 km ed emissioni di 109 gCO₂/km.

Nel 2008 la Citroen porta al salone di Parigi la Hypnos Hybrid, una nuova concept car con motorizzazione ibrida, portata anche al Motor Show di Bologna 2008.

17.6 L'ibrido Lexus, il lusso della tecnologia

La sfida più ambiziosa. La tecnologia ibrida con l'arrivo sul mercato della Lexus RX 400h esce dal suo limbo fatto di estimatori tecno-chic, attenti all'ambiente e stregati dal gusto di possedere un'auto che molti non sono nemmeno in grado di "capire", e si propone nel regno dei SUV. Cioè dove ciò che conta sono le prestazioni.

Basta salire in auto, girare la chiave e inserire la marcia per capire che la partita è di quelle da non perdere. Infatti, silenzio era e silenzio rimane. Non accade nulla, se non che si accendono le luci del quadro e compare una scritta "ready" nella strumentazione. L'auto è pronta, eppure non c'è pistone che si agiti inutilmente, né fumo che esca dallo scarico soltanto per il gusto di segnalare la propria presenza. La percezione è di hi-tech assoluto.

Il piede destro indugia un attimo prima di affondare sull'acceleratore, giusto il tempo di percepire che l'impianto di condizionamento ha iniziato a funzionare regolarmente, perché è elettrico ed anch'esso fa il suo dovere senza che l'albero motore abbia ancora iniziato a girare.

L'avvio è forzosamente repentino. Se quest'auto si propone come il primo Suv ibrido ad elevate prestazioni, allora le prestazioni ci devono essere. Altrimenti è tutto un bluff ed è di nuovo il tecno-chic che è in noi a prendere il sopravvento. Invece no. Le concorrenti sono molte e di successo, ed il loro successo non nasce dall'amore per la tecnica di frontiera. Ma dalla capacità di far viaggiare veloci e comodi i passeggeri, e di offrire intere mandrie di cavalli in forma meccanica a disposizione del guidatore. Allora, giù il piede sull'acceleratore, fino a percepire con esattezza la grande integrazione che c'è tra il motore elettrico anteriore, il motore a benzina - già di suo ben potente - e il motore elettrico posteriore.

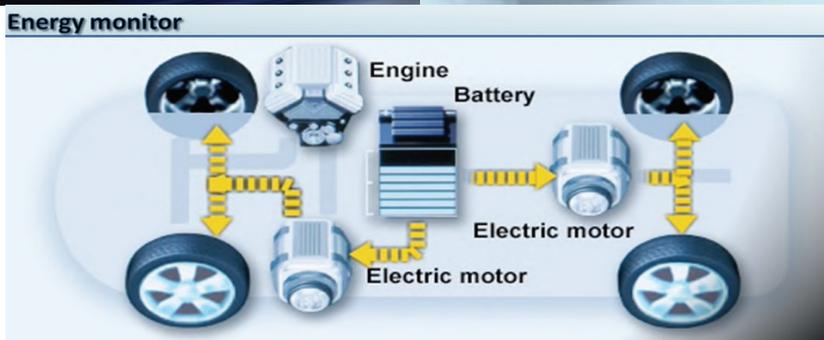
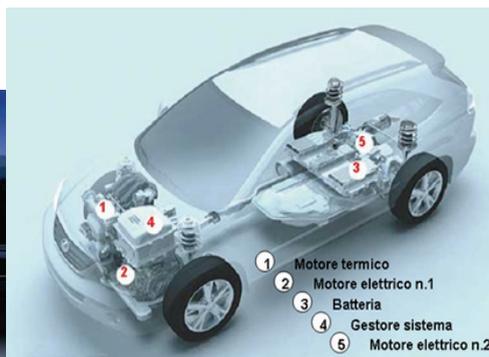
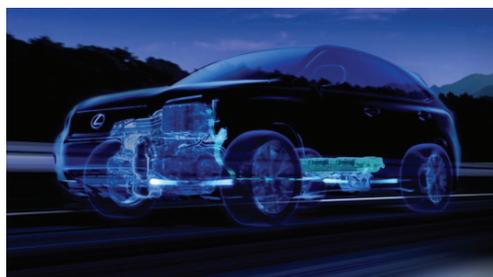


Fig. 17.7 - Il sistema propulsivo della Lexus 400h

Entrano in azione nell'ordine: prima l'elettrico davanti, che agisce da fermo e fa andare per i primi metri l'auto in "solo elettrico" con grande coppia a disposizione, poi quello a benzina, che si avvia letteralmente in un soffio e non dà sensazioni immediate ma quasi si fonde nella percezione di chi guida alle vibrazioni di marcia, poi l'elettrico di dietro, che giunge ad incrementare ulteriormente l'accelerazione in modo realmente impressionante.

I numeri dicono che da zero a cento si va in 7,6 secondi, come soltanto motori a benzina otto cilindri sanno fare nella categoria. E la strada conferma, è un'accelerazione da brivido.

Nella guida sul misto, con ogni probabilità, le strade dei futuri clienti si dividono in due. Se alla partenza praticamente nessuno avrebbe potuto resistere alla tentazione di provare la spinta "aeronautica" del mezzo, infatti, tra i tornanti la guida può essere fatta di continue accelerazioni, decelerazioni, sorpassi e curve affrontate con audacia, oppure impostata all'insegna della pulizia di guida. Nel primo caso, chiedendo molto alla Rx 400h si riceve altrettanto come prestazioni, e si apprezza la raffinatezza in termini di controllo della stabilità, grazie al primo sistema VDIM (Vehicle dynamic integrated management) che può utilizzare la spinta sull'asse posteriore per rimettere in assetto il veicolo in caso di necessità.

La novità vera è nella possibilità di scegliere la seconda opzione, che dà un gusto addirittura superiore a chi ama guidare, nell'inseguimento della migliore gestione dei motori e dei sistemi che si hanno a disposizione. Accelerazioni di sorpasso, frenate e decelerazioni gestite ad arte fanno scoprire il piacere di guidare un'auto della nuova specie. Cavalli sì, ma da dove dice chi guida. E non soltanto, obbligatoriamente ed anche un po' noiosamente per forza dal motore a combustione interna.

La strada è tracciata. Novembre 2008, salone di Los Angeles, presentata la seconda generazione della tecnologia Lexus Hybrid Drive. Gli americani conoscono la RX 450h; in commercio, in Italia, da giugno 2009.



Fig. 17.8 - La Lexus RX 450h

Siamo in Grecia a pochi chilometri da Atene e dietro il tempio di Poseidone, che svetta splendido sul mare dal promontorio di Sounio, passa lentissima una petroliera. Vista dall'abitacolo di un'auto così non sembra navigare, ma arrancare faticosamente.

A bordo della GS 450h, altra meraviglia ibrida della Lexus, si capisce che mondo dell'auto non è affatto arrivato al capolinea. Non è bollito, come da più parti lo si vorrebbe dipingere. Perché non è vero che si debba per forza accontentare di raschiare il fondo del barile, di inseguire miglioramenti millimetrici con tecnologie e motori ormai vicinissimi al limite del loro potenziale. Può ancora inventare qualcosa di nuovo, di inedito ed efficace per avere prestazioni migliori, intensissime sensazioni di guida ed al tempo stesso abbassare i consumi e le emissioni inquinanti.

“Si può andare alla radice del problema, introducendo soluzioni completamente nuove, che riducono all'origine i consumi e l'inquinamento” afferma Masashi Yamane, responsabile dello sviluppo della GS 450h, con la determinazione tipica di chi ci crede, nel lavoro che fa.

Quando parla della nuova Lexus e del suo sistema ibrido che unisce il nuovo motore a benzina V6 3,5 litri di cilindrata ad un motore elettrico ed alla trazione posteriore – ancora una volta una prima assoluta firmata Lexus e consegnata al mondo dell'auto – Yamane inarca le sopracciglia. E quelle due fessure che ha sul volto, e che in Oriente chiamano occhi, si illuminano di una luce che punta lontano, molto lontano. Perfino la minuta, giapponesissima interprete che lo segue come un'ombra, confezionata con precisione nel suo tailleur pantalone grigio, non si limita a tradurre le sue affermazioni: le recita. Ed insieme i due arrivano a rappresentare una sorta di icona umana, simbolo discreto e futuristico della Lexus più potente di sempre, che al tempo stesso è la meno inquinante.

La soluzione alla quale si riferisce l'ingegnere giapponese è il sistema di trazione ibrido, che permette alla GS 450h di arrivare ad avere una potenza di 345 cavalli, una velocità massima autolimitata a 250 km/h ed un'accelerazione da zero a 100 km/h in 5,9 secondi, dato che viene accompagnato dall'ancora più impressionante accelerazione da 80 km/h a 120 km/h in 4,7 secondi. Il tutto con consumi sul ciclo combinato europeo di 7,9 litri di benzina ogni 100 chilometri, e soprattutto con emissioni di ossidi di azoto, monossido di carbonio ed idrocarburi incombusti (cioè i principali inquinanti dei motori a benzina) addirittura inferiori rispetto ai livelli riscontrabili in auto utilitarie, cioè enormemente meno pesanti e meno performanti. Non è un miracolo, ovviamente. È la caratteristica principale delle auto ibride da un punto di vista energetico ed ambientale. Utilizzando il motore elettrico alimentato dalle batterie (che si ricaricano, è bene ricordarlo, grazie al funzionamento stesso dell'auto, senza alcun bisogno di alimentazioni esterne), la GS 450h riesce ad eseguire le richieste del guidatore senza sottoporre il motore a combustione interna a condizioni esagerate di stress, quindi lo tiene il più possibile lontano dalle situazioni nelle quali la combustione è peggiore, e le emissioni risultano più inquinanti.

Su percorsi fatti di autostrade mosse e veloci, ma anche di piccoli vicoli con svolte ad angolo retto e traffico lento, la GS 450h dimostra una spinta prepotente nei sorpassi veloci, degna di un'auto super-sportiva e invece celata dall'apparenza di una lussuosa berlina. Proprio quella grande spinta, tutta sul retrotreno grazie alla trazione posteriore, permette sul misto traiettorie di guida raffinate, fatte di potenza e, volendo, anche di sovrasterzo più che di velocità. Ed all'arrivo in attraversamenti cittadini, la ciliegia sulla torta di un'esperienza al volante decisamente particolare, con lo scatto veloce e silenzioso dei lunghi tratti percorsi grazie alla spinta del solo motore elettrico. Fluidità, silenzio e grande sensazione di modernità.

Infine la LS 600h, ammiraglia della casa giapponese, con Lexus Hybrid Drive, ha un motore termico da 394 cavalli accoppiato ad uno elettrico da 224 cavalli con batterie NiMH. Le emissioni di CO₂ sono di 219 g/km.

17.7 Gli accordi per l'ibrido tra i grandi gruppi mondiali

L'inseguimento è partito. La fuga in avanti di Toyota e Honda verso l'auto ibrida non è più una corsa solitaria. Già dall'anno 2005 all'accoppiata giapponese si era aggiunta la Ford, che (anche grazie ad un accordo che prevede lo scambio di brevetti con la Toyota) ha portato sul mercato negli Stati Uniti la versione ibrida del suo Suv compatto Escape. E che con questa macchina ha subito vinto il titolo di "truck of the year 2005" negli USA.

Scendono in campo anche tutti gli altri marchi statunitensi ed i marchi tedeschi che hanno una forte presenza sul mercato americano. Questo a conferma del fatto che se si vuol mantenere un'immagine vincente negli USA non si può più non avere l'ibrido. L'accordo più importante prevede una collaborazione chiamata "Hybrid Alliance" per lo sviluppo di sistemi di trazione ibridi (con motore a benzina o diesel e motori elettrici) tra General Motors, DaimlerChrysler e BMW. Per effetto di questa alleanza ben quattrocento tecnici delle tre case lavorano gomito a gomito in una sede unica a Troy, nel Michigan, con l'obiettivo di portare al più presto sul mercato la nuova tecnologia. Sia GM sia DaimlerChrysler hanno annunciato il loro primo veicolo ibrido negli USA entro due anni dall'accordo. A seguire, prodotti con il marchio Mercedes e con quello BMW, con commercializzazione sia in America che in Europa.

Fattore interessante dell'accordo tra le tre case è la propensione dichiarata ad accettare altri eventuali soci nell'operazione.



Fig. 17.9 - Firma dell'accordo tra General Motors e DaimlerChrysler

Dopo essere nata come intesa tra le sole GM e DaimlerChrysler, l'operazione ha successivamente accolto la BMW, che per la prima volta nella storia collabora con i rivali di sempre della Daimler (veicoli Mercedes, autobus Citaro) nella messa a punto di tecnologie di trazione, e potrebbe coinvolgere uno o più ulteriori marchi in futuro.

L'altro annuncio di grande interesse ha accompagnato la presentazione della versione ibrida della Audi Q7, affiancata a quella con solo motore a combustione interna al momento del lancio del modello, al salone di Francoforte 2005. La Audi Q7 ibrida sarà presto sul mercato e condividerà il suo nuovo sistema (annunciato con motore a benzina e motore elettrico) con la Volkswagen Touareg e addirittura con la Porsche Cayenne. Anche in questo caso la versione ibrida verrà sviluppata con attenzione prioritaria agli Stati Uniti ma ne è annunciato l'arrivo anche in Europa. A convincere il gruppo Volkswagen (di cui fa parte il marchio Audi) e la Porsche dell'opportunità di avere al più presto almeno un ibrido in gamma è stato il successo della Lexus 400 h, già venduta per mesi di produzione al momento del suo arrivo in concessionaria nel 2005.

Quel che salta agli occhi, pur nel grande sforzo che le case inseguatrici annunciano di voler mettere in campo, è la leadership garantita, per i prossimi anni, di Toyota e Honda, con la sola aggiunta di Ford – che prima delle altre “non giapponesi” si è accorta delle necessità di far qualcosa di concreto ma che comunque nel suo piano di lancio di nuovi modelli non ha annunciato molte novità, e soprattutto non ha ancora deciso di sfruttare il vantaggio entrando con auto ibride anche in Europa.

17.8 Gli accordi per l'elettrico tra i grandi gruppi mondiali

L'auto elettrica è stata protagonista assoluta e silenziosa al salone di Ginevra 2009. Mai in nessun appuntamento internazionale si era visto tanto elettrico nel mondo dell'auto, e mai l'auto elettrica a batterie era apparsa così vicina alla realtà del mercato e della reale diffusione su strada, soprattutto nelle grandi città. La rivoluzione elettrica però, non sta avvenendo tra troppi clamori. I riflettori rimangono puntati sulle auto tradizionali, sempre meno affascinanti per il pubblico e per gli stessi addetti ai lavori, ma sulla cui tenuta in termini di vendita si regge l'intero settore planetario delle quattro ruote.

Al di fuori del cono di luce, in alcuni casi addirittura anche al di fuori degli stessi padiglioni del salone, nasce però un nuovo prodotto che non fa più il pieno di benzina e che cammina senza emettere un filo di fumo, destinato secondo molti a prendere sempre maggiore importanza e ad arrivare nelle grandi città europee nel giro di pochissimi anni. A Ginevra la Renault e la Nissan, unite tra loro da un'alleanza strategica, confermano i loro piani di sviluppo dell'auto elettrica ed anche il programma di introduzione sul mercato in Europa, in America e in Asia. Gli fanno eco la Mitsubishi e il gruppo Chrysler,

che fanno anche provare in due separati “fuori salone” i loro prototipi a zero emissioni.

Il direttore del programma veicoli elettrici della Renault, Thierry Koskas, chiarisce subito le intenzioni del gruppo francese: “Già entro la fine del 2011 avremo sul mercato una vera gamma di quattro veicoli elettrici: una berlina tre volumi (versione elettrica della Megane berlina, *ndr*), una Kangoo elettrica interessante anche per l'utilizzo commerciale, un modello compatto completamente nuovo, delle dimensioni della nostra Clio, che arriverà soltanto in versione elettrica, una piccola auto da città”. Anche se il prezzo del petrolio, decisamente ribassato rispetto all'anno scorso, non facilita l'impresa, sul versante costi di acquisto e d'esercizio dei nuovi veicoli gli obiettivi sono altamente aggressivi.

“L'auto elettrica che abbiamo in mente è destinata ad una larga diffusione di mercato, deve essere un'auto popolare e non un prodotto di nicchia o di apparenza. Per questo il suo costo d'acquisto sarà inferiore a quello di una vettura di pari livello ma con tecnologia attuale. Ed anche il costo di utilizzo, che al momento stiamo calcolando su base annua, sarà inferiore al costo che si avrebbe facendo gli stessi chilometri ma riempiendo il serbatoio di benzina o di gasolio”. Il contenimento del prezzo, nei piani della Renault, è reso possibile da una particolare formula di vendita che non chiederà al cliente di acquistare le batterie, che rimarranno di proprietà del costruttore. Mentre per il costo di funzionamento chilometrico sarà cruciale l'andamento del prezzo del barile nei prossimi 24 mesi, e si punta molto sulla messa a punto di formule di acquisto dell'elettricità per la ricarica da sviluppare con le società elettriche operanti nei vari mercati. “In Francia è già attiva una partnership con la EdF” – conferma Koskas.

La Nissan, che sviluppa anche per il gruppo Renault il componente chiave delle batterie al litio, conferma da parte sua la piena intenzione di arrivare già dal prossimo anno sul mercato con auto elettriche, iniziando però da Stati Uniti e Giappone. “I nostri primi modelli elettrici non rivoluzioneranno il concetto di automobile – spiega François Bancon, responsabile del dipartimento prodotti avanzati della Nissan – saranno molto simili alle auto attuali. Si tratterà però di modelli disponibili esclusivamente con trazione elettrica, non di versioni elettriche derivate da modelli attuali”. In questo la strategia Nissan differisce da quella della Renault, e se si sposta l'attenzione un po' più in là nel tempo si notano ulteriori elementi di particolare interesse: “Dal 2012 in poi, con la graduale affermazione della trazione elettrica, cominceremo a ripensare totalmente il veicolo, ne faremo un elemento moderno come computer, telefonini e altri prodotti nati un secolo più tardi. L'auto avrà comandi e trasmissioni totalmente by-wire, cioè senza più ingranaggi meccanici, e sarà completamente integrata nella rete di trasmissione e ricezione dei dati”.

17.9 Il sistema “stop-and-start”

Dall'ottobre 2008, le Fiat 500, Bravo e Croma sono più “verdi”. Infatti al Salone di Parigi è stata presentata la nuova linea Pur-O2, linea di vetture dai bassi consumi e limitate emissioni di CO₂. E proprio in questa occasione, dopo alcune esperienze fatte negli anni ottanta su Regata e Ritmo, la 500 Pur-O2 fa tornare la Fiat sul mercato delle auto col sistema “stop and start”. L'auto che si spegne al semaforo rosso e riavvia il motore alla partenza col verde è ancora troppo timida nelle sue presenze in concessionaria, realizzate all'inizio grazie alla Citroen ma non esaltate dalla voglia di affermarne la validità sul mercato dalla politica commerciale della casa e dei concessionari.

Sui classici percorsi di prova delle vetture semi-definitive col marchio Fiat, in giro per le colline piemontesi o dentro Torino città, accade infatti da tempo di affiancarne alcune che al semaforo diventano “incredibilmente” silenziose. Sono soprattutto delle Grande Punto, ma in circolazione c'è anche qualche Bravo e delle 500. La decisione di arrivare con il compatto alternatore-starter a bordo di un'auto del gruppo sembrava già presa addirittura nel 2005, quando l'allora numero uno di Fiat Auto Herbert Demel (che non è certamente uomo dalle dichiarazioni avventate) annunciò durante un incontro con i giornalisti austriaci l'intenzione di mettere il sistema a bordo di una “piccola”. E la piccola in questione era la Punto.

Poi, però, i canonici problemi di sovraccosto hanno messo in dubbio l'introduzione su auto dai margini piuttosto stretti ed hanno portato all'idea di equipaggiare la Croma con lo “stop and start”, mantenendo però intatta l'intenzione Fiat di dare un segnale “tecnologico” al mercato.

Adesso è tempo di decisioni definitive e, mentre pare chiaro che dalle prove su strada arrivino soltanto conferme sulla validità della soluzione, la scelta è tra un segnale forte rivolto al prodotto di grande volume come la Punto, oppure un segnale più sofisticato – ma anche più debole – che sarebbe ottenuto riservando la funzione di arresto e riavvio del motore all'ammiraglia. Oppure con un modello piccolo ma dalla clientela sofisticata, come la nuova 500, pluri-premiata e campione di vendite.

In entrambi i casi, la scelta “stop and start” sarebbe offerta al cliente con una versione specifica all'interno della gamma, e non con un costo aggiuntivo come optional. Questo seguendo esattamente la strategia Citroen, che ha dedicato allo “stop and start” l'intera offerta della versione “sensodrive” con cambio robotizzato della sua bestseller C3, mascherando così nel prezzo globale della versione il doppio sovraccosto del cambio meccanico con comportamento automatico e dell'integrazione dell'alternatore-starter. La scelta della versione dedicata rende più gestibile in fabbrica l'aggiunta del componente, la circoscrive dal punto di vista del marketing e la fa brillare di luce propria in sede di comunicazione. Un guadagno da molti punti di vista, quindi.

In casa Fiat non tutti erano convinti dell'efficacia dello "stop and start" in termini di immagine, e anche questo – oltre all'aspetto economico – ha messo a lungo in discussione la decisione finale sul suo effettivo arrivo sul mercato. Proprio il marchio torinese, infatti, ha già tentato circa vent'anni fa l'introduzione di sistemi analoghi dal punto di vista delle finalità con la funzione "energy saving", senza averne particolari soddisfazioni. Anche se la differenza tra le soluzioni del passato, basate sullo spegnimento del motore all'arresto e il suo riavvio con l'utilizzo del "vecchio" motorino di avviamento, sono ben diverse da quella attuale che conta sul nuovo componente "generatore-starter", il ricordo di un'affidabilità difficile da garantire e di modalità di riaccensione caratterizzate da un lieve ma percettibile ritardo rispetto alla richiesta del guidatore oltre che dal fastidioso rumore del motorino, preoccupa gli uomini del marketing Fiat.

Il sistema "stop and start" offerto dalla Citroen conta su un alternatore reversibile (cioè che può agire sia da generatore di elettricità, sia da motore elettrico per l'avvio del motore a combustione interna) da 2 kW di potenza, collegato all'albero motore da una cinghia di trasmissione di particolare resistenza - che costituisce un componente essenziale del sistema, visto che ha il compito di garantire la trasmissione in occasione di tutti i riavvii del motore a combustione interna, successivi ad ogni temporaneo spegnimento.

Altro componente essenziale è il sistema elettronico di controllo, che deve decidere e comandare lo spegnimento e la riaccensione del motore termico in funzione di molti parametri, quali la temperatura delle parti meccaniche, la richiesta di energia da parte del sistema di climatizzazione, le condizioni istantanee di funzionamento del catalizzatore e del sistema di iniezione (cruciali per il mantenimento dei livelli di emissioni inquinanti all'interno dei riferimenti di legge). Il tutto con il supporto di una batteria in grado di tollerare cicli di carica e scarica decisamente più numerosi che in un funzionamento normale, senza l'esistenza di richieste ripetute di energia da parte dello starter alternatore, che in condizioni di marcia cittadine o in caso di traffico molto intenso arrivano ad essere dell'ordine delle centinaia in un'unica giornata.

I vantaggi di un sistema "stop and start" ben gestito dal sistema di controllo, che cioè tenga in dovuto conto le temperature ed il loro effetto sulla formazione di inquinanti in camera di combustione e sull'effettiva capacità del sistema di abbattimento di trattenerle o eliminarle, sono sia ambientali, che di confort ed economici. Ambientali, perché si evita di consumare combustibile ed emettere fumi inquinanti durante le fasi di fermo del veicolo, quando cioè il funzionamento del motore e il consumo di combustibile sono il più delle volte assolutamente inutili. Di confort, perché la vita a bordo cambia in maniera sostanziale a vettura ferma, con rumore e vibrazioni totalmente assenti ed una sorta di "nuova sensazione" che avvolge gradevolmente gli occupanti, facendo apparire totalmente fuori luogo e fuori tempo i consumi, le emissioni ed il rumore delle altre auto attorno, che ancora non si spengono per non muoversi.

Economici perchè in un utilizzo cittadino il risparmio di carburante è calcolato dalle case pari addirittura ad un 8-10% del consumo.

La BMW ha deciso nel 2007 di lanciare una dopo l'altra le versioni Efficient Dynamics, con sistema Start/stop, di tutti i suoi modelli. Arriva così una precisa denominazione per le auto del marchio di Monaco dotate di novità tecnologiche per la riduzione dei consumi e delle emissioni inquinanti. La svolta coincide con le grandi manovre politiche sul tema della riduzione della quantità di anidride carbonica immesse mediamente in atmosfera dai modelli sul mercato in Europa.

La lotta è particolarmente delicata, non soltanto dal punto di vista politico. Rischia infatti di allontanare i marchi più prestigiosi dell'auto tedesca dai desideri dei clienti dell'eco-lusso, identificati invece da tutti i maggiori analisti socio-economici come i più appetibili del prossimo decennio. E con ogni probabilità anche dei decenni successivi. L'attenzione all'ambiente come valore immateriale della marca, assieme alla certezza di acquistare il massimo in termini di tecnologia eco-compatibile, saranno sempre più parte integrante del processo di acquisto dei prodotti di fascia alta di ogni categoria merceologica, auto compresa. E la BMW lo sa bene, visto che grazie al tempismo dei suoi top manager ed alla capacità di comunicazione dei suoi uomini delle relazioni pubbliche ha saputo tenere alta l'attenzione e la consapevolezza dei suoi clienti e di tutti gli appassionati sulle successive fasi di sviluppo delle sue auto a idrogeno. E proprio grazie a questo programma, chiamato CleanEnergy, può oggi vantare livelli di gradimento invidiabili da parte della maggior parte dei protagonisti della società, della politica, del mondo produttivo.

Il percorso chiamato Efficient Dynamics è fatto di molti elementi, alcuni già in corso di sviluppo ed introduzione sui modelli BMW, altri invece veramente nuovi. Tra le novità già previste, ma che da oggi potranno beneficiare agli occhi del cliente di una precisa identificazione, ci sono i nuovi diesel con maggiori potenze unite a consumi ridotti anche del 15% e a pesi minori di oltre quindici chili, come già dimostra il 2.000 cc appena introdotto sulla Serie 1. Qui la riduzione di peso è ottenuta soprattutto grazie all'utilizzo dell'alluminio, mentre le prestazioni sono frutto della sovralimentazione "twin turbo" e dell'iniezione con sistema *common rail* di terza generazione, che lavora con iniettori piezoelettrici e pressioni di 1.800 bar. Stesso discorso vale per i nuovi motori a benzina con iniezione diretta ad alta precisione, che grazie all'iniettore centrale ed alla tecnologia chiamata "spray guided" riescono a realizzare condizioni di combustione povera in molte più occasioni rispetto alle precedenti proposte. E ben presto arriverà anche l'annunciata ondata di motori turbo a benzina, capaci di ulteriori salti in avanti in termini di potenza erogata associati a riduzioni dei consumi di combustibile rispetto alle precedenti versioni, a parità di cilindrata.

La novità più evidente, anche se all'inizio non molto conosciuta, riguarda l'arrivo su tutte le versioni Efficient Dynamics del sistema "stop and start" con recupero di energia in frenata. Si tratta di quella che comincia ad essere chiamata sempre più frequentemente "micro ibridizzazione", cioè arrivano a bordo uno starter-generatore integrato ed una batteria di ultima generazione, che nel caso della BMW è alla fibra di vetro, che permettono lo spegnimento del motore a combustione interna in fase di sosta (tipicamente al rosso di un semaforo, o nel traffico cittadino) ed il suo immediato riavvio appena l'auto si accinge alla ripartenza, con in più la capacità dell'insieme macchina elettrica-batteria di recuperare parte dell'energia solitamente dissipata ad ogni frenata.

Il sistema "micro ibrido" "stop and start" era atteso da tempo sulle BMW, dopo che già nel 2005 era stato indicato come di interesse per lo sviluppo delle auto del gruppo. Il pacchetto Efficient Dynamics ne fa in pratica il suo simbolo tecnologico, ed apre con ciò il percorso verso quella che è forse l'evoluzione più attesa dagli appassionati e dal mercato, che avrà il suo vero compimento con l'introduzione di veri e propri modelli ibridi con motore a combustione interna (benzina o diesel) e motori elettrici capaci anche di fornire energia alle ruote per la trazione, oltre che di recuperare energia per la ricarica delle batterie.

Alle tecnologie BMW EfficientDynamics, il prossimo passo sarà proprio quello della tecnologia BMW ActiveHybrid che contribuirà ulteriormente a ridurre consumi e emissioni. Dotate della tecnologia BMW ActiveHybrid sono la X6 ActiveHybrid, presentata a settembre 2007 al salone di Francoforte, la X5 ActiveHybrid presentata nel marzo 2008 al Salone di Ginevra e la Concept 7 Series ActiveHybrid, presentata nel 2008 al salone di Parigi. Il momento dell'arrivo dell'auto ibrida nel listino BMW in Europa è il mese di novembre 2009, con la disponibilità in concessionaria anche in Italia della X6 ActiveHybrid.

Grazie all'iniziativa di sviluppo congiunto Daimler-BMW per una tecnologia "mild hybrid" mirata alle esigenze del mercato europeo, sulle ammiraglie Mercedes Classe S e BMW Serie 7 arrivano dal 2009 e 2010 rispettivamente dei sistemi ibridi con motore elettrico di 15 kW e batterie agli ioni di litio sviluppate dalla Continental con celle Saft. Il mild hybrid ha batterie e motore elettrico capaci di aiutare in fase di accelerazione, da fermo e in sorpasso, il motore a benzina o diesel, senza però garantire autonomie significative in marcia "solo elettrica". In BMW e in Mercedes non si enfatizza particolarmente questa "svolta ibrida", inserita semplicemente tra le varie tecnologie in arrivo nel portafoglio tecnologico delle due prestigiose case. E ci si mantiene si mantiene ancora molto cauti sulle reali previsioni in termini di diffusione di mercato. L'attenzione esterna, invece, cresce a vista d'occhio e i clienti sembrano poter gradire molto. Se i grandi motoristi della Mercedes e della BMW riescono ad ottenere risparmi e contenimento delle emissioni da primato senza batterie e motori elettrici a bordo, chissà cosa riusciranno a fare con sistemi dalle potenzialità ben più elevate, come quelli ibridi. I giapponesi sono avvertiti.

17.10 L'ibrido "plug-in"

Il prossimo passo verso l'auto elettrica si chiama ibrida plug-in. Non un'elettrica, che per funzionare può contare soltanto sulle batterie, quindi. E nemmeno un'auto ibrida che ha il motore elettrico e le batterie, ma che si rifornisce alla sola e solita pompa di benzina o gasolio. Ma un'auto che ha a bordo un motore a combustione interna, le batterie ed una motorizzazione elettrica, ma può fare sia il pieno di combustibile sia quello di elettricità, grazie alla funzione "plug-in", che in inglese significa appunto, attaccare la spina.

In pratica, con la funzione "plug-in" l'ibrido diventa ricaricabile nel senso più ampio del termine. Le batterie non prendono più energia soltanto dal motore a combustione interna e dalle fasi di frenata durante la marcia, ma possono essere ricaricate con la corrente elettrica anche a casa o da specifiche colonnine pubbliche.

L'auto ibrida plug-in porta in dote il beneficio di poter garantire un'autonomia in modalità "emissioni zero", cioè marciando grazie alla sola trazione elettrica, maggiore di quella degli attuali ibridi. Ed al tempo stesso non limita il campo d'azione del suo conducente ai soli chilometri di autonomia garantiti dalla batterie, perchè nel serbatoio ha anche un pieno sul quale contare. In pratica, l'ibrido plug-in promette di funzionare quasi sempre come solo elettrico, perchè le decine di chilometri di raggio d'azione assicurate dalle batterie bastano all'uso che il conducente richiede. Cioè normalmente un tragitto di andata e ritorno principalmente cittadino. Se però si vogliono percorrere più chilometri e la ricarica di corrente effettuata a casa non basta più, allora si può far conto sul motore di bordo che funziona come moto-generatore e ricarica le pile.

Gli ibridi ricaricabili, che stanno facendo capolino per un'introduzione su strada dopo il 2012, non sono tutti uguali. Tutti i modelli fanno salire a bordo la nuova promettentissima tecnologia delle batterie al litio nelle sue diverse sfumature, ma l'integrazione della trazione elettrica rispetto al tradizionale motore a combustione interna è diversa per ogni costruttore. Tanto che in alcuni casi, come per la soluzione General Motors mostrata dal prototipo Chevrolet Volt, si tende ad abbandonare la definizione di "ibrido" per abbracciare con decisione quella di E-Rev, Extended range electric vehicle, cioè auto elettrica con estensione di autonomia. Questo perchè nella Volt la trazione è sempre puramente elettrica e con una ricarica delle batterie effettuata dalla presa elettrica di casa si possono percorrere ben 60 chilometri, sufficienti a soddisfare la richiesta di percorrenza giornaliera dell'80% degli automobilisti. Se poi si vuole avere un'autonomia maggiore e ci si spinge oltre i 60 chilometri dal momento della prima messa in moto giornaliera, o non si ha a disposizione un punto di ricarica elettrica, il sistema di bordo accende il motore a combustione interna che funge da moto-generatore di bordo consentendo ulteriori 500 chilometri di marcia.

Altri sistemi, come la versione ricaricabile della Toyota Prius o i prototipi di ibridi ricaricabili del gruppo Peugeot-Citroen già in prova in Francia presso l'Edf (Electricité de France) in un progetto sperimentale, prevedono invece un'interazione continua tra motore a benzina o diesel e il sistema batterie-motore elettrico. Nella Prius plug-in e nella Peugeot 307 plug-in, entrambe su strada oltralpe, una maggiore capienza energetica delle batterie rispetto agli ibridi attuali permette di marciare in solo elettrico per 15-20 chilometri, ma se si adotta uno stile di guida aggressivo, aumentando la velocità oltre i 60 km/h o accelerando con decisione, fa intervenire parallelamente alla trazione elettrica anche quella meccanica tradizionale, che prende energia e potenza direttamente dal motore a combustione interna.

Le due famiglie di auto ibride-elettriche ricaricabili sono destinate a convivere per i prossimi anni, una come evoluzione sempre più elettrica ed a minori emissioni delle auto di oggi, l'altra come preludio alle future auto ad emissioni zero soltanto elettriche a batteria o elettriche con sistema a idrogeno e celle a combustibile.

Altri interessantissimi prototipi visti negli ultimi saloni, che adottano lo schema del motore-generatore di elettricità e della trazione sempre completamente elettrica, che rappresenta il cuore tecnologico di molti, sono Volvo C30 Re-charge, la Jeep Renegade Concept, fino alla novità cinese Byd F6 Dm. In Italia la tecnologia non ha ancora un marchio industriale ma è stata messa a punto dal CIRPS, centro di ricerca universitario dell'Università di Roma "La Sapienza", capofila di un consorzio internazionale e con un co-finanziamento della Commissione Europea. Il prototipo nato a Roma si chiama Host, è stato presentato in forma statica e in anteprima nella manifestazione "H₂ Roma energy&mobility show" nel novembre 2007 ed in movimento nell'area innovazione "Innovation Cube" del Motor Show di Bologna 2008.

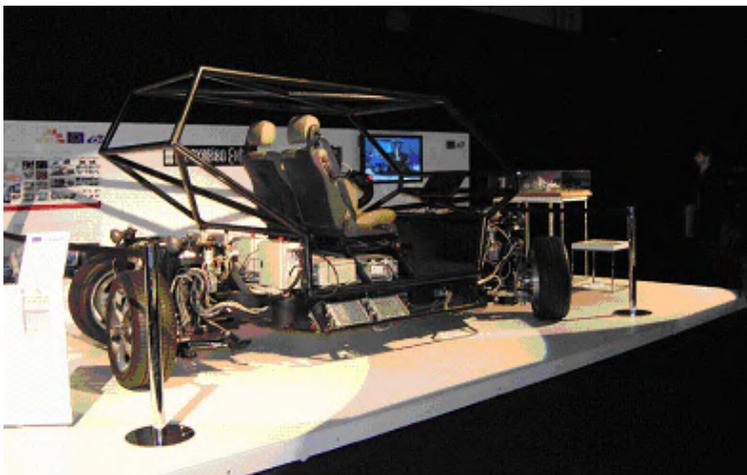


Fig. 17.10 - Il prototipo Host, realizzato dal CIRPS, centro di ricerca dell'Università di Roma "La Sapienza", ad "Innovation Cube" del Motor Show di Bologna 2008

HOST ha quattro motori ruota capaci anche di farlo traslare lateralmente e ruotare su se stesso. Il prototipo Host è costruito attorno ad una piattaforma energetica capace anche di ospitare l'accoppiata idrogeno-celle a combustibile. Diversa la scelta della Toyota, che con la sua Prius plug-in non realizza una trazione completamente elettrica ma mantiene la possibilità di funzionamento parallelo di motore a combustione interna e parte elettrica per fornire energia alle ruote. Il motore a benzina, cioè, non serve soltanto a ricaricare le batterie ma anche a far muovere direttamente il veicolo. La ricarica dalla presa elettrica e batterie maggiorate (in futuro anche con tecnologia al litio) danno alla Prius plug-in una percentuale di funzionamento in trazione elettrica decisamente maggiore rispetto alla Prius attuale.

L'auto ibrida non si è ancora veramente affermata in termini commerciali, quindi, che già cresce da molte parti la voglia di migliorarla. L'ultima mania "plug-in hybrid" fai-da-te arriva direttamente dal mercato americano, dove il successo dell'ibrido è più evidente e più vicina sembra anche la sua reale diffusione con numeri di vendita significativi.

Da tempo su Internet il popolo degli elaboratori "verdi" si è scatenato con la Toyota Prius, indiscussa bandiera tecnologica della soluzione con doppia motorizzazione. La modifica, semplice per chi capisce anche soltanto un po' di elettronica ed elettrotecnica, introduce la possibilità di ricaricare le batterie della rivoluzionaria giapponese anche collegandole direttamente alla presa della corrente, oltre che durante la marcia, come avviene normalmente grazie all'ottimizzazione del funzionamento del motore a benzina a combustione interna. Questo, insieme alla manomissione del processore che controlla lo stato di carica delle batterie ed all'aggiunta di ulteriori accumulatori, permette di estendere al massimo il funzionamento elettrico dell'auto, ottenendo autonomie in solo elettrico addirittura di qualche decina di chilometri, enormemente superiori a quelle consentite dal sistema originale.

Collegare l'auto alla presa della corrente, appunto. Cioè, in inglese, "plug-in". Questa è la caratteristica che dalla Prius "taroccata" in molti vorrebbero ben presto trasferita su prodotti di serie, appartenenti alla nuova categoria degli ibridi plug-in, appunto.

Purtroppo, non tutto è semplice come potrebbe sembrare. Partendo proprio dalla modifica della Toyota Prius che ha fatto scatenare il nuovo movimento di pensiero, va notato che l'introduzione della ricarica dalla presa della corrente basta da sola ad accorciare ad un quinto della durata attesa la vita delle batterie al nichel-idruri metallici. In pratica, invece degli otto anni previsti dalla Toyota, ci si ritrova con un pacco batterie che riesce a resistere sì e no un anno e mezzo. Se poi si elude anche il sistema elettronico che limita la carica delle batterie ad una frazione del potenziale, e ne limita la scarica mantenendo sempre al loro interno parte del potenziale di immagazzinamento, allora la vita degli accumulatori si dimezza ulteriormente.

In pratica, si ottiene una super-Prius da mostrare agli amici, che cammina per decine di chilometri in solo elettrico e sfrutta anche l'elettricità della rete di distribuzione, oltre a quella autoprodotta a bordo, ma la si fa durare soltanto per pochi mesi, nella migliore delle ipotesi.

E proprio la limitatissima durata delle batterie, se utilizzate troppo spesso in condizioni di stress da ricarica, è il principale ostacolo al reale arrivo sul mercato degli ibridi plug-in. Sono tecnicamente fattibili, possono essere anche dimostrati su strada, ma introducono per le batterie realizzate con le tecnologie attuali, un fattore limitante decisamente inaccettabile: la necessità di sostituzione periodica.

In maniera addirittura più marcata anche rispetto alle auto elettriche a batterie oggi sul mercato, i cui accumulatori non devono essere sottoposti a ricarica durante la marcia, come avviene nell'ibrido, ma soltanto a cicli di carica e scarica nei periodi di fermo e di marcia. Il tutto, introducendo con la sostituzione delle batterie non soltanto un fattore di manutenzione obbligata e scarsamente gradita al potenziale cliente, ma anche costi notevolissimi ed assolutamente fuori mercato da affrontare ad ogni sostituzione.

“Gli ibridi plug-in – afferma Masaomi Takimoto, vice presidente di Toyota Motor Corporation responsabile per ricerca e sviluppo nel settore ibrido – hanno bisogno di batterie rivoluzionarie per arrivare sul mercato, migliori anche di quelle con tecnologia agli ioni di litio, che Toyota sta attualmente sviluppando per la sua prossima generazione di modelli ibridi”. Questo, naturalmente, considerando per gli eventuali modelli plug-in la stessa irrinunciabile condizione, imposta oggi da tutti i maggiori costruttori alle loro proposte ibride presenti o in corso di sviluppo, di non richiedere la sostituzione delle batterie per tutta la vita utile dell'auto, da considerare – al pari di quella del motore a combustione interna – nell'ordine dei 300.000 chilometri.

L'ibrido plug-in appare comunque tanto desiderato da poter arrivare sul mercato attorno al 2012. Forse non subito su modelli di grande diffusione, perché non esistono soltanto le auto di serie, ma anche le piccole flotte ed i modelli di nicchia. Ed in questi spazi c'è posto per veicoli ben progettati. Con queste condizioni progettuali e con costi di acquisto e di manutenzione programmata ben più alti rispetto ai modelli di serie, l'ibrido ad alte ed altissime autonomie in marcia soltanto elettrica può avere un suo mercato anche presto.

Specialmente se le amministrazioni delle città più importanti del mondo (che spesso sono anche le più inquinate), decideranno di rendere obbligatoria nei loro centri storici la marcia in modalità zero emissioni. E se gli appassionati di tecnica automobilistica continueranno ad appassionarsi alla soluzione, senza dubbio affascinante dal punto di vista ingegneristico, facendo crescere uno specifico mercato. Se c'è il mercato, si sa, le rivoluzioni tecnologiche descritte come molto distanti si affrettano ad arrivare. Ben prima di quanto previsto.

17.11 Piccole auto ibride

La partita dell'auto ibrida in Europa si giocherà sulle piccole. Lo ha detto forte e chiaro un sondaggio del mensile specializzato *Interautonews*, il più letto dagli operatori del mondo dell'auto in Italia, svolto già nel novembre del 2005.

La gente chiede informazioni in concessionaria, dimostra anche di saperne parecchio dal punto di vista tecnico ma, soprattutto, chiede quando sarà disponibile un'auto compatta da città con quel bellissimo sistema, che fa dialogare ed interagire il normale motore, delle batterie ed uno o più motori elettrici.

La Toyota va avanti senza esitazioni ed il suo prossimo obiettivo è proprio quello di scendere giù nella sua gamma di prodotto con la proposta di modelli di piccole ibride. Si è parlato di probabile versione ibrida della media compatta Auris, che ha raccolto l'eredità del suo modello più venduto al mondo, la gloriosa Corolla. E che appartiene al segmento più diffuso in Europa. Ma per ora dice di non avere come obiettivo a breve termine l'introduzione di una Yaris ibrida, quella che tutti vorrebbero invece qui da noi, in Italia. "Questione di costi", dice Kazuo Okamoto - vice presidente di Toyota Motor Corporation responsabile per la ricerca, l'innovazione e lo sviluppo prodotto. "Il nostro obiettivo è arrivare a vendere un milione di auto ibride l'anno per gli anni 2010. Questo volume ci consentirà di far scendere al livello desiderato i costi del sistema, quindi di diffonderlo con maggiore intensità in ogni fascia di prodotto".

L'obiettivo di un milione di ibridi, tradotto in quote destinate ai grandi mercati, significa 750.000 ibride tra Giappone, Stati Uniti e altri mercati, 250.000 ibride in Europa. Numeri che tradotti in tecnologie e segmenti di prodotto significano per Toyota una grande attenzione ai sistemi ibridi con motore a benzina destinati alle berline ed ai SUV (per centrare l'obiettivo in Giappone e Stati Uniti) e sviluppo di un primo modello più sbilanciato verso l'Europa, nel segmento di più ampia diffusione sul mercato, quello della Auris, appunto. "La Yaris ibrida arriverà - continua Okamoto - ma sarà l'ultimo segmento nel quale renderemo disponibile l'ibrido, perché possa beneficiare in termini di costi, prestazioni, pesi ed ingombri dello sviluppo e delle vendite realizzate con le auto più grandi e di maggior costo". L'appuntamento quindi, in funzione del successo che le altre ibride avranno avuto nel frattempo, è per il successivo modello, oltre il 2010. Ma è ormai certo che in casa Toyota sia in rampa di lancio una Prius Compact.

Chi invece sta cercando di rompere l'incantesimo - e in parte anche guastare i programmi preconfezionati dal management della Toyota - è la solita Honda. Sì, la Honda. Cioè il marchio che già una volta ha tolto la soddisfazione di un primato nell'ibrido ai rivali della Toyota. Quando nel 1999 arrivò per prima con un'auto ibrida negli Stati Uniti grazie alla Insight, bruciando sullo scatto la Prius. La stessa storia si potrebbe ripetere in Europa per l'arrivo della prima piccola ibrida, che potrebbe essere la Jazz, e non la Prius Compact.

In questo la Honda può incassare la maggiore semplicità di costruzione ed assemblaggio, oltre che il minor costo di produzione del suo sistema ibrido IMA (Integrated Motor Assist), rispetto a quello Toyota HSD (Hybrid Sinergy Drive). Il sistema IMA viene classificato come “mild hybrid”, cioè “ibrido leggero” – in quanto la potenza del motore elettrico è abbastanza contenuta e, conseguentemente, il suo intervento è limitato alle fasi di spunto, di accelerazione e di mantenimento della velocità in condizioni di crociera. Questo sistema, con le caratteristiche già introdotte nella nuova Civic Hybrid e nella recente Honda Insight, sarebbe ampiamente sufficiente a garantire eccellenti risultati in termini di risparmio di combustibile, riduzione delle emissioni e miglioramento delle prestazioni in una piccola auto come la Jazz. E infatti la Jazz ibrida con sistema IMA è praticamente già pronta e potrebbe arrivare a breve sul mercato europeo. Soprattutto se una mano ai volumi di diffusione a livello mondiale arriverà anche dagli USA, dove la Jazz è stata lanciata nel 2006.

Intanto tra i marchi europei il gruppo PSA Peugeot Citroen lavora al lancio dei suoi ibridi diesel, annunciato su auto medie compatte come la Peugeot 307 e la Citroen C4. Ma tutte le tecnologie in corso di sviluppo sono applicabili anche alle motorizzazioni a benzina ed anche a modelli più piccoli, come la Citroen C3 e la Peugeot 207. Il gruppo francese ha “rilanciato” nella corsa all’ibrido, mostrando subito il suo punto di arrivo più ambizioso – quello del sistema con motore diesel. Ma facendo questo ha dato un importante impulso alla ricerca e allo sviluppo interno dei nuovi sistemi ibridi, aprendosi così le porte per un ingresso nell’ibrido non appena una o più delle soluzioni in corso di perfezionamento si dimostreranno affidabili e competitive.

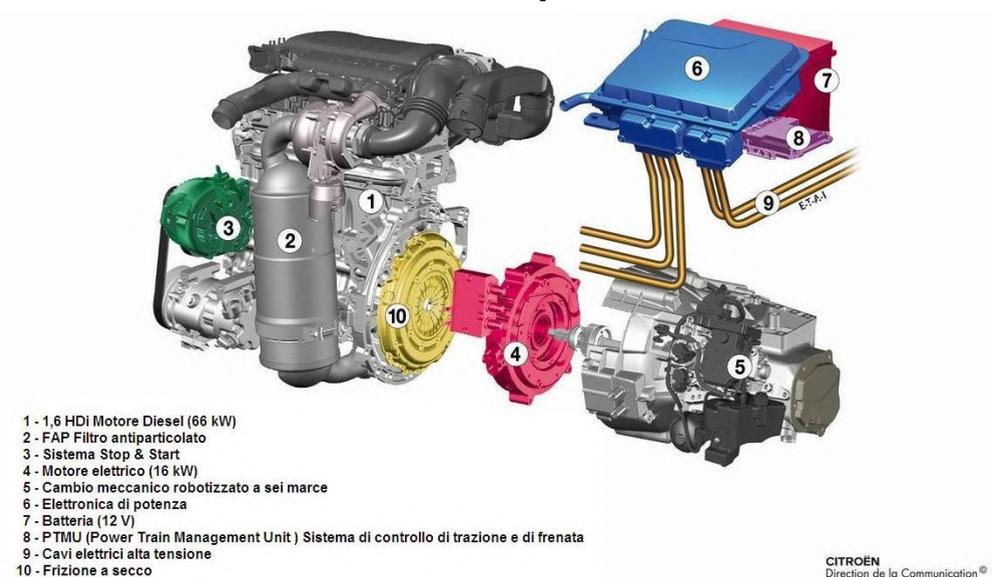


Fig. 17.11 - Schema del powertrain della Citroen C4 Hybrid-HDi con motore ibrido diesel realizzato dal gruppo PSA Peugeot Citroen

La sorpresa annunciata, invece. L'ibrido che "avrebbe dovuto essere" già da anni ed non è ancora mai stato, si chiama Smart. La piccola auto multicolore era nata nell'idea della Swatch per essere innovativa in tutto, come i suoi orologi di plastica. Quindi ibrida ed elettrica nei sistemi di trazione. Non "soltanto" a benzina o gasolio, come poi invece è stato una volta uscita la Swatch dall'operazione ed affidata alla sola impostazione teutonica della Mercedes, la testa del marchio. "La Smart ha già grossi problemi economici così, figuriamoci se avesse scelto o se potrà scegliere strade più costose" – affermano gli analisti più tradizionali. Intanto però la Smart Crosstown ibrida ha frequentato per mesi i saloni più importanti (Francoforte, Tokyo, Detroit, Ginevra) e gli occhi dei visitatori si sono soffermati a lungo su due particolari: la sua fantastica "faccia da Jeep" e la scritta "Hybrid" che splende sul portellone posteriore. I padroni (di oggi o di domani) del marchio Smart faranno bene a tenerne conto. Così come farà bene il gruppo BMW a considerare il successo ottenuto a Ginevra 2006 dell'elaborazione indipendente del carrozziere milanese Castagna sulla Mini, presentata in versione ibrida e subito acclamata da pubblico e critica. È il peso del successo: bella fuori, ibrida dentro.

17.12 Gli scenari: ibrido ed altro

La partita è cruciale. C'è in gioco ben più del futuro dell'auto, perchè non si tratta di scegliere tra diverse tecnologie tutte appartenenti allo stesso sistema energetico e di sviluppo. Si tratta di scegliere tra diversi domani, ognuno dei quali nasconde implicitamente ed inevitabilmente dei rischi, prendendo delle decisioni oggi. E per la prima volta l'auto non è spettatrice di questa svolta epocale, ma si trova al centro della scena – da vera, debuttante protagonista.

Prima c'era una certezza, il petrolio. E da questa certezza tutti partivano per le loro proposte, auto compresa. Oggi la certezza non c'è più, e non è esattamente definito cosa ci sarà domani, o dopodomani, al suo posto. Il petrolio c'è ancora, naturalmente, ma c'è anche sempre più forte la convinzione che sia il caso di divenirne progressivamente meno dipendenti. Il segnale più evidente è il prezzo del barile di greggio, che viaggia verso vette mai toccate, con la barriera dei cinquanta dollari infranta da tempo ed addirittura quella che solo pochi mesi fa era l'innominabile quota cento entrata a far parte delle analisi strategiche internazionali.

Già, ma cosa c'entra l'auto? C'entra come mai prima, perché è proprio il settore del trasporto su gomma quello maggiormente ancorato all'utilizzo di derivati del petrolio. Ed è proprio imboccando strade giuste (o sbagliate) nell'indirizzo del domani veicolistico che i paesi più importanti del mondo stanno giocando la loro partita più delicata. Andare a benzina, oppure continuare a spingere motorizzazioni a gasolio, o affrontare una transizione che limita consumi ed emissioni con GPL (sempre derivato dal petrolio) e metano (prodotto non petrolifero, ma comunque fossile e destinato all'esaurimento), o invece imbocca-

re la strada dello sviluppo di sistemi di trazione ibrida. E per il prossimo decennio? Tutti dicono idrogeno, ma le scelte a breve termine, in questa prospettiva, non hanno tutte lo stesso significato.

Allora emergono scuole di pensiero, interessi dominanti e strategie diverse, che sullo scacchiere internazionale dell'auto stanno combattendo anche a colpi di informazione (più o meno corretta, più o meno parziale).

17.12.1 Case tedesche e case francesi

La parola d'ordine è "diesel". Dopo aver sviluppato per anni motori a gasolio che oggi sono in grado di fornire potenze, coppie e livelli di consumo di grandissimo interesse, le case franco-tedesche difendono strenuamente la loro maggiore fonte di guadagno. Un motore diesel oggi non costa più di 500-1.000 euro aggiuntivi rispetto ad uno a benzina paragonabile in termini di prestazioni. Mentre il cliente è disposto a pagare l'auto che ne è equipaggiata dai 1.500 ai 3.500 in più rispetto alla confrontabile versione a benzina. Basta questo a capire la strategia di difesa assoluta del diesel da parte di marchi che sono molto forti nella produzione e nella commercializzazione di queste motorizzazioni.

Quindi poca enfasi sull'ibrido, almeno a breve termine. Con attenzione focalizzata sui consumi, che motori i diesel sono in grado di contenere anche di un 15% rispetto a quelli a benzina (ovviamente molto dipende dalle condizioni di confronto). Quindi, in campo ambientale, massima considerazione delle normative internazionali sulla riduzione della CO₂ (gas ad effetto serra), maggiore resistenza a parlare di emissioni in termini di polveri sottili o di NOx, per abbattere i quali l'auto a gasolio deve dotarsi di tecnologie di filtraggio e trattamento post-combustione.

Per il futuro accordo sull'idrogeno. Ma se BMW mantiene una coerenza di fondo, lavorando al lancio di modelli funzionanti col nuovo combustibile ma sempre dotati di motore a combustione interna, la prospettiva pare meno chiaramente raggiungibile per chi – come DaimlerChrysler – punta all'auto a celle a combustibile, che condivide molti componenti con l'auto ibrida, ma pochissimi con l'auto a gasolio. Poi c'è il gruppo Volkswagen, che per ora sceglie la via dello scetticismo sia sull'ibrido, sia sull'idrogeno. In Francia, PSA Peugeot Citroen ha invece deciso di rompere il muro "anti-ibrido" ed ha annunciato modelli con doppia motorizzazione dal 2011. All'europea, però: cioè con motore diesel e motore elettrico.

Thierry Koskas, direttore del programma veicoli elettrici della Renault, al salone di Ginevra 2009 ha dichiarato che entro la fine del 2011 la Renault potrà vantare il lancio sul mercato di una gamma di quattro veicoli elettrici: una berlina elettrica tre volumi (tipo Megane), una Kangoo elettrica, un modello compatto completamente nuovo (tipo Clio) e una piccola auto da città.

In ultimo, ma non ultima, la casa tedesca Mercedes-BenzDaimler con i suoi marchi Mercedes-Benz e Smart. Per la Mercedes-Benz, basta citare l'ammiraglia Classe S 400 HYBRID, con motore a benzina modificato da 3,5 litri (279 cavalli di potenza) più il motore elettrico (20 cavalli) ed una coppia pari a 160 Nm. Per la Smart, l'ormai nota ForTwo Mhd (Micro Hybrid Drive) e la sua ultima creatura in versione Electric Drive, totalmente elettrica plug-in. È d'obbligo citare il progetto Smart-Enel, che prevede per il 2010 la fornitura di 100 vetture elettriche, Smart ForTwo Electric Drive, tra Roma, Pisa e Milano, per la quale Enel si impegnerà allo sviluppo, creazione e gestione (con un sistema centrale) di oltre 400 punti di ricarica ad hoc. Inoltre l'energia usata per la ricarica delle auto elettriche sarà prodotta interamente da fonti rinnovabili.

17.12.2 Case giapponesi

La parola d'ordine è "ibrido". Avendo due mercati importantissimi per il fatturato globale (Giappone e Stati Uniti) stradominati dalle motorizzazioni a benzina, i marchi del Sol Levante si sono lanciati da soli nell'avventura che piaceva a tutti gli ingegneri ma che era dipinta come impossibile da tutti gli analisti finanziari: sviluppare auto con due motorizzazioni, una a benzina (ma non necessariamente...) ed una elettrica, che grazie a meccanica sopraffina, molta elettronica ed a un pacco batterie permettessero di aumentare le prestazioni, abbassando consumi ed emissioni inquinanti.

È passato quasi un decennio da quando la Toyota Prius, prima nata della nuova specie, comparve come un timido (e brutto) anatroccolo al Salone di Tokyo nell'ottobre 1997. Dipinta come una follia, la tecnologia di quell'auto è adesso imitata e "sfidata" da migliaia di ricercatori nel mondo, intenti a coprire quasi dieci anni di vantaggio guadagnati dai giapponesi mettendo auto ibride su strada, nelle mani di comuni clienti.

La Honda ha seguito subito la strada della Toyota, ed è arrivata addirittura prima negli USA con la sua Insight ibrida, sfoggiata subito ai party di Hollywood come simbolo dell'environmentally correct. Negli ultimi anni tutte le case giapponesi hanno preso la stessa strada, con la parziale eccezione di Nissan – all'inizio più tiepida delle altre per volere del gruppo che la controlla, la Renault, anche se al salone di Ginevra del marzo 2009 Renault e Nissan, unite tra loro da un'alleanza strategica, confermano i loro piani di sviluppo dell'auto elettrica ed anche il programma di introduzione sul mercato in Europa, in America e in Asia. Gli fa eco anche la Mistubishi.

Inoltre, sempre in casa Nissan, Francois Bancon, responsabile del dipartimento prodotti avanzati, afferma che anche se i primi modelli di auto elettrica non stravolgeranno "il concetto di automobile", saranno, però, modelli fatti ad hoc per la trazione elettrica e non dei modelli elettrici di quelli attuali. In questo la strategia Nissan differisce da quella della Renault, e se si sposta l'attenzione un po' più in là nel tempo si notano ulteriori elementi di particolare interesse:

è, infatti, dopo il 2012 che Bancon ipotizza un ripensamento totale dell'auto con comandi e trasmissioni by-wire ed sistemi di infotainment sempre più avanzati.

La convinzione giapponese suona più o meno così: l'auto di domani avrà motori elettrici, quindi meglio far salire subito a bordo la nuova tecnologia. Per ora in un sistema ibrido ed insieme al motore a combustione interna, poi – dirà il mercato quando – da sola, con batterie al posto del serbatoio, oppure con un pieno fatto di diavolerie ancora nascoste in qualche cassetto, oppure col serbatoio colmo di idrogeno.

17.12.3 Case americane

Alle parole d'ordine "ibrido e idrogeno", con l'avvento alla Casa Bianca di Barack Obama, si è aggiunta quella di "plug-in" e la collegata attenzione alla tecnologia delle batterie. La strategia della Presidenza americana punta a far arrivare presto e bene sul mercato auto capaci di trazione soltanto elettrica almeno per tratti di percorso e ricaricabili dalla presa elettrica.

L'attenzione alla tecnologia delle celle a combustibile e all'idrogeno in applicazioni di mobilità rimane ma viene inevitabilmente legata alla preventiva "elettrificazione" dei sistemi di trazione nella prima metà del decennio 2010, ottenibile appunto con lo sviluppo di sistemi ibridi plug-in e di auto elettriche per ambito urbano.

Su questa linea è posizionato il piano di salvataggio e rilancio delle grandi case automobilistiche americane, deputate a generare nuova tecnologia e nuovi canali industriali per il loro indotto. Primo tra tutti quello delle batterie e dei componenti elettrici ed elettronici per la trazione elettrica, sulla quale si basa anche l'estensione di autonomia ottenibile grazie all'arrivo a bordo dell'idrogeno e delle celle a combustibile.

Grande attenzione all'ibrido, che i giapponesi stanno affermando fino all'inverosimile – soprattutto come strumento d'immagine, è vero – ma con un'efficacia dirompente negli Stati Uniti. E grande attenzione all'indipendenza energetica dal petrolio "non americano", cioè all'elettricità e poi all'idrogeno come soluzioni risolutive se prodotte da fonti non oil. Forse un po' tardivo ma chiaro, lineare, impeccabile. Strategia coraggiosa ed ambiziosa, degna del paese più potente del mondo, oltre che tecnologicamente più avanzato.

Ma c'è un però. Perché tutte le case americane hanno o hanno avuto negli ultimi decenni una forte presenza industriale e fortissimi legami economici e tecnologici con l'Europa delle quattro ruote, che ha sviluppato propulsori a gasolio di eccellente efficienza. Altra tecnologia di interesse per il mercato USA quindi, soprattutto per i grandi gruppi automobilistici, è il Diesel. In molti avrebbero un gran vantaggio da un'eventuale storica evoluzione verso il gasolio del mercato a stelle e strisce. Quindi la strategia politica deve essere molto attenta a non perdere determinazione nell'attuazione pratica e nelle possibili

manipolazioni industriali, perché la tentazione di vendere auto a gasolio in America è fortissima, e sarebbe una vera manna per molti gruppi dal punto di vista dei conti economici. Non nuove tecnologie, come l'ibrido e con esso trazione elettrica e batterie, ma trasferimento di tecnologie Diesel attraverso l'Atlantico, con il gasolio anche super-pulito, se serve. Questa l'altra possibilità in campo.

17.12.4 Case italiane

La parola d'ordine è "gas". Sia metano, sia GPL stanno entrando sempre più nell'offerta di tutte le case che operano in Italia (sia la Fiat che i marchi esteri). Le condizioni di base per una diffusione dei due combustibili a basso impatto ambientale ci sono tutte: l'Italia è un paese largamente metanizzato, pertanto la possibilità di ampliare la rete di distribuzione è senz'altro più a portata di mano che in altri Stati. Inoltre sono ancora numerosi gli impianti di raffinazione del petrolio sul nostro territorio, pertanto anche la disponibilità di GPL (gas di petrolio liquefatto) è maggiore che altrove.

Guardando più in là, però, le eccellenti competenze scientifiche e tecnologiche del nostro paese sono in grado di sviluppare soluzioni maggiormente decisive per una penetrazione tecnologica internazionale, rispetto alla semplice applicazione di due tecnologie note e mature come quella del metano e quella del GPL.



Fig. 17.12 - La Panda Hydrogen, dotata di motore elettrico di trazione alimentato solamente da celle a combustibile, quindi senza batterie. L'idrogeno che alimenta le celle è contenuto, alla pressione di 350 bar, in un serbatoio di materiale composito, installato sotto il pianale posteriore della vettura

Se il rilancio Fiat andrà avanti con i ritmi annunciati dal gruppo di Marchionne, c'è da aspettarsi un re-ingresso nella partita dell'ibrido che sarebbe importantissimo anche in prospettiva elettrica e idrogeno. E, in effetti, si parla di probabile Nuova 500 ibrida nel 2011. E ci sono anche ipotesi di piccolissima Fiat Topolino ibrida o elettrica. La Panda Hydrogen, intanto, esiste ed è totalmente "made in Italy", l'ibrido Fiat la avvicinerrebbe non poco in termini industriali.

17.13 Il ritorno dell'auto elettrica

Tutti parlano di nuovo di auto elettrica. Per alcuni è il ritorno di un'illusione, visto che la quattro ruote a batterie è già nata e scomparsa una volta nel recente passato, a cavallo tra gli anni Ottanta e gli anni Novanta. Quindi la sua rinascita non prometterebbe niente di concreto, se non il ripetersi di un sogno senza lieto fine. Per altri è la fine prematura del successo annunciato per l'auto a idrogeno, perchè l'elettricità già esiste ed è dappertutto, mentre l'idrogeno no. Quindi se "emissioni zero" deve essere, allora tanto vale utilizzare la corrente elettrica, invece di mettersi a produrre un nuovo combustibile che in pratica ancora non esiste.

Invece l'auto elettrica di oggi è tutta un'altra cosa. È il risultato di almeno due fenomeni industriali di successo, tanto per cominciare. Il primo dei due è totalmente automobilistico, e purtroppo finora ben poco europeo. Si tratta del successo innegabile dell'auto ibrida (con motore a combustione interna affiancato da motore elettrico e batterie), che ha dimostrato con i fatti di poter funzionare. Di auto ibride nel mondo ce ne sono ormai quasi un milione e mezzo, poche rispetto al numero totale delle auto in circolazione nel pianeta, stimato attorno ai settecento milioni di unità. Ma abbastanza per dire che si tratta di una storia di successo, perchè quei sistemi descritti dai detrattori come complessi, costosi e delicati stanno dimostrando su strada di avere un'affidabilità addirittura superiore a quella della auto con il solo motore a benzina o diesel. E stanno anche cominciando a portare guadagni a chi ha deciso di metterli sul mercato, oltre a realizzare, nelle giuste condizioni di impiego, risparmi importanti in termini di combustibile ed abbattimenti delle emissioni.

Dentro ogni auto ibrida c'è un'auto elettrica. Perché ci sono batterie, sistema di controllo della potenza, uno o più motori elettrici. Quindi il successo crescente della prima, di fatto porta su strada la seconda. E chiunque abbia guidato un ibrido sa che il primo appetito che scatta è quello nei confronti di una sempre maggiore capacità del veicolo di funzionare in modalità elettrica. Quindi la richiesta dei clienti di avere una maggiore componente elettrica negli ibridi è cosa facilmente prevedibile. Non a caso gli ibridi plug-in, cioè quelli che si potranno ricaricare sia con la marcia che dalla presa della corrente, sono l'espressione oggi più presente in quella che genericamente si descrive come rinascita dell'auto elettrica.

Il secondo fenomeno industriale dal quale prende origine la rinnovata attenzione per l'elettrico viene dal di fuori del mondo dell'auto. Si tratta del successo planetario delle piccole e leggere batterie al litio, ormai diffuse praticamente nelle tasche o nelle borse di tutti come accumulatori per telefonini, computer portatili, macchine fotografiche digitali e lettori musicali. La tecnologia delle batterie cerca adesso nuovi mercati, e quello dell'auto è sicuramente il più appetibile.

In quanto all'auto a idrogeno, basta guardarla bene per vedere che, quando ha a bordo le celle a combustibile al posto del motore a scoppio, è un'auto elettrica. Quindi anche in questo caso il passaggio per un'elettrificazione della trazione non è affatto un passo indietro, anzi.

Tant'è che tutte le case ne continuano lo sviluppo e nei prossimi due anni Honda, Mercedes, General Motors e Toyota metteranno su strada nuove flotte ormai definite "di serie".

Il percorso dell'elettrico degli anni Duemila, quindi, pare tutt'altro che fumoso. È fatto di auto con sempre più autonomia in "emissioni zero", passa per l'ibrido plug-in ed arriva fino all'idrogeno. Quando si realizzerà, sarà un bene per l'auto e per l'ambiente.

CAPITOLO 18

VEICOLI IBRIDI SOLARI

Progetto ottimizzato e gestione dei flussi energetici

Ivan Arsie, Cesare Pianese, Gianfranco Rizzo, Marco Sorrentino

Università degli Studi di Salerno

Le spinte verso l'utilizzazione della tecnologia fotovoltaica su vetture elettriche e/o ibride sono determinate dalla crescente emergenza ambientale legata all'effetto serra, al depauperamento dei combustibili fossili, agli incrementi del prezzo del petrolio con le relative incertezze di approvvigionamento e, d'altra parte, ai progressi tecnologici ed alle riduzioni dei costi della tecnologia fotovoltaica.

Sul fronte dell'autotrazione, i veicoli ibridi elettrici (HEV) hanno dimostrato di poter rappresentare una soluzione a breve termine al problema della riduzione dei consumi di combustibile per l'autotrazione, con un notevole quanto inatteso successo commerciale, permettendo di utilizzare in modo ottimizzato due propulsori (elettrico e termico) e di recuperare parte dell'energia durante la frenata [1-4]. D'altra parte, diverse applicazioni prototipali hanno dimostrato la fattibilità dei veicoli solari, che hanno però dei limiti di potenza, ingombro ed autonomia che non li rendono utilizzabili in applicazioni pratiche.

I veicoli ibridi solari potrebbero pertanto sommare i vantaggi dei veicoli ibridi e delle vetture solari, tramite l'integrazione di pannelli fotovoltaici su un veicolo ibrido [5-9]. Benché la potenza media ricavabile da pannelli fotovoltaici montati sul tetto di una vettura sia, con le attuali tecnologie, molto inferiore alla potenza massima di buona parte delle vetture circolanti, il loro contributo può risultare significativo considerando come una larga parte degli automobilisti usi la propria auto prevalentemente per brevi spostamenti in aree urbane, per non più di un'ora al giorno, e con il solo guidatore a bordo [10].

In tali condizioni, la potenza media necessaria alla trazione è molto inferiore alla potenza massima e l'energia captabile dai pannelli durante la guida e, soprattutto, in fase di parcheggio, può rappresentare una frazione significativa dell'energia richiesta [11], con una opportuna progettazione del sistema propulsore-veicolo. Studi preliminari hanno mostrato come i risparmi di combustibile possano raggiungere il 20-30% rispetto al veicolo ibrido di riferimento, e valori ancora maggiori rispetto ad un veicolo tradizionale. Nonostante i potenziali vantaggi di questa soluzione, lo sforzo di ricerca in questa direzione appare ancora piuttosto ridotto, con lo sviluppo di alcuni prototipi [5-8, 12] ma con una carenza di dati oggettivi e di studi sistematici nella letteratura libera. In particolare, si rileva la carenza di modelli di calcolo adeguati, che de-

scrivano in modo integrato gli aspetti legati alla progettazione ed al controllo di un veicolo ibrido solare.

Nel capitolo sono riportate le analisi finalizzate alla progettazione ottimale di un veicolo ibrido solare, con riferimento alla scelta ed al posizionamento dei pannelli fotovoltaici ed al dimensionamento di massima del veicolo e degli organi di propulsione.

Successivamente è presentato uno studio relativo allo sviluppo delle strategie più appropriate per una corretta gestione dei flussi energetici a bordo del veicolo, con riferimento al prototipo di veicolo ibrido solare attualmente in fase di sviluppo presso l'Università di Salerno [13].

18.1 Struttura del veicolo ibrido solare

La struttura di un power train ibrido può essere di diversa tipologia: serie, parallela e mista (serie-parallela). Nel caso di veicoli ibridi solari la struttura serie appare quella più conveniente. In questa configurazione, infatti, i pannelli fotovoltaici (PV) lavorano in supporto del generatore elettrico (EG), azionato dal motore a combustione interna (ICE), nelle fasi di ricarica del pacco batterie, sia nelle fasi di parcheggio che durante la marcia. Il motore elettrico (EM) può sia fornire l'energia meccanica necessaria alla propulsione, sia ricaricare le batterie con la frenata rigenerativa (Fig. 18.1).

Il vantaggio della struttura serie risiede nell'opportunità di far funzionare il motore termico (ICE) per lunghi periodi ad una potenza costante. Pertanto nelle fasi di progettazione del veicolo HSV e delle relative strategie di controllo, l'ICE e l'EM possono essere dimensionati e gestiti in modo tale da far lavorare il motore termico prevalentemente ad una potenza in corrispondenza della quale si realizzi la massima efficienza di conversione.

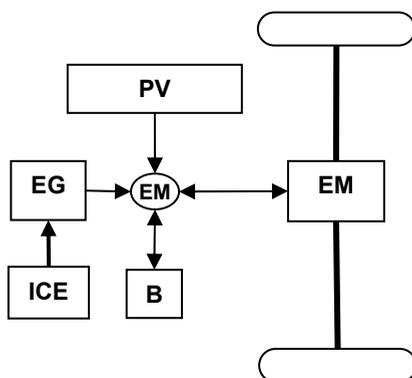


Fig. 18.1 - Diagramma a blocchi rappresentativo della struttura del veicolo ibrido solare in configurazione serie

Legenda: PV pannelli fotovoltaici; EG generatore elettrico; ICE motore a combustione interna; EM motore elettrico; B batterie

18.2 Analisi di progettazione del veicolo ibrido solare

18.2.1 Utilizzo dell'energia solare per la propulsione del veicolo

L'ammontare di energia solare captata dai pannelli e realmente disponibile per la propulsione del veicolo (e.g. tenendo quindi conto anche di effetti legati all'ombreggiamento e di condizioni atmosferiche avverse) viene valutato attraverso il "calcolatore solare" sviluppato dall'US National Renewable Energy Lab [14]. In Tab. 18.1 è riportata l'energia media mensile in corrispondenza di quattro località statunitensi, comprese tra i 21° ed i 61° di latitudine. I dati sono relativi a serie storiche rilevate nel trentennio 1961-1990 e si riferiscono ad un sistema di pannelli al silicio cristallino della potenza nominale di 1 kW, posizionato sia orizzontalmente che con un angolo di inclinazione 'ottimale', corrispondente alla latitudine.

In Tab. 18.2 è invece riportata l'energia media annuale, captabile in corrispondenza di 5 differenti angoli di inclinazione. Come atteso, la regolazione continua dell'angolo di inclinazione (*tracking*), attraverso dispositivi a due o ad un unico asse, è quella che garantisce i massimi valori di energia captata. I dati evidenziano inoltre che, ad eccezione delle latitudini maggiori e dei periodi invernali, la differenza tra la posizione orizzontale e quella 'ottimale' risulta trascurabile. Nel caso di posizionamento verticale, invece, l'energia captabile è pari a circa un terzo di quella massima.

Tab. 18.1 - Media mensile dell'energia solare netta [kWh/m²] captabile in 4 località USA

| Me- se | Honolulu 21.33° | | San Antonio 29.53° | | Chicago 41.78° | | Anchorage 61.17° | |
|-------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| | Inclina- zione orizzon- tale | Inclina- zione ottimale | Inclina- zione orizzon- tale | Inclina- zione ottimale | Inclina- zione orizzon- tale | Inclina- zione ottimale | Inclina- zione orizzon- tale | Inclina- zione ottimale |
| 1 | 108 | 137 | 85 | 120 | 50 | 95 | 2 | 23 |
| 2 | 117 | 139 | 100 | 125 | 71 | 106 | 21 | 60 |
| 3 | 150 | 161 | 136 | 152 | 108 | 132 | 63 | 115 |
| 4 | 155 | 154 | 144 | 146 | 136 | 143 | 99 | 124 |
| 5 | 176 | 164 | 165 | 154 | 167 | 157 | 139 | 139 |
| 6 | 173 | 156 | 169 | 153 | 168 | 149 | 140 | 125 |
| 7 | 179 | 164 | 185 | 170 | 172 | 157 | 132 | 121 |
| 8 | 175 | 170 | 170 | 169 | 140 | 140 | 95 | 102 |
| 9 | 160 | 168 | 138 | 151 | 111 | 131 | 60 | 88 |
| 10 | 136 | 157 | 124 | 154 | 85 | 123 | 22 | 53 |
| 11 | 110 | 137 | 93 | 130 | 48 | 81 | 4 | 40 |
| 12 | 104 | 135 | 79 | 117 | 38 | 70 | 0 | 16 |
| An- no | 1742 | 1842 | 1589 | 1741 | 1294 | 1485 | 778 | 1004 |
| Gior- no | 4,773 | 5,047 | 4,353 | 4,770 | 3,545 | 4,068 | 2,132 | 2,751 |

Tab. 18.2 - Media annuale dell'energia solare netta [kWh/m²] captabile in funzione della angolazione dei pannelli fotovoltaici

| | | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Latitudine [deg] | 21.33 | 29.53 | 41.78 | 61.17 |
| <i>Tracking</i> a 2 assi | 2547 | 2279 | 1963 | 1384 |
| <i>Tracking</i> ad 1 asse | 2468 | 2216 | 1906 | 1326 |
| Angolazione 'ottimale' | 1842 | 1741 | 1485 | 1004 |
| Orizzontale | 1742 | 1589 | 1294 | 778 |
| Verticale (media) | 785 | 751 | 686 | 509 |

Per quanto riguarda il posizionamento dei pannelli, la soluzione più ovvia consiste nell'installazione sul tetto e sul cofano anteriore, prevalentemente in posizione orizzontale. D'altro canto, nella definizione delle linee guida di progettazione, è opportuno considerare *i*) la possibilità di movimentare i pannelli consentendo il *tracking* ad 1 asse per massimizzare l'energia captata in fase di parcheggio e *ii*) posizionare i pannelli anche sulle fiancate e nella parte posteriore del veicolo, in posizione verticale (la fattibilità di tale ipotesi potrebbe essere opinabile considerando la fragilità dei pannelli).

La massima superficie disponibile per i pannelli può essere calcolata in funzione della geometria del veicolo attraverso la schematizzazione semplificata illustrata in Fig. 18.2:

$$A_{PV,H,MAX} = lw - 0.30w - 0.05lw \quad (1)$$

$$A_{PV,V,MAX} = (2l + w)(h - 0.9) - 0.1 \quad (2)$$

L'energia captabile dai pannelli può essere espressa come somma dei contributi relativi alle fasi di parcheggio (*p*) e guida (*d*) (per semplicità si assumerà che entrambe le fasi abbiano luogo nelle ore diurne). Nel primo caso è ragionevole assumere che il pannello sia integralmente soleggiato mentre, nelle condizioni di moto, il soleggiamento risulterà parziale per effetto delle ombre provocate dalla presenza di edifici, alberi ed ostacoli vari.

In tal senso l'energia solare captata durante la guida è limitata da un fattore $\beta < 1$, che dipende ovviamente dalle caratteristiche del percorso.

Per la stima della frazione di energia captata durante la guida (h_d), si assume che l'energia solare giornaliera sia distribuita su h_{sun} ore ($h_{sun} = 10$), ferma restando l'energia totale captabile dal pannello nelle 24 ore.

I valori riportati in Tab. 18.1 sono comprensivi delle perdite imputabili all'efficienza dei componenti necessari per la produzione di corrente alternata (i.e.inverter, cablaggi) ma non delle perdite dovute ai processi di carica e scarica delle batterie.

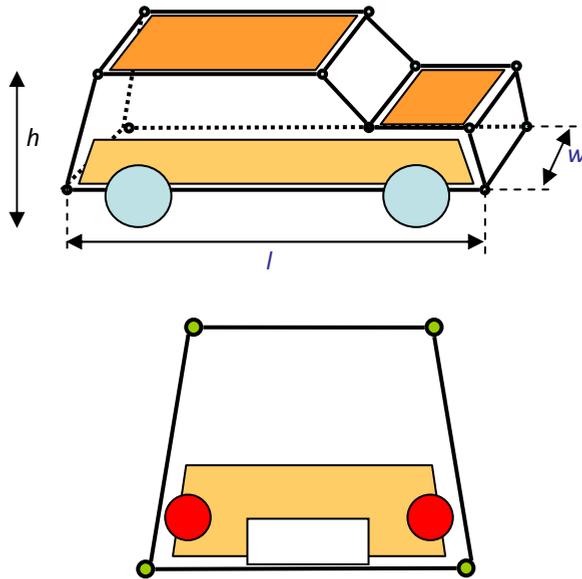


Fig. 18.2 - Schema semplificato di un veicolo solare (viste laterale e posteriore)

In tal senso è opportuno introdurre un ulteriore fattore $\alpha < 1$ che consenta di rappresentare tali inefficienze nelle fasi di parcheggio. L'energia solare incidente è calcolata in funzione dell'angolazione del pannello: orizzontale, *tracking*, verticale. L'energia solare netta disponibile per la trazione durante le fasi di parcheggio e guida può essere quindi espressa come:

$$E_{s,p} = \eta_p A_{PV} e_{sun} \frac{h_{sun} - h_d}{h_{sun}} \alpha \quad (3)$$

$$E_{s,d} = \eta_p A_{PV} e_{sun} \frac{h_d}{h_{sun}} \beta \quad (4)$$

dove e_{sun} è l'energia media giornaliera captata dai pannelli in posizione orizzontale. Nel seguito, il termine e_{sun} sarà fissato a 4,3 kWh/giorno, che corrisponde approssimativamente al valore relativo ad una latitudine di circa 30° nel mese di giugno.

L'energia giornaliera richiesta per la trazione del veicolo può essere espressa in funzione della potenza media P_{av} e delle ore di guida h_d :

$$E_d = \int_{h_d} P(t) \cdot dt = h_d P_{av} \quad (5)$$

Noti il ciclo di guida e le caratteristiche del veicolo, la potenza istantanea può essere calcolata integrando un modello della dinamica longitudinale del veicolo. In tal senso, l'energia richiesta per la trazione dipende dal peso e dalla geometria del veicolo, che influenzano, a loro volta, il dimensionamento del si-

stema di propulsione e la superficie pannellabile, come sarà illustrato nel prossimo paragrafo.

Il contributo dell'energia solare alla trazione può essere determinato come:

$$\lambda = \frac{E_{sum}}{E_d} = \frac{E_{s,p} + E_{s,d}}{E_d} \quad (6)$$

In prima approssimazione il consumo di combustibile per le due tipologie di veicolo -convenzionale (CV) ed ibrido (HSV) - può essere calcolato come:

$$m_{f,CV} = \frac{3600E_d}{\eta_{ICE}H_i} \quad (7)$$

$$m_{f,HSV} = \frac{(1-\lambda)3600E_d}{\eta_{HEV}H_i} \quad (8)$$

18.2.2 Peso del veicolo

Il modello parametrico per la stima del peso del veicolo HSV è ottenuto sommando il peso dei componenti specifici (i.e. pannelli solari, pacco batterie, motore a combustione interna, generatore, motore elettrico ed inverter) al peso del veicolo convenzionale (CV) depurato delle masse dei componenti riprogettati o rimossi dall'ibridizzazione (i.e. motore a combustione interna, scatola del cambio, frizione).

Il peso del veicolo convenzionale è stato determinato attraverso un'indagine statistica condotta su un database di 15 automobili utilitarie in commercio, con potenza compresa tra 9,5 e 66 kW (Tab. 18.3).

In tal senso, è stata eseguita un'analisi di regressione lineare, considerando il peso W ($W_{body,CV}$), la potenza P e le dimensioni (lunghezza l , larghezza w , altezza h ed il loro prodotto $V=lwh$) che ha portato alla formulazione di una relazione che esprime il peso del veicolo in funzione della potenza massima e del prodotto tra le tre dimensioni (Tab. 18.4).

Il peso del veicolo ibrido solare (W_{HSV}) può essere quindi valutato attraverso le seguenti relazioni:

$$W_{body,HSV} = W_{body,CV}(P_{ICE,CV}, V) + P_{ICE,CV} \cdot (w_{ICE} + w_{gear}) \quad (9)$$

$$W_{HSV} = W_{body,HSV} + P_{EG} \cdot \frac{w_{ICE}}{\eta_{EG}} + P_{EG} \cdot w_{EG} + P_{EM} w_{EM} + A_{PV} w_{PV} + w_{B,u} \cdot N_B \quad (10)$$

Tab. 18.3 - Database relativo a 15 autovetture utilitarie in commercio

| <i>Modello</i> | <i>Massa [kg]</i> | <i>P [kW]</i> | <i>L [mm]</i> | <i>w [mm]</i> | <i>h [mm]</i> |
|-------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| FIAT Panda | 840 | 40 | 3538 | 1589 | 1578 |
| FIAT Seicento | 735 | 40 | 3337 | 1508 | 1420 |
| Ford KA 1.3 | 900 | 51 | 3620 | 1827 | 1368 |
| Suzuki Alto | 875 | 46 | 3495 | 1475 | 1455 |
| Ford Fiesta | 1050 | 55 | 3917 | 1683 | 1420 |
| Renault Clio 1.2 | 910 | 55 | 3812 | 1940 | 1417 |
| Bingo | 400 | 9,8 | 2530 | 1430 | 1540 |
| Aixam 500 Kubota Diesel | 400 | 9,5 | 2885 | 1450 | 1380 |
| Smart Fourfour 1.1 | 895 | 55 | 3750 | 1680 | 1450 |
| Smart Fortwo Brabus | 800 | 55 | 2500 | 1515 | 1549 |
| Opel Agila | 965 | 44 | 3540 | 1620 | 1695 |
| Mini One | 1115 | 66 | 3626 | 1688 | 1416 |
| Mazda 2 | 1050 | 55 | 3925 | 1680 | 1545 |
| Nissan Micra | 935 | 48 | 3726 | 1595 | 1540 |
| FIAT 500 D | 425 | 16,2 | 2970 | 1322 | 1325 |

Tab. 18.4 - Analisi di regressione per la stima del peso del veicolo convenzionale

| # | Variabili | R^2 |
|---|------------------------------|-------|
| 1 | $W=k_1+k_2P$ | 0,894 |
| 2 | $W= k_1+k_2P+k_3l+k_4w+k_5h$ | 0,973 |
| 3 | $W= k_1+k_2P+k_3V$ | 0,946 |

Per quanto concerne il contributo del pacco batterie, il relativo dimensionamento dipende dalla potenza nominale che dovrà essere pari a:

$$P_B = P_{EM} - P_{EG} \quad (11)$$

È opportuno notare come nell'Eq. (11) è escluso il contributo proveniente dai pannelli solari, a causa della difficoltà di prevedere la disponibilità di radiazione solare e per il trascurabile contributo in potenza assicurato dai pannelli fotovoltaici allo stato attuale della tecnologia. Pertanto, il numero di moduli costituenti il pacco batterie da installare a bordo sarà esprimibile come:

$$N_B = \frac{P_{EM} - P_{EG}}{P_{B,u}} \quad (12)$$

dove il termine $P_{B,u}$ rappresenta la potenza nominale di ciascun modulo di batteria.

Tab. 18.5 - Dati tecnici del veicolo ibrido solare (HSV) e di quello convenzionale (CV)

| | CV | HSV |
|---------------------------------------|---------|---------|
| P_{ICE} [kW] | 75 | 46 |
| Combustibile | Benzina | Benzina |
| P_{EG} [kW] | 0 | 43 |
| P_{EM} [kW] | 0 | 90 |
| N_B [/] | 0 | 27 |
| Superficie pannelli [m ²] | 0 | 1,44 |
| Peso [kg] | 1250 | 1465 |

La potenza nominale richiesta per la macchina elettrica P_{EM} viene valutata imponendo (cfr. Eq. 13 e 14) che il rapporto peso-potenza del veicolo HSV PtW_{HSV} sia pari a quello di un veicolo convenzionale di massa 1250 kg con un propulsore ad accensione comandata da 75 kW, in accordo con quanto riportato in Tab. 18.5:

$$PtW_{HSV} = \frac{P_{ICE,CV}}{W_{CV}} \quad (13)$$

$$P_{EM} = PtW_{HSV} \cdot W_{HSV} \quad (14)$$

18.2.3 Stima dei costi

La valutazione complessiva circa la convenienza di un veicolo ibrido solare rispetto ad un veicolo convenzionale può essere eseguita attraverso la stima dei costi aggiuntivi, imputabili all'ibridizzazione ed ai pannelli fotovoltaici, e del risparmio di combustibile. I costi aggiuntivi C_{HSV} possono essere espressi a partire dal costo unitario di ciascun componente:

$$C_{HSV} = P_{EG} \cdot \frac{C_{ICE}}{\eta_{EG}} + P_{EG} \cdot c_{EG} + A_{PV} c_{PV} + P_{\max} c_{EM} + C_B N_B - \Delta C_{ICE} \quad (15)$$

L'ultimo termine nell'eq. (15) rappresenta la riduzione del costo del motore termico per il veicolo ibrido ($P_{ICE} = P_{EG}/\eta_{EG}$) rispetto al veicolo convenzionale ($P_{ICE} = P_{ICE,CV}$).

Il risparmio giornaliero rispetto al veicolo convenzionale può essere calcolato in funzione del risparmio di combustibile e del costo unitario:

$$S = (m_{f,CV} - m_{f,HSV}) \cdot c_f \quad (16)$$

dove il consumo di combustibile (m_f) è calcolato attraverso un modello di simulazione della dinamica longitudinale del veicolo [15]. Tale modello consente di valutare la richiesta di coppia motrice/frenante necessaria per soddisfare un assegnato profilo di marcia del veicolo, sia nel caso di veicolo convenzionale (CV) che ibrido (HSV). Attraverso la modellazione dei vari componenti (ICE, EG, B, EM, PV), in parte realizzata avvalendosi del simulatore ADVISOR [16], il modello valuta il contributo in termini di potenza richiesto a ciascuno di essi, stimando di conseguenza il profilo temporale del consumo di combustibile e dello stato di carica delle batterie (SOC) [11].

Il *pay-back* per compensare i costi aggiuntivi del HSV rispetto al veicolo convenzionale può essere quindi stimato come:

$$PB = \frac{C_{HSV}}{n_D S} = \frac{C_{HSV}}{300S} \quad (17)$$

18.2.4 Progetto ottimizzato del veicolo ibrido solare

A. Contributo solare

Il contributo che i pannelli fotovoltaici possono fornire alla trazione del veicolo può essere stimato attraverso un semplice bilancio energetico, eseguito considerando l'energia mediamente captabile dai pannelli nell'arco di un'intera giornata. In particolare, il contributo solare percentuale è parametrizzabile rispetto al numero di ore di guida, variabili da 1 a 10, ed all'intervallo di potenza media (0-20 kW), assumendo quale energia media su base annuale il valore normalmente captato nella città di San Antonio in Texas (Tab. 18.1) da un pannello di 6 m² disposto orizzontalmente.

I risultati illustrati in Fig. 18.3 indicano che nel caso di utilizzo continuo del veicolo (i.e. $h_d=10$), l'energia solare può interamente soddisfare il fabbisogno di energia solamente in corrispondenza di un valore molto basso di potenza media alle ruote, pari a circa 1 kW.

Tuttavia, se si assume un uso intermittente dell'auto ad una potenza media significativa, il contributo energetico percentuale ottenibile dai pannelli fotovoltaici risulta essere più interessante. Ad esempio se si guida l'auto per 2 ore al giorno ad una potenza media di 5 kW, o per un'ora a 10 kW, si può arrivare a risparmiare fino al 30% sui consumi di carburante.

In Fig. 18.4 è riportato l'andamento del contributo solare alla trazione al variare della località/latitudine e del mese in varie località USA. Si può osservare che tale contributo nel periodo estivo arriva anche al 40%, mentre in zone come l'Alaska nei mesi invernali diventa quasi nullo.

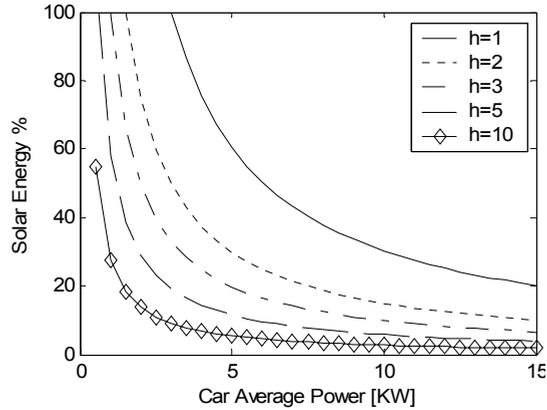


Fig. 18.3 - Contributo dell'energia solare rispetto alla potenza media del veicolo

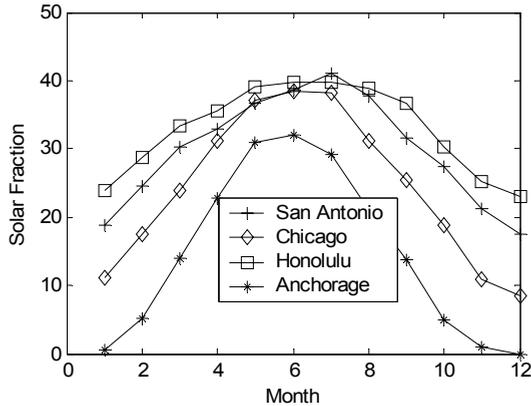


Fig. 18.4 - Contributo percentuale dell'energia solare in varie località USA nel corso dell'anno (Pav=5 kW, Hd=2)

Si noti come sia il *range* di potenza media alle ruote (i.e. 5-10 kW) sia il numero di ore di guida (i.e. 1-2 ore/giorno) presi a riferimento in Fig. 18.3 siano compatibili con l'utilizzo urbano, durante un giorno lavorativo, dei veicoli per il trasporto passeggeri descritti in Tab. 18.4.

È opportuno altresì notare come, a differenza delle utilitarie, nella progettazione dei veicoli HSV si debba anche tener conto del peso addizionale dovuto all'ibridizzazione, che si manifesta attraverso l'aggiunta di un pacco batterie di dimensioni adeguate all'immagazzinamento dell'energia solare durante il parcheggio, e degli stessi pannelli fotovoltaici. Tali considerazioni portano alla introduzione di ulteriori vincoli riguardanti la dimensione ed il peso del veicolo.

B. Rapporto potenza/peso

In Fig. 18.5 vengono illustrati i risultati di un'analisi condotta sulla relazione che intercorre tra il rapporto potenza massima/peso (PtW) e massima potenza. Viene altresì eseguito un confronto tra i valori corrispondenti a un veicolo HSV equipaggiato con un pannello orizzontale di 6 m² e quelli caratteristici di alcune auto attualmente presenti sul mercato. Nella suddetta analisi è stato imposto che le dimensioni del veicolo HSV corrispondano al minimo prodotto tra le dimensioni caratteristiche (i.e. minimo peso dello chassis). È stato quindi impostato e risolto il seguente problema di minimizzazione vincolata:

$$\min_{lwh} V = lwh \quad (18)$$

$$A_{PV,V} = (2l + w)(h - 0.9) - 0.1 \quad (19)$$

$$A_{PV,H} = lw - 0.30w - 0.05lw \quad (20)$$

I risultati presentati in Fig. 18.5 indicano che, con un pannello di 6 m² e per potenze massime non inferiori a 20 kW, il veicolo HSV presenta valori confrontabili (i.e. all'interno di una certa regione di confidenza) a quelli dei veicoli commerciali, laddove con 4 m² ciò si verifica a partire da 10 kW nominali (Fig. 18.6). Quest'ultimo aspetto può essere spiegato considerando che riducendo la superficie dei pannelli si ha una conseguente riduzione, oltre che del contributo energetico solare, anche del peso di pannelli, chassis e pacco batterie.

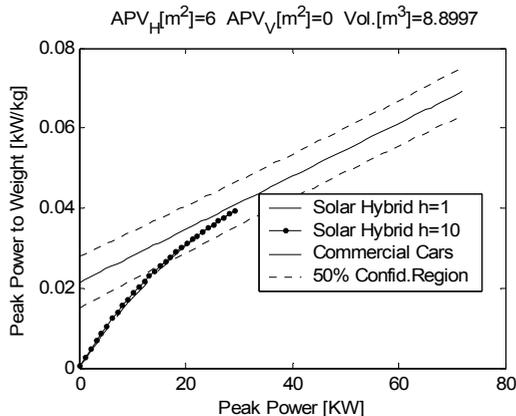


Fig. 18.5 - Rapporto potenza/peso rispetto alla potenza massima - A_{PV}=6 m²

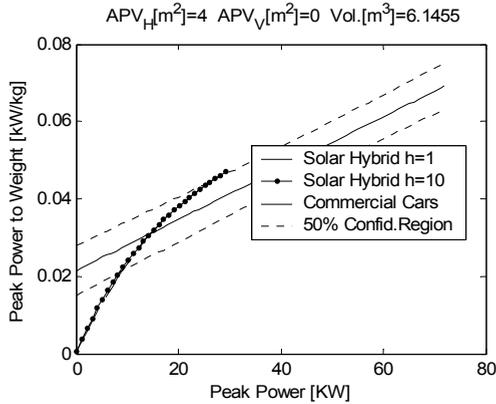


Fig. 18.6 - Rapporto potenza/peso rispetto alla potenza massima - APV=4 m²

C. Analisi di sensitività

L'influenza esercitata dalle variabili di progetto su prestazioni, peso e costo del veicolo è stata valutata attraverso un'analisi di sensitività. In particolare, è emerso che un incremento della potenza massima (*peak factor*) del 50% porta ad aumenti del rapporto potenza/peso e del peso complessivo del veicolo pari, rispettivamente, al 40% ed al 10%.

Tale effetto si spiega considerando il conseguente aumento del peso di inverter, motore elettrico e chassis (Fig. 18.7).

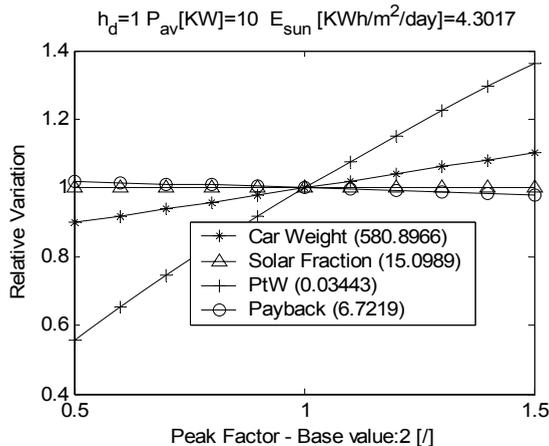


Fig. 18.7 - Effetti della potenza massima (peak factor)

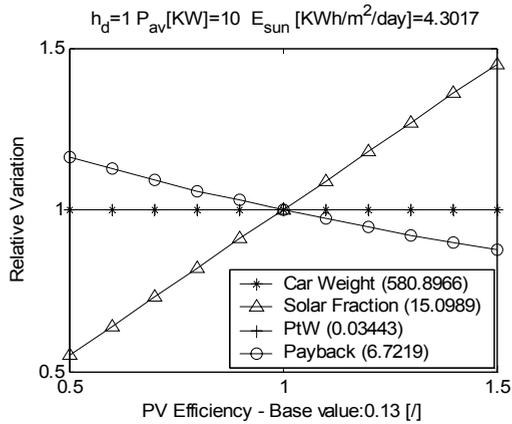


Fig. 18.8 - Effetti dell'efficienza del PV

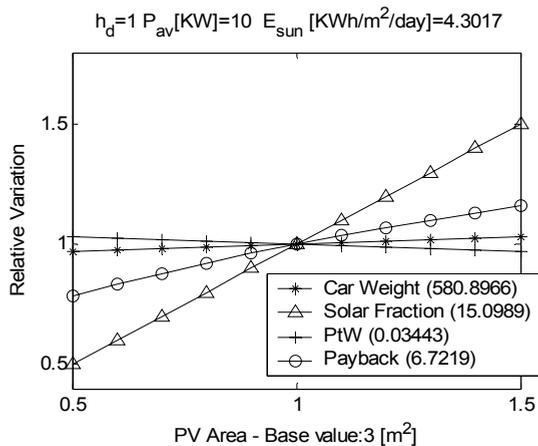


Fig. 18.9 - Effetti della superficie del PV

L'analisi di sensitività svolta ha riguardato anche lo studio degli effetti legati alle variazioni di efficienza (Fig. 18.8) e superficie (Fig. 18.9) dei pannelli.

Per entrambe le variabili si nota che il loro incremento determina un eguale aumento, in termini percentuali, del contributo solare.

Tuttavia, mentre l'aumento di efficienza causa una riduzione del tempo di *payback*, un incremento della superficie dei pannelli fa aumentare l'incidenza del peso del veicolo.

D. Analisi di ottimizzazione

I modelli descritti in precedenza rendono possibile l'esecuzione di analisi di ottimizzazione finalizzate all'individuazione del design ottimale, sia in termini tecnici che economici, di un *power train* ibrido-solare. Nel corso di queste analisi si è assunto il tempo di *pay-back* come funzione obiettivo, laddove sono state scelte come variabili di progetto X la potenza nominale del gruppo generatore P_{EG} , l'area orizzontale dei pannelli $A_{PV,H}$ e le dimensioni caratteristiche del veicolo (l,w,h) .

$$\min_X PB(X) \quad (21)$$

$$G_i(X) \leq 0 \quad i = 1, N_G \quad (22)$$

I vincoli di diseuguaglianza G_i introducono le seguenti condizioni:

- i) Le dimensioni caratteristiche siano tali da soddisfare i limiti imposti sui veicoli attualmente disponibili sul mercato, in termini di rapporti lunghezza/larghezza ed altezza/larghezza;
- ii) L'area dei pannelli PV sia compatibile con le dimensioni del veicolo, secondo quanto scaturisce dal modello geometrico del veicolo.

L'analisi di ottimizzazione è stata sviluppata attraverso una procedura di minimizzazione del tempo di *pay-back* PB , calcolato con l'eq. (17). Il veicolo convenzionale preso a riferimento per valutare i risparmi giornalieri (i.e. eq. 10) ha le seguenti specifiche: $P_{ICE} = 75$ kW; $W_{body,CC} = 1250$ kg; $l = 4,2$ m; $w = 1,75$ m; $h = 1,5$ m.

La Tab. 18.6 riassume i risultati cui si è giunti applicando i criteri di ottimizzazione definiti attraverso le equazioni (21) e (22).

Il caso 1, rappresentativo di un ibrido HEV sprovvisto di pannelli PV ed utilizzato come termine di paragone per la valutazione economica degli HSV, presenta un tempo di *pay-back* di 6,1 anni e consente di risparmiare il 14% di combustibile rispetto ad un veicolo convenzionale.

Tab. 18.6 - Risultati dell'ottimizzazione per diversi valori del costo del combustibile e della tecnologia dei pannelli fotovoltaici

| # | C_f €/kg | C_{PV} €/m ² | η_p [l] | $A_{PV,H}$ [m ²] | P_{EG} [kW] | PB [anni] | Risparmio combustibile [%] |
|------------------|---------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|---------------|-----------|----------------------------|
| 1 | 1,77 | 800 | 0,13 | 0 | 35,5 | 6,1 | 14 |
| 2 | 1,77 | 800 | 0,13 | 3 | 35,5 | 9,9 | 20,4 |
| 2 _{bis} | 1,77 | 800 | 0,13 | 3 | 35,5 | 9,1 | 37,4 |
| 3 | 1,77 | 200 | 0,13 | 4 | 37 | 5,6 | 23,3 |
| 4 | 3,54 | 200 | 0,16 | 5,6 | 38,4 | 2,4 | 31,3 |

L'aggiunta dei pannelli fotovoltaici (e.g. caso 2, $A_{PV,H} = 3 \text{ m}^2$) permette di risparmiare un ulteriore 6,4 % nel consumo di combustibile, ma richiede un tempo di recupero maggiore (circa 10 anni), in virtù dei costi attuali di pannelli e carburante. Se si considerasse il ciclo di guida ECE (caso 2_{bis}), il risparmio di carburante arriverebbe al 37,4%, laddove il tempo di *pay-back* scenderebbe di poco, da 9,9 a 9,1 anni; ciò è dovuto al limitato effetto del costo del carburante nei cicli urbani, dove in genere il veicolo compie brevi tragitti.

La soluzione HSV può diventare ottimale quando si ipotizza l'occorrenza di una (caso 3) o tutte (caso 4) le circostanze seguenti: a) Riduzione del costo dei pannelli PV (di un fattore 4); b) Raddoppio del prezzo del carburante; c) Aumento di efficienza dei pannelli dal 13 al 16%. Le variazioni ipotizzate per il costo di carburante e pannelli sono significative ma non irrealistiche, soprattutto tenendo conto dei recenti trend di crescita e decrescita osservati, rispettivamente, per il costo dei pannelli ed il prezzo dei combustibili automobilistici.

18.3 Progettazione delle strategie di gestione energetica di un veicolo ibrido solare

I veicoli ibridi solari hanno ovviamente molte caratteristiche in comune con i più convenzionali veicoli ibridi elettrici (HEV), per il cui sviluppo sono state condotte numerose attività di ricerca negli ultimi anni [1–4, 17].

Tuttavia, l'aggiunta dei pannelli solari e l'adozione di una struttura propulsiva di tipo serie suggeriscono l'importanza di eseguire uno studio accurato dei flussi energetici a bordo del veicolo finalizzato alla determinazione delle strategie di controllo ottimali.

In realtà, in molti veicoli ibridi viene adottata una strategia di gestione energetica di tipo "*charge-sustaining*": in pratica viene garantito che alla fine di ogni ciclo di guida lo stato di carica delle batterie risulti invariato rispetto alla condizione di partenza.

Nel caso del veicolo ibrido solare, è auspicabile l'implementazione di una strategia che permette la ricarica del pacco batterie anche nelle fasi di sosta. In questo caso è quindi conveniente raggiungere l'obiettivo "*charge-sustaining*" lungo l'intero arco della giornata invece che alla fine di un singolo percorso compiuto dal veicolo [11].

La configurazione serie consente inoltre un utilizzo intermittente del motore a combustione interna, in particolare a punto fisso ed in condizioni di massima efficienza. In questo caso è quindi possibile privilegiare, nella fase di progettazione del motore endotermico, l'abbattimento delle emissioni e del rumore in corrispondenza del punto di massima efficienza.

Quest'ultima opportunità costituisce un indubbio vantaggio rispetto a quanto accade per le vetture tradizionali, dove la massima efficienza di conversione è

sacrificata a vantaggio del raggiungimento di prestazioni ed emissioni accettabili nell'intero dominio di funzionamento.

Gran parte delle tecniche sviluppate per il controllo degli ibridi convenzionali tende a considerare il motore come un sistema continuo che può funzionare nel suo intero dominio di funzionamento, sia esso posto all'interno di una configurazione parallela sia mista serie/parallela.

Tale approccio è stato adottato anche in alcuni studi recenti incentrati sull'applicazione di tecniche "*model-predictive*" e di programmazione dinamica al controllo dei veicoli HEV [18]. Nel caso di funzionamento intermittente è invece importante tener conto dell'effetto che i transistori termici del motore e del catalizzatore hanno su consumi ed emissioni [19].

Questi ultimi effetti sono trascurati nella maggior parte degli studi riguardanti i veicoli ibridi, dove si usa ricorrere all'ipotesi di stazionarietà per la stima dei consumi di carburante e delle emissioni.

I risultati presentati nei paragrafi precedenti si riferiscono ad una gestione dei flussi energetici basata sull'ipotesi che l'ICE venisse acceso una sola volta durante il ciclo di guida (i.e. nella fase finale), funzionando a punto fisso [11].

Con questo approccio è possibile approfondire alcuni aspetti controllistici, nell'ambito di un'analisi il cui obiettivo primario è quello di valutare gli effetti di soluzioni progettuali differenti sulle performance energetiche. Tale procedura è stata opportunamente integrata nel modello dinamico, tenendo in conto anche la variabilità di peso e costo dei componenti, per individuare la migliore soluzione progettuale per un veicolo HSV.

I paragrafi seguenti sono invece dedicati alla definizione delle strategie di gestione ottimale dell'ICE per un ciclo di guida arbitrario, con l'obiettivo finale di sviluppare un'architettura di controllo di livello superiore per veicoli HSV.

18.3.1 Effetti legati all'utilizzo intermittente del motore a combustione interna

L'utilizzo intermittente del motore a combustione interna induce degli effetti dinamici sia nel motore che nel catalizzatore, determinando quindi una variazione di consumi ed emissioni rispetto alle condizioni di regime termico. Tali effetti devono essere analizzati in dettaglio per definire strategie di controllo e gestione energetica che garantiscono anche un'adeguata gestione termica del veicolo HSV.

Nel seguito sono presi in particolare considerazione gli aspetti legati alla partenza a freddo dell'ICE e l'andamento delle emissioni di HC durante la fase di regimazione termica.

La gestione ottimale dell'ICE durante un ciclo di guida arbitrario può essere individuata risolvendo il seguente problema di ottimizzazione vincolata:

$$\min_X \int \dot{m}_{f,HSV}(X) dt \quad (23)$$

soggetto ai vincoli non lineari:

$$\Delta SOC_{day}(P_{EM}, P_{ICE}(X), P_{SUN}) = 0 \quad (24)$$

$$SOC > SOC_{min} \quad (25)$$

$$SOC < SOC_{max} \quad (26)$$

Tra le variabili decisionali X vi sono, per ogni fase di accensione (ICE-on) del motore a combustione interna, l'istante di avviamento, la durata del periodo di accensione e la potenza erogata. Il numero di accensioni è invece imposto al fine di valutarne l'influenza sulle performance complessive del veicolo HSV.

Il primo vincolo (i.e. Eq. 24) permette di ristabilire lo stato di carica iniziale alla fine del giorno, tenendo conto anche delle fasi di sosta del veicolo durante le quali i pannelli fotovoltaici continuano a ricaricare il pacco batterie.

Mentre i valori di P_{EM} e potenza solare sono noti, il primo grazie alla conoscenza del profilo di missione, il secondo in base al valore di potenza di irraggiamento medio annuo ipotizzato, il valore di P_{ICE} è funzione delle variabili decisionali.

È opportuno notare che la strategia di controllo descritta è basata sulla conoscenza a-priori del profilo di missione del veicolo, richiedendo quindi uno sviluppo ulteriore laddove ne sia richiesto l'utilizzo in tempo reale.

Quest'ultimo scopo potrà essere soddisfatto integrando la strategia di controllo con un modello di previsione del carico alle ruote, applicato recentemente per un veicolo HEV [4]. La metodologia presentata consente, comunque di raggiungere gli obiettivi di progettazione delle strategie di controllo, attraverso l'analisi degli effetti derivanti da un utilizzo intermittente dell'ICE sull'efficienza di conversione del combustibile.

I valori minimi e massimi dello stato di carica (i.e. SOC_{min} e SOC_{max}) possono essere assegnati garantendo un utilizzo ottimale in termini di tempo di vita del pacco batterie. Il valore massimo raggiunto dal SOC durante le fasi di guida è invece vincolato alla necessità di garantire il massimo sfruttamento dell'energia solare captabile dai pannelli nelle fasi di parcheggio.

È opportuno inoltre introdurre limitazioni ulteriori per evitare che ci siano sovrapposizioni fra due eventi ICE-on consecutivi e, inoltre, per garantire che la potenza richiesta all'ICE assuma valori ammissibili.

A titolo di esempio, nei paragrafi successivi saranno illustrati i risultati di simulazioni eseguite con riferimento ad un ciclo di guida composto da 4 moduli ECE-EUDC, come rappresentato in Fig. 18.10.

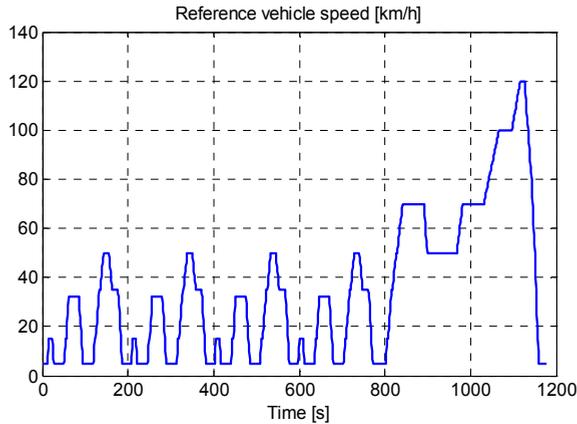


Fig. 18.10 - Modulo del ciclo di guida ECE-EUDC

18.3.2 Simulazione dei transistori termici

L'influenza esercitata dai transistori termici può essere simulata assumendo (i) una risposta dinamica del motore nell'erogazione della potenza richiesta e (ii) stimando il consumo specifico in funzione della temperatura del motore oltre che della potenza erogata.

Assumendo la temperatura del liquido refrigerante T quale riferimento per lo stato termico del motore, la dinamica termica è descritta secondo un processo del primo ordine attraverso la seguente relazione:

$$T(t) = T_{ss} + (T_{in} - T_{ss}) \cdot e^{-\frac{t}{K}} \quad (27)$$

I valori della temperatura "steady-state" T_{ss} e della costante di tempo K possono essere assegnati con riferimento alla seguente tabella, rilevata da rilievi sperimentali eseguiti al banco prova:

| Stato MCI | T_{ss} [°C] | K [s] |
|-----------|---------------|-------|
| ON | 82 | 150 |
| OFF | 27 | 600 |

Infine, la potenza ed il consumo specifico di combustibile (Eq. 28 e 29) sono calcolati introducendo un fattore correttivo rispetto al valore corrispondente alle condizioni a regime, dipendente dal rapporto tra la temperatura attuale e quella in condizioni di regime termico:

$$P(t) = P_{ss} \cdot f\left(\frac{T}{T_{ss}}\right) \quad (28)$$

$$SFC(t) = SFC_{ss}(P) / f\left(\frac{T}{T_{ss}}\right) \quad (29)$$

18.3.3 Stima delle emissioni di HC

In presenza di frequenti manovre di accensione/spengimento del motore, tipiche nel caso del veicolo oggetto dello studio, le emissioni di idrocarburi incombusti (HC) risultano particolarmente critiche. In tal senso, nell'ambito dell'ottimizzazione energetica delle strategie di controllo, è opportuno valutare anche l'impatto ambientale relativo alle emissioni di HC nel corso dei transitori termici del motore.

Tale aspetto può essere analizzato attraverso un modello semplificato per la stima delle emissioni di HC durante i transitori termici, sulla base di misure sperimentali rilevate al banco prova nel corso di manovre di avviamento a freddo.

I rilievi sperimentali, illustrati in Fig. 18.11, evidenziano una drastica riduzione delle emissioni di HC allo scarico nel corso dei primi 20 secondi dall'avviamento, a partire da livelli di concentrazione molto elevati, imputabili all'arricchimento della miscela ed ad eventuali fenomeni di mancata accensione nei primi istanti di funzionamento. Nel corso del transitorio le emissioni di HC si riducono significativamente, prevalentemente per effetto della dinamica termica del catalizzatore, convergendo verso concentrazioni trascurabili dopo circa 6 minuti dall'avviamento.

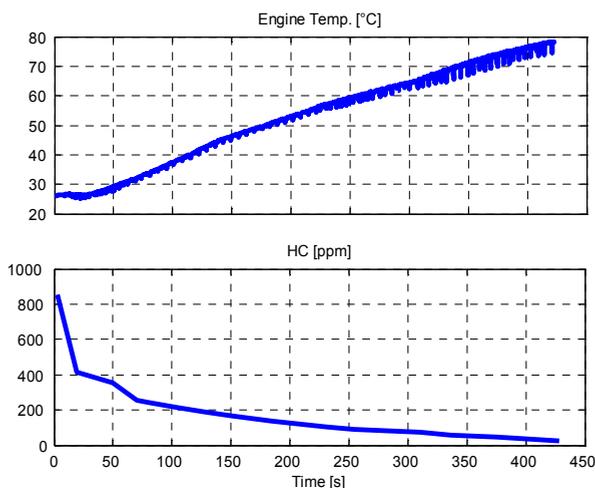


Fig. 18.11 - Misure della temperatura del liquido refrigerante e delle emissioni allo scarico di HC nel corso di una manovra di avviamento a freddo al banco prova

In tal senso, sulla base di evidenze sperimentali [20, 21], nei primi 20 secondi dall'avvia-mento le emissioni di HC sono modellate secondo un processo dinamico del primo ordine attraverso la seguente relazione:

$$HC(t) = HC_{ss} + (HC_{in} - HC_{ss})e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (30)$$

Il valore iniziale HC_{in} è assegnato modificando il valore rilevato sperimentalmente nel corso di una manovra di avviamento a freddo, attraverso un fattore correttivo in funzione della temperatura del motore:

$$HC_{in} = HC_{in_cold} \cdot f\left(\frac{T_{in}}{T_{in_cold}}\right) \quad (31)$$

Tale relazione consente di estendere la stima delle emissioni di HC anche in presenza di manovre di avviamento a caldo. Il fattore correttivo può essere definito in termini di efficienza del processo di mescolamento aria-combustibile, come rapporto tra rapporto di miscela teorico ed effettivo [19]. In tal senso esso rappresenta un indice del fenomeno del film fluido sintetizzando gli effetti dell'arricchimento della miscela sulle emissioni di HC. Evidentemente, assumendo costanti i valori di regime, carico ed anticipo accensione, il fattore correttivo dipende dallo stato termico del motore [20, 22].

Il valore *steady-state* delle emissioni HC_{ss} è stimato in funzione dello stato termico del motore attraverso una mappa identificata rispetto ai dati sperimentali, in assenza, pertanto, di una esplicita dipendenza dallo stato termico del catalizzatore e dalla temperatura e composizione dei gas di scarico.

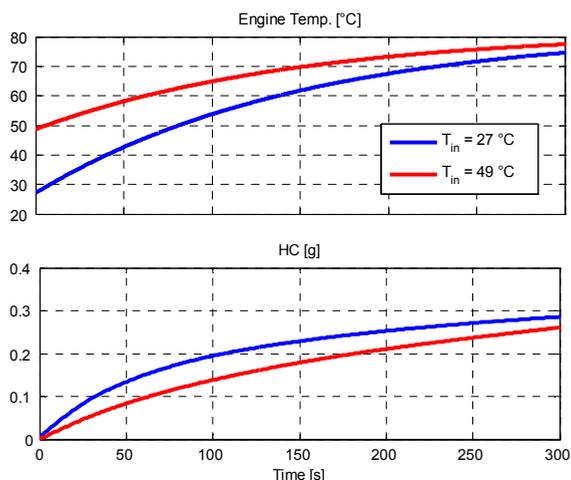


Fig. 18.12 - Simulazione dei profili di temperatura del liquido refrigerante e delle emissioni allo scarico di HC con riferimento a manovre di avviamento a freddo (27 °C) ed a caldo (49 °C)

In realtà, ipotizzando che la misura dei dati sperimentali sia stata eseguita imponendo condizioni stazionarie di carico, regime, rapporto di miscela ed anticipo di accensione nel corso dell'intera manovra di avviamento, lo stato termico del motore rappresenta l'unica forzante della manovra di transitorio da cui dipendono intrinsecamente i processi dinamici di interesse (stato termico del catalizzatore e dei gas di scarico, film fluido e rapporto di miscela).

In Fig. 18.12 sono illustrati i risultati di due simulazioni relative a manovre di avviamento a freddo ed a caldo. Le figure evidenziano che le emissioni allo scarico di HC differiscono significativamente nei due casi in virtù del diverso profilo del transitorio termico del motore.

18.3.4 Strategie di controllo per la gestione energetica del veicolo ibrido solare

A titolo di esempio, si illustrano i risultati di simulazioni eseguite risolvendo un problema di ottimizzazione vincolata, secondo quanto descritto attraverso le Eq. (23-26), per la configurazione HSV di Tab. 18.5. È opportuno evidenziare che tale configurazione è quella che massimizza l'efficienza energetica complessiva, in accordo con i risultati presentati dagli autori in un contributo precedente [11]. L'utilizzo intermittente del motore a combustione interna (ICE) è analizzato per un certo numero di scenari, ottenuti variando il numero di fasi ICE-on nell'intervallo 1-8. Tale analisi consente quindi di valutare a pieno gli effetti derivanti da frequenti accensioni/spegnimenti del motore a combustione interna su consumi ed emissioni.

In Fig. 18.13 è raffigurato l'andamento dei valori complessivi di consumo ed emissioni di HC all'aumentare del numero N di accensioni del motore. Si nota in particolare come i consumi di combustibile siano caratterizzati da un trend iniziale di decrescita, fino ad un minimo che si raggiunge per $N = 3$. Ciò può essere spiegato considerando che un numero maggiore di accensioni consente di aumentare la potenza erogata dal motore fino ad un valore molto prossimo alla zona di massima efficienza (i.e. 22 kW, che corrisponde a circa la metà del valore di potenza nominale indicato in Tab. 18.5). Successivamente, gli effetti negativi indotti dai transitori termici sull'efficienza del motore, tenuti in conto attraverso le Eq. (28) e (29), portano ad eliminare i benefici connessi con un numero più elevato di accensioni, risultando quindi in un progressivo aumento dei consumi.

Riguardo le emissioni di HC, in Fig. 18.13 si nota un trend di crescita all'aumentare del numero di accensioni. Ciò accade in conseguenza del notevole rilascio di HC durante la fase di avviamento a freddo, durante la quale il motore è alimentato con miscela ricca per accelerare il raggiungimento del regime termico.

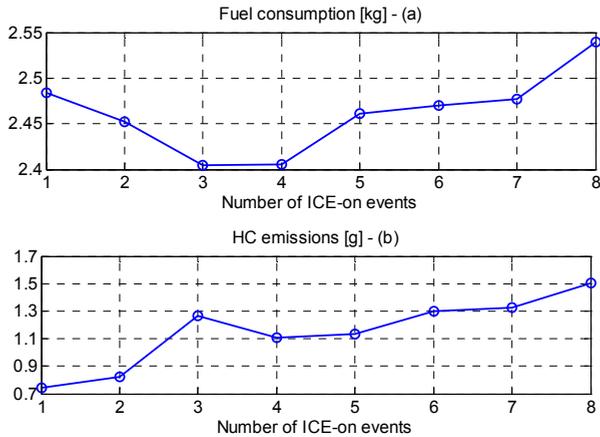


Fig. 18.13 - Influenza del numero di fasi ICE-on (N) sui consumi di combustibile (a) e sulle emissioni di idrocarburi incombusti (b)

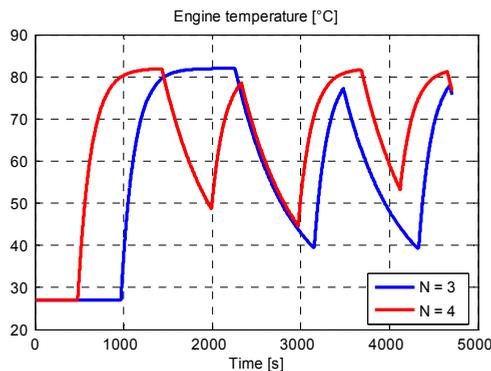


Fig. 18.14 - Traiettorie di temperatura simulate nei casi N=3 e N=4

Tuttavia, il trend di crescita tende ad essere meno marcato a causa del progressivo aumento della temperatura media del motore (Fig. 18.14) che si ottiene all'aumentare del numero di accensioni.

In particolare, la Fig. 18.14 mostra che con N=3 la seconda e la terza accensione vengono effettuate a temperature abbastanza basse, dell'ordine dei 40 °C, laddove con N=4 il motore viene sempre messo in funzione a valori di temperatura più elevati. Si noti inoltre che l'ultima accensione nel caso N=4 viene effettuata intorno ai 55 °C, causando quindi un modesto contributo alla produzione complessiva di HC nell'intero ciclo di guida. Da ciò ne consegue che le fasi in cui il motore è alimentato a miscela molto ricca durano complessivamente meno rispetto al caso N=3, fornendo così una spiegazione fisica accettabile al minimo locale di emissioni di HC che si ottiene in corrispondenza di N=4.

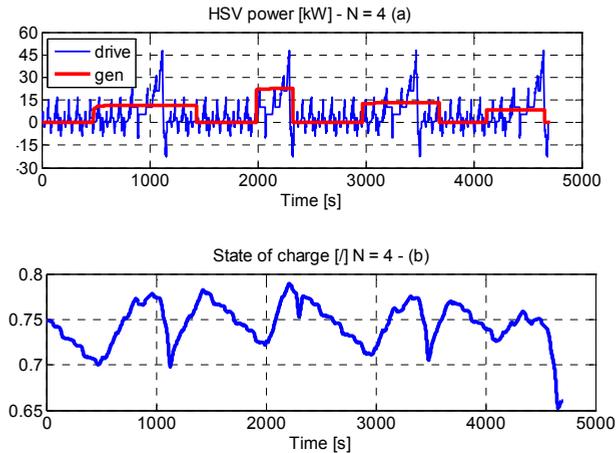


Fig. 18.15 - Traiettorie di potenza (a) e stato di carica delle batterie (b) simulate per N=4 fasi ICE-on per il profilo di missione di riferimento

Le osservazioni precedenti su consumi ed emissioni di HC portano a concludere che 4 accensioni del motore costituiscono la strategia di gestione più conveniente per il ciclo arbitrario considerato in questa analisi.

Le successive Fig. 18.15.a e 18.15.b mostrano i risultati della simulazione eseguita per il caso N=4. In particolare, la Fig. 18.15.a illustra la traiettoria temporale della potenza erogata dal generatore (curva in rosso) per soddisfare la richiesta di potenza per la trazione, mentre i profili di potenza di batterie e pannelli solari sono omessi per facilitare la comprensione del grafico. È interessante notare che nel caso N=4 l'analisi di ottimizzazione vincolata ha individuato nelle fasi di massima richiesta di potenza alle ruote gli intervalli temporali in cui è più conveniente mettere in funzione il gruppo generatore.

Questo risultato trova adeguata giustificazione nel fatto che in tal modo si evita di far funzionare il motore in condizioni di basso carico, in corrispondenza delle quali si ha, come è noto, un maggior consumo specifico.

In Fig. 15.b è invece riportato l'andamento dello stato di carica delle batterie, da cui emerge che il valore finale differisce da quello iniziale esattamente della quota corrispondente all'energia che i pannelli solari possono captare nelle fasi di parcheggio (9 ore rispetto ad una singola ora di guida).

18.4 Il prototipo di veicolo ibrido solare

Un prototipo di veicolo ibrido solare con struttura serie è in fase di sviluppo presso l'Università di Salerno. L'attività di sviluppo è partita da un veicolo elettrico Piaggio Porter (Fig. 18.16).

I principali dati tecnici sono riassunti in Tab. 18.7.

Tab. 18.7 - Dati tecnici del prototipo di veicolo ibrido solare in fase di sviluppo presso l'Università di Salerno

| | |
|------------------------------|---|
| <i>Veicolo</i> | <i>Piaggio Porter</i> |
| Lunghezza | 3.370 m |
| Larghezza | 1.395 m |
| Altezza | 1.870 m |
| Peso | 1750 kg |
| <i>Motore elettrico</i> | <i>BRUSA MV 200 - 84 V</i> |
| Potenza in continuo | 9 kW |
| Potenza massima | 15 kW |
| <i>Batterie</i> | <i>16 Modules Pb-Gel 12 V</i> |
| Massa | 500 kg |
| Capacità | 130 Ah |
| <i>Pannelli fotovoltaici</i> | <i>Silicio Policristallino</i> |
| Superficie | 1.44 m ² |
| Peso | 60 kg |
| Efficienza | 0.13 |
| <i>Generatore elettrico</i> | <i>PRAMAC S600 (400 cc Diesel, generatore sincrono trifase)</i> |
| Potenza massima | 6 kVA |
| Consumo specifico | 300 g/kWh |
| Peso a secco | 112 kg |



Fig. 18.16 - Il prototipo di veicolo ibrido solare

Il prototipo è stato equipaggiato con una serie di sensori che comunicano con una centralina di controllo programmabile NI cRIO®, al fine di condurre campagne sperimentali finalizzate ad eseguire le seguenti attività: *i*) identificazione dei principali sottomodelli matematici (e.g. gruppo generatore, motore elettrico ecc.) da implementare nel modello dinamico complessivo; *ii*) acquisizione dati e monitoraggio; *iii*) attuazione delle strategie di controllo oggetto delle analisi presentate nelle sezioni precedenti.

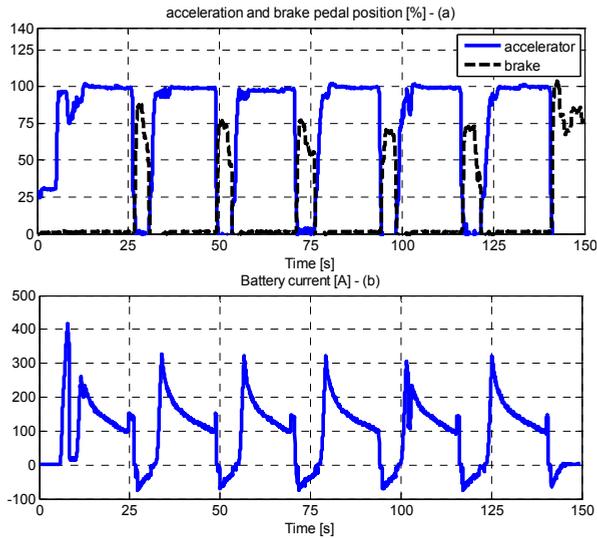


Fig. 18.17 - Andamenti temporali delle posizione dei pedali acceleratore/freno (a) e della corrente in ingresso al motore elettrico (i valori negativi contraddistinguono le fasi di frenata rigenerativa)

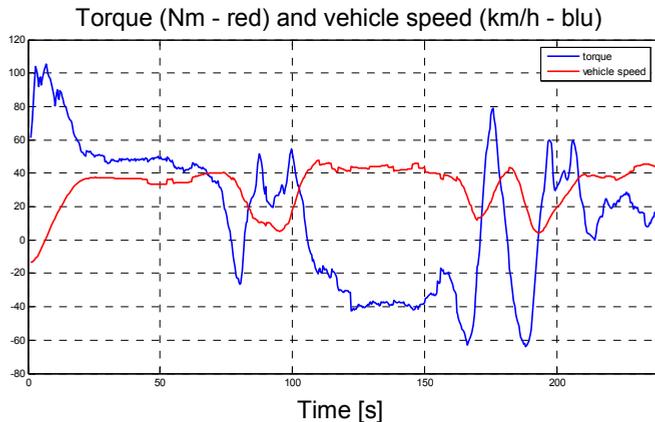


Fig. 18.18 - Andamenti temporali della coppia del motore elettrico e della velocità del veicolo

Nelle Figg. 18.17 e 18.18 sono riportati i risultati di alcuni test sperimentali preliminari, che si sono concentrati sulla misura della corrente del motore elettrico, della coppia sull'asse di trasmissione e del regime di rotazione dello stesso asse.

Bibliografia

- [1] Powell B.K., Bailey K.E., Cikanek S.R., Dynamic modeling and Control of Hybrid Vehicle Power train Systems. IEEE Transactions on Control Systems, vol. 18, no. 5, 1998.
- [2] Baumann B., Rizzoni G. and Washington G. Intelligent Control of Hybrid Vehicles using Neural Networks and Fuzzy Logic. SAE paper 981061, 1998.
- [3] Guzzella L. and Amstutz A., CAE Tools for Quasi-Static Modeling and Optimization of Hybrid Powertrains. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, no. 6, November 1999.
- [4] Arsie I., Graziosi M., Pianese C., Rizzo G., Sorrentino M., Optimization of Supervisory Control Strategy for Parallel Hybrid Vehicle with Provisional Load Estimate. JSAE Review of Automotive Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 341-348, 2005.
- [5] Saitoh T., Hisada T., Gomi C., Maeda C., Improvement of urban air pollution via solar-assisted super energy efficient vehicle. ASME JSES KSES Int. Sol. Energy Conf., pp. 571-577, 1992.
- [6] Sasaki K., Yokota M., Nagayoshi H., Kamisako K., Evaluation of an Electric Motor and Gasoline Engine Hybrid Car Using Solar Cells. Solar Energy Material and Solar Cells (47), 1997.
- [7] Seal M.R., Viking 23 - zero emissions in the city, range and performance on the freeway. Northcon - Conf.Record, IEEE, RC-108, pp. 264-268, 1995.
- [8] Seal M.R., Campbell G., Ground-up hybrid vehicle program at the vehicle research institute. SAE Special Publications, vol. SP-1105, pp. 59-65, 1995.
- [9] S. Letendre, R. Perez, C. Herig, Vehicle Integrated PV: a Clean and Secure Fuel for Hybrid Electric Vehicles. Annual Meeting of the American Solar Energy Society, Austin, TX, June 21-26, 2003.
- [10] Statistics for Road Transport, UK Government, www.statistics.gov.uk/CCI/nscl.asp?ID=8100.
- [11] Arsie I., Rizzo G., Sorrentino M., Optimal Design and Dynamic Simulation of a Hybrid Solar Vehicle. SAE paper 2006-01-2997, SAE 2006 Transactions - Journal of Engines, vol. 115-3, 2007.
- [12] www.itee.uq.edu.au/~serl/UltraCommuter.html.
- [13] Leonardo Program I05/B/P/PP-154181 "Energy Conversion Systems and Their Environmental Impact", www.dimec.unisa.it/leonardo.
- [14] Marion B. and Anderberg M., PVWATTS - An online performance calculator for Grid-Connected PV Systems. Proc.of the ASES Solar 2000 Conf., June 16-21, 2000, Madison, WI.

- [15] Arsie I., Flora R., Pianese C., Rizzo G., Serra G., A Computer Code for S.I. Engine Control and Power train Simulation. SAE Paper 2000-01-0938, SAE 2000 Transactions - Journal of Engines, Vol. 109-3, pp. 935-949, 2001.
- [16] Burch, S., Cuddy, M., Johnson, V., Markel, T., Rausen, D., Sprik, S., and Wipke, K., ADVISOR: Advanced Vehicle Simulator, www.avl.com/advisor.
- [17] Bin Wu, Chan-Chiao Lin, Zoran Filipi, Huei Peng, Dennis Assanis, Optimal Power Management of a Hydraulic Hybrid Delivery Truck. Vehicle System Dynamics 2004, Vol. 42, Nos. 1-2, pp. 23-40, 2004.
- [18] Preitl, Zs., P. Bauer, B. Kulcsar, G. Rizzo, J. Bokor, Control Solutions for Hybrid Solar Vehicle Fuel Consumption Minimization. 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 13-15, 2007, Istanbul.
- [19] Arsie I., Di Martino R., Rizzo G., Sorrentino M., Energy Management for a Hybrid Solar Vehicle with Series Structure. 17th IFAC World Congress, Seoul (South Korea), July 6-11, 2008.
- [20] Cheng W.K. and Santoso H., Mixture Preparation and Hydrocarbon Emissions Behaviors in the First Cycle of SI Engine Cranking. SAE paper 2002-01-2805.
- [21] Zavala J.C., Sanketi P.R., Wilcutts M., Kaga T., Hedrick J.K., Simplified Models of Engine HC Emissions, Exhaust Temperature and Catalyst Temperature for Automotive Coldstart. 5th IFAC Symp.on Advances in Automotive Control, Aptos (USA), August 20-22, 2007.
- [22] Arsie I., Pianese C., Rizzo G., Models for the Prediction of Performance and Emissions in a Spark Ignition Engine - A Sequentially Structured Approach. SAE Paper 980779, SAE 1998 Transactions - Journal of Engines, Section 3, Vol. 106, pp. 1065-1079.

CAPITOLO 19

I VEICOLI IBRIDI PER IL TRASPORTO PUBBLICO URBANO

Antonino Genovese

ENEA, Tecnologie per l'Energia, Fonti Rinnovabili e Risparmio Energetico

Le tematiche ambientali hanno assunto negli ultimi decenni un ruolo sempre più importante nelle politiche di governo del territorio ed in virtù di tale rilevanza hanno acquisito valore nelle azioni programmatiche degli enti locali. In particolar modo, l'esigenza di tutelare la salute dei cittadini si è resa manifesta all'interno delle aree cittadine, prima negli ambiti prettamente metropolitani delle grandi conurbazioni e successivamente estendendosi alle medie e piccole realtà della provincia italiana.

Alla luce degli innumerevoli studi epidemiologici, che hanno mostrato una diretta correlazione tra la concentrazione in atmosfera di sostanze nocive per la salute umana (monossido di carbonio, ossidi di azoto, particelle carboniose, idrocarburi aromatici...) e l'insorgenza di patologie respiratorie e neoplasiche, gli amministratori locali sono coinvolti pienamente nelle azioni di mitigazione degli impatti che le emissioni gassose in aria causano sulla salute umana.

Per operare scelte coerenti con gli obiettivi che si intende raggiungere occorre conoscere i) la distribuzione delle sorgenti di inquinanti ii) il contributo che ogni sorgente fornisce all'inquinamento dell'area iii) l'insieme su cui stimare gli effetti da essi prodotti. Infatti quando si determinano le conseguenze delle emissioni è necessario precisare la scala su cui gli impatti devono essere valutati.

La definizione della scala è suscettibile di introdurre differenti indici di valutazione degli impatti producendosi effetti sull'ecosistema di diversa portata. Ad esempio le emissioni di anidride carbonica a livello urbano non appaiono assumere un immediato e diretto effetto sulla salute umana e potrebbero essere classificate ad un livello di importanza relativamente basso. Viceversa se si considera l'aspetto globale delle ricadute derivanti dall'accumulo di CO₂ in atmosfera, il livello di importanza cresce in modo rilevante. Alla luce di queste diverse interpretazioni nella stima degli impatti, le soluzioni attuabili per la riduzione delle emissioni assumono diverso valore e di conseguenza le scelte operabili dagli amministratori sono da apprezzare in relazione alla scala di azione su cui intendono avere effetto.

Le fonti di inquinanti gassosi, in ambito urbano, sono molteplici ma il "sistema trasporto" assume un ruolo determinante come sorgente essendo ad esso imputabile il 29% delle emissioni globali di CO₂ ed il 62% di quelle di NO_x [1], come mostrato nelle Figg. 19.1 e 19.2.

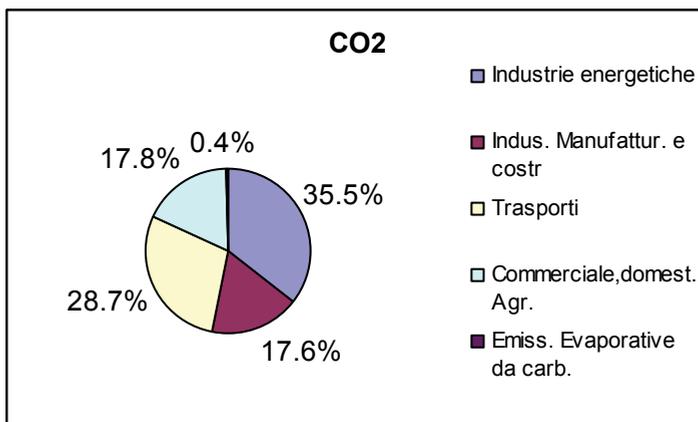


Fig. 19.1 - Ripartizione delle emissioni di anidride carbonica in atmosfera per settore di provenienza

Fonte: ENEA 2003 [1]

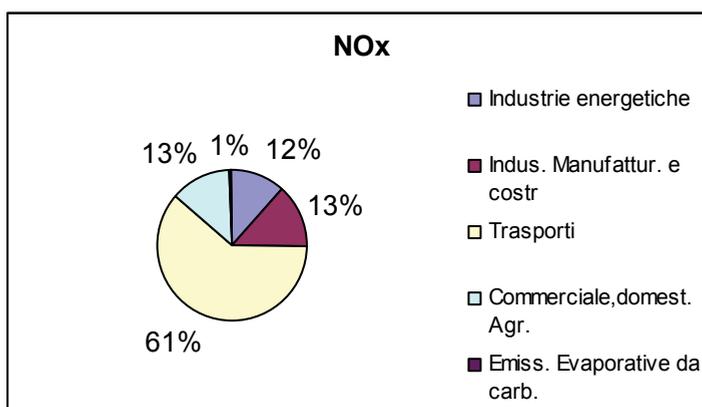


Fig. 19.2 - Ripartizione delle emissioni di ossidi di azoto in atmosfera per settore di provenienza

Fonte: ENEA 2003 [1]

Le quote di emissioni da trasporto assumono quindi una consistenza tale che consigliano ad intervenire per una loro limitazione per ridurre le emissioni globali.

Diverse sono le azioni attivabili per la mitigazione delle conseguenze generate dal trasporto in seno alle aree urbane: restrizione del traffico privato, introduzione della telematica per la gestione del sistema viario e del controllo del traffico, potenziamento della rete di trasporto collettivo, incentivazione delle politiche di *shift* modale verso il trasporto collettivo o condiviso (car-sharing, carpooling, taxi collettivo ecc.), attuazione di politiche tariffarie volte a disincentivare l'utilizzo del mezzo privato a favore del trasporto pubblico.

Tutte queste azioni sono dirette a ridurre la congestione stradale limitando il numero di veicoli circolanti o migliorando lo stato della circolazione stradale.

Tra le varie iniziative attuate dalle Amministrazioni, una di esse è legata specificatamente all'*introduzione di tecnologie veicolari* in grado di operare una diminuzione delle emissioni in ambito urbano sia in modo diretto, tramite la riduzione delle emissioni specifiche a parità di dimensioni veicolari e di capacità di trasporto, che indiretto, essendo in grado di attrarre quote di traffico privato e quindi di eliminare sorgenti di emissioni.

Questa linea di azione è stata percorsa inizialmente per le necessità inerenti la riduzione delle emissioni in ambito urbano, ma in seguito l'orizzonte di intervento è stato allargato alle ricadute su scala nazionale per gli effetti che le nuove tecnologie possono avere sulla riduzione delle emissioni dei gas promotori dell'effetto serra.

In tale quadro di determinazione degli impatti non va trascurata la valutazione delle emissioni lungo tutta la filiera di produzione ed utilizzo del combustibile o del vettore energetico utilizzato per la trazione veicolare. Questo tipo di analisi (definita dal pozzo alle ruote - *well to wheel*) ci consente di stimare in modo completo l'effetto delle tecnologie veicolari sia a livello locale che su scala globale.

19.1 Dal veicolo elettrico.....

Tra le tecnologie veicolari per il trasporto pubblico, diverse sono quelle che si presentano con l'etichetta di "basso impatto ambientale": veicoli a metano, a GPL, elettrici ed ibridi, diesel di ultima generazione con filtri e convertitori catalitici, con motori alimentati da combustibili alternativi ecc.

In questo insieme, negli ultimi anni, i veicoli elettrici sono quelli che hanno attratto molte Amministrazioni locali per le indubbie doti di veicoli a "emissioni zero". In tale veste i veicoli elettrici appaiono come l'unica soluzione per la riduzione drastica delle emissioni in città, anche se questa caratteristica è suscettibile di diversa interpretazione se si attua una valutazione su base più ampia, implicante una scala valutativa globale ed una analisi completa dal pozzo alle ruote.

Il veicolo elettrico si caratterizza essenzialmente per l'assenza totale delle emissioni gassose al punto d'uso e questo lo rende attraente per gli utilizzi all'interno dei centri storici contraddistinti da una presenza di manufatti di alta valenza storica ed artistica. All'assenza di emissioni gassose si associa una generale, forte riduzione delle emissioni di rumore in grado di soddisfare le particolari esigenze della circolazione in ambienti dalle strade molto strette ove i rumori si riflettono amplificandone l'effetto.

In Italia le prime sperimentazioni con i veicoli elettrici per il trasporto urbano hanno ormai superato il ventesimo compleanno ma i veicoli elettrici continuano a conquistare consensi per quelle quote di mercato in cui riescono a svi-

luppate al meglio le proprie caratteristiche. Tra le prime esperienze di una certa consistenza, merita da essere menzionata l'introduzione, nella città di Roma, di una flotta di bus urbani di piccola taglia "Pollicino" prodotti da CAM (Carrozzeria Autodromo Modena) su telaio IVECO (Fig. 19.3).

L'ATAC, l'azienda di trasporto pubblico di Roma, possedeva alla fine del 1986 una piccola flotta di 8 veicoli elettrici, equipaggiati con batterie al piombo ed al nichel-ferro, operanti sulla linea 119 in pieno centro storico [2]. L'acquisto di questa prima flotta e la sua utilizzazione furono effettuate nell'ambito di progetti finanziati dalla Comunità Europea aventi lo scopo di valutare le implicazioni energetiche, economiche, gestionali ed ambientali nell'esercizio di un siffatto tipo di flotta.

Questi minibus possono annoverarsi tra i precursori di diverse flotte di mezzi elettrici che in Italia sono andate crescendo nel tempo sia come consistenza numerica sia per prestazioni. Il "Pollicino" era un veicolo corto e poteva trasportare 16 passeggeri con una velocità massima di 60 km/h e pesava a pieno carico 5 tonnellate. La sua autonomia dichiarata era di 60 km in ambiente urbano a fronte di una percorrenza giornaliera realmente effettuata compresa tra 40 e 50 km. Il veicolo veniva gestito con la tecnica del 'biberonage', ossia con delle ricariche parziali delle batterie durante le soste al capolinea al fine di aumentare la disponibilità di energia in batteria. In tal modo si cercava di contrastare la caduta delle prestazioni al seguito della scarica degli accumulatori.

Questo della perdita di prestazioni in relazione alla riduzione dello stato di carica degli accumulatori è uno dei problemi che maggiormente hanno afflitto le applicazioni basate sulla tecnologia di accumulo al piombo. I guasti dei veicoli hanno interessato diversi sistemi del veicolo: batterie, DC/DC, convertitore per ausiliari, anche se la loro frequenza non è stata tale da indurre ad un ripensamento sulle strategie globali del progetto.



Fig. 19.3 - Il bus elettrico Pollicino (collezione storica ATC Bologna)

Il successo di tale sperimentazione si riscontra anche nel numero di passeggeri trasportati che in tre anni ha toccato la cifra di 700.000 unità.

Questa prima esperienza (peraltro seguita dall'ENEA, che ha monitorato la flotta con appositi dispositivi di raccolta dati nel 1989-90) dimostrava che la via della propulsione elettrica per il trasporto pubblico era fattibile ma ne evidenziava i suoi limiti.

A questa prima sperimentazione, a livello di flotta, di veicoli elettrici per il trasporto pubblico, ne sono seguite diverse altre che hanno interessato varie città italiane.

Tra alcune di esse si può segnalare la flotta di minibus elettrici in Firenze che, a partire dal 1996, opera per il trasporto pubblico in alcune zone del centro storico.

Nell'ambito del progetto comunitario JUPITER quell'anno furono acquisiti 10 veicoli elettrici appartenenti alla categoria dei minibus [3]. Il veicolo in questione era un 'Gulliver' prodotto da Tecnobus, azienda italiana che ha assunto una forte posizione nel mercato dei veicoli elettrici per il trasporto pubblico (Fig. 19.4).

Il 'Gulliver' era un veicolo corto capace di trasportare 25 persone, equipaggiato con batterie al piombo ma che presentava una interessante ed innovativa soluzione per sopperire alla limitazione di autonomia, caratteristica dei veicoli elettrici. Infatti la ridotta autonomia tipica di tali mezzi si scontra con le necessità operative del servizio pubblico che deve garantire la continuità di trasporto per percorrenze superiori ai 60 km. Per aumentare i tempi di servizio su strada il veicolo era in grado di operare una rapida sostituzione del pacco accumulatori, scambiando quello scarico con uno già carico.



Fig. 19.4 - Sostituzione delle batterie in un veicolo Gulliver, realizzato da Tecnobus

La disponibilità di più pacchi batterie caricate non solo durante la notte ma nell'arco delle 24 h era in grado di mantenere un alto tasso di utilizzo dei veicoli. Peraltro, le operazioni di sostituzione richiedevano il rientro del mezzo in un'area attrezzata ove con un carrello elevatore, si provvedeva alla sostituzione delle batterie. Il successo del 'Gulliver' in seno al progetto JUPITER, per le applicazioni di trasporto pubblico a zero emissioni, è stato di grande portata e ha consentito alla tecnologia italiana di approdare nei mercati europei.

Esempio ne è l'applicazioni nella città di Merseyside (Liverpool) che in JUPITER2, un ulteriore progetto europeo nato come proseguimento ideale di JUPITER, ha acquistato 6 veicoli per il servizio di collegamento navetta tra le aree di parcheggio ed il centro urbano [4]. Altri veicoli sono stati acquisiti da diverse società in Portogallo per le applicazioni di trasporto urbano nei centri storici [5].

Il buon risultato del veicolo elettrico nel trasporto pubblico è stato garantito anche da altri produttori che sono stati in grado di porre a disposizione degli operatori diversi modelli con caratteristiche ideali per le esigenze del trasporto urbano nei centri storici. Ad esempio EPT (EcoPowerTechnologies) con l'Elfo propone un'ulteriore soluzione di veicolo elettrico di piccole dimensioni per il trasporto pubblico, caratterizzata dall'impiego di un caricabatteria di tipo induttivo installato ai capolinea.

Infine lo Zeus, di BredaMenariniBus, illustra le possibilità offerte dalle batterie di ultima generazione, riassunte nella tabella di confronto con la precedente versione dello stesso veicolo (Tab. 19.1).



Fig. 19.5 - Autobus elettrico Zeus, realizzato da BredaMenariniBus

Tab. 19.1 - Caratteristiche principali delle due versioni dello Zeus

| Miglioramenti | Precedente | Nuovo |
|-----------------------|------------------------|---|
| Motore più efficiente | CC raffreddato ad aria | AC, asincrono raffreddato a liquido |
| Batterie innovative | Piombo acido, 1500 kg | Batterie litio polimeri con BMS, 500 kg |
| Riduzione di peso | 5000 kg | 4060 kg |
| Autonomia più elevata | 70 km | 130 km |
| Velocità massima | 32 km/h | 43 km/h |

Le esperienze maturate con i veicoli elettrici hanno evidenziato i limiti posseduti dalla motorizzazione elettrica per i veicoli da trasporto urbano:

- piccole dimensioni del veicolo per contenere il peso e le dimensioni degli accumulatori a bordo;
- ridotta autonomia a causa del limite energetico in accumulo;
- decadimento delle prestazioni veicolari al decrescere dello stato di carica degli accumulatori;
- difficoltà di gestione dovute ai protratti tempi di ricarica.

Sebbene taluni di questi inconvenienti siano superabili, come di è detto, mediante l'utilizzo di batterie di nuova generazione che promettono di migliorare sostanzialmente le caratteristiche in accumulo (minore peso a parità di energia accumulata e maggiore potenza specifica), con tempi di ricarica ridotti e possibilità di impianti di ricarica "contactless" ossia del tipo induttivo per facilitare le operazioni di ripristino della carica, una alternativa al veicolo elettrico puro si presenta nelle vesti del mezzo ibrido.

19.2 al veicolo ibrido

Come ampiamente trattato nei capitoli precedenti, il mezzo ibrido coniuga le prestazioni del veicolo elettrico con quelle del veicolo convenzionale cercando di trarre il meglio da entrambe le configurazioni per caratteristiche energetiche ed ambientali.

Sono stati quindi sviluppati in Italia, dall'inizio degli anni 90, diversi prototipi di veicoli ibridi per il trasporto pubblico in cui lo schema di principio si presentava come quello serie. La città di Genova è stata tra le prime città che hanno sperimentato l'introduzione di veicoli ibridi per il trasporto urbano già nella prima metà degli anni 90, ma le maggiori esperienze a livello di flotte di veicoli ibridi per il trasporto collettivo sono state attuate a cavallo degli anni 1996-2000 ed hanno interessato diverse città del centro-nord Italia.

La diffusione del veicolo ibrido ha trovato in due progetti l'ambiente ottimale per poter operare una sperimentazione massiva dei veicoli ibridi indirizzati al trasporto pubblico: un accordo con il Ministero dell'Industria e (poi delle Attività Produttive) ed un progetto comunitario (progetto FLEETS).

Nel quadro di queste due azioni di supporto per la diffusione dei veicoli a basso impatto ambientale, sono stati provati in campo un numero consistente di bus ibridi: 8 veicoli in Ferrara, 4 a Terni e 12 a Roma. Gli autobus ibridi oggetto di questa sperimentazione sono stati gli Altrobus IVECO 490 realizzati dalla ALTRA, una società consociata dell'Iveco (gruppo Fiat) specializzata nella realizzazione di veicoli a basso impatto ambientale (caratteristiche tecniche in Tab. 19.2). Il bus, di grande taglia (12 m x 2 m x 3 m), è in grado di trasportare 86 passeggeri ad una velocità massima di 62 km/h (Fig. 19.6).

L'autonomia del mezzo, con il pieno di carburante, è dichiarata in oltre 200 km riducendosi a soli 25 km in trazione solo elettrica.



Fig. 19.6 - Altrobus, il primo bus ibrido da 12 m realizzato da ALTRA (gruppo IVECO)

Tab. 19.2 - Caratteristiche principali dell'Altrobus IVECO 490 ibrido

| | |
|--|---|
| Potenza nominale motore elettrico | 128 kW @ 1500 giri/min |
| Potenza generatore elettrico (brushless) | 30 kW @ 2600 giri/min |
| Tensione nominale | 600 V |
| Motore termico | 2500 cc - 4 cilindri a gasolio Euro 2 |
| Accumulatori | PbSO ₄ - 5 moduli da 60 elementi da 100 Ah |

La regolazione dei flussi di potenza tra i vari sottosistemi è affidata ad un'apposita unità di controllo che opera da interfaccia con le richieste da parte dell'autista e adegua le varie uscite in relazione alle condizioni di carico presenti.

Nelle tre città oggetto della sperimentazione i veicoli sono stati gestiti adottando la medesima strategia di controllo, basata sulla tecnica dello spegnimento del motore termico durante l'attraversamento di punti sensibili posti lungo il percorso del veicolo (controllo ON-OFF). Lo scopo di tale metodo non era volto al miglioramento delle prestazioni energetiche del mezzo ma solo ad un maggior riguardo ambientale nei punti sensibili (generalmente il centro storico) attraversati dal veicolo ibrido. Questo tipo di gestione richiedeva il controllo da parte dell'operatore per l'accensione e lo spegnimento del motore termico e consentiva di operare con il motore termico a punto fisso (erano consentite piccole regolazioni del numero di giri del motore). In tale contesto si puntava a:

- ridurre le emissioni di inquinanti;
- ridurre la rumorosità di esercizio;
- poter operare per brevi tratte in elettrico puro;
- avere un ottimo comfort di marcia;
- superare i limiti di autonomia imposti dalle batterie.

La sperimentazione non è stata solo mirata alla verifica in campo delle prestazioni operative con un'indagine su larga scala ma anche a valutare numericamente quanto pesano i vantaggi di una siffatta tecnologia.

Per effettuare queste valutazioni l'ENEA, che ha seguito direttamente le operazioni di misura, ha opportunamente predisposto 3 veicoli ibridi, uno per ogni città, con l'idonea strumentazione di bordo per le verifiche cinematiche ed energetiche. Sono stati poi strumentati 3 veicoli convenzionali della medesima taglia per poter eseguire un confronto diretto sulle prestazioni energetiche tra le due tipologie di mezzi.

I veicoli strumentati, sia convenzionali sia ibridi, sono stati posti ad operare sui medesimi percorsi e nelle stesse ore. La diversa struttura del percorso (altimetria, tortuosità, condizioni di traffico) attua una differente richiesta di potenza meccanica e di conseguenza ci si attendeva una diversa risultanza nei consumi energetici.

Si osservi che le caratteristiche di questi veicoli, di prima generazione, sono state nel tempo perfezionate con un miglioramento generale delle prestazioni energetiche ed ambientali, e purtuttavia si ritiene utile riportare nel seguito i risultati delle sperimentazioni effettuate sul campo come esemplificativi della natura dei problemi posti da questa tecnologia e delle possibilità che essa offre.

19.2.1 *Gli ibridi a Roma, Terni e Ferrara*

Roma

La linea del servizio pubblico lungo la quale i veicoli ibridi hanno lavorato è stata la 628, la cui tratta è lunga 11,1 + 11,1 km. La percorrenza massima lungo questa linea è di 180 km al giorno per veicolo. Il percorso in Roma prevedeva una percorrenza in elettrico pari al 22% (2,6 + 2,2 km) dell'intero tragitto, con una leggera differenza tra percorso in andata e ritorno, ed il restante 78% percorso in modalità ibrida. Il motore termico operava a regime costante con piccole variazioni della potenza erogata. Il consumo di gasolio mediamente effettuato è stato di 0,475 L/km contro un consumo di gasolio, lungo lo stesso percorso, di 0,64 L/km per un veicolo diesel. Il veicolo ibrido risulta vantaggioso in termini di consumo energetico riferito al combustibile.

Tuttavia un corretto confronto dei consumi deve tener presente anche degli squilibri in batteria e quindi della necessità di dover ricaricare eventualmente la batteria in seguito ad una sua scarica durante l'esercizio. Dalle misure effettuate il bilancio energetico in batteria risulta positivo ossia la batteria riceve un contributo energetico (da parte del motogeneratore ed in recupero frenata) superiore alle richieste energetiche in fase di erogazione. Applicando tale ipotesi il consumo equivalente scende a valori intorno a 0,35 L/km, migliorando di quasi il 50% le prestazioni sui consumi rispetto ad un veicolo convenzionale. Ciò nonostante, al rientro in deposito il veicolo manifestava una scarica delle batterie che richiedeva un processo di ricarica tramite caricabatterie di bordo per ripristinare lo stato di carica iniziale.

La discrepanza tra saldo energetico positivo e stato di carica decrescente dipende dalla non ottimale gestione delle batterie e dalla tipologia di batterie selezionata. Le alte correnti di ricarica con regimi transitori particolarmente veloci non consentono la trasformazione dell'energia elettrica in energia elettrochimica ma dissipano sulla resistenza interna in calore buona parte di tale energia.

Il saldo energetico positivo era pertanto solo ideale ed il veicolo manifestava un deficit che doveva essere colmato tramite un ciclo di ricarica.

Prove eseguite con il motogeneratore in condizione di erogare per il 100% del percorso hanno prodotto consumi di gasolio pari a 0,61 L/km molto prossimi a quelli del convenzionale ed hanno mostrato un allungamento dell'operatività del mezzo prima di una ricarica delle batterie. In ogni modo il veicolo era in grado di operare con la piena autonomia entro il valore dei 180 km al giorno richiesti dalla tabella oraria della linea (8 corse a/r al giorno) subendo un leggero degrado delle prestazioni nella fase terminale della giornata. La velocità media con cui operava dipendeva dalle condizioni di traffico durante l'arco della giornata, oscillando tra 11 km/h e 16 km/h. Il saldo energetico rilevato in batteria, espresso in funzione della velocità media, indica una riduzione del saldo che tende ad annullarsi per valori superiori ai 18 km/h.

Questo è da imputare ad una maggiore energia media richiesta dal veicolo che non è pienamente soddisfatta dal gruppo motore-generatore attestato su un valore di potenza erogata intorno ai 25 kW. Se si confronta l'energia media richiesta dal motore elettrico (1,68 kWh/km), cui va aggiunta l'energia media richiesta per l'alimentazione dei circuiti ausiliari pari a 0,10 kWh/km, con quella media erogata dal generatore (1,45 kWh/km) si nota un deficit di erogazione coperto dalla batteria che dovrebbe essere a sua volta colmato con l'energia del recupero in frenata. Ma si è visto già che non riesce ad essere immagazzinata totalmente e pertanto si ha una effettiva scarica della batteria.

La difficoltà di operare correttamente con le batterie al Pb-acido è stata evidenziata, durante il corso della sperimentazione, da un precoce invecchiamento delle batterie, che non sono state in grado di sopportare il servizio, tanto da scaricarsi o anche cortocircuitarsi entro poche ore dall'inizio del servizio.

La sostituzione di questa tipologia di batterie con altre (le SpirallCell Technology) si è mostrata maggiormente idonea all'utilizzo sul veicolo ibrido rispetto alle precedenti, facendo aumentare gli indici di regolarità del servizio dal 95% al 99%, come per i veicoli convenzionali. Il bilancio energetico risultava quasi in pareggio bastando pochi minuti di accensione del caricabatteria per ottenere le batterie ricariche.

Sebbene vi siano stati dei miglioramenti, la criticità delle batterie è sempre rimasta, manifestandosi con ripetuti inconvenienti, anche se con minor frequenza, e mostrando la necessità di migliorare il sistema di accumulo.

Nelle batterie al Pb-acido in talune situazioni il liquido elettrolita si trovava a temperature di ebollizione a causa dell'intenso calore sviluppato e questo danneggiava irrimediabilmente il componente.

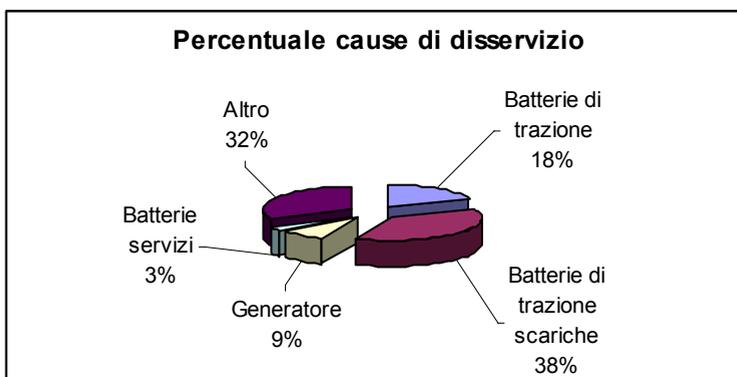


Fig. 19.7 - Percentuale delle cause di disservizio dei veicoli ibridi a Roma

L'aspetto ambientale è stato verificato in campo mediante una serie di misure durante il regolare servizio del veicolo tramite l'utilizzo di strumentazione appositamente sviluppata allo scopo. Il ridotto consumo rispetto al convenzionale abbatte l'emissione di CO₂ che è direttamente correlata al quantitativo di carburante consumato secondo un coefficiente dipendente dal contenuto di carbonio nel combustibile. Nel caso del gasolio per autotrazione, il valore tipico di tale coefficiente si aggira intorno a 3,1: per ogni kg di combustibile si producono 3,1 kg di anidride carbonica. Con i consumi indicati, la produzione di CO₂ del bus convenzionale si aggira intorno a 1,65 kgCO₂/km mentre il veicolo ibrido produce un quantitativo pari a 1,23 kgCO₂/km, inferiore del 25% rispetto al bus diesel. Questa ridotta emissione di CO₂ ha tuttavia una valenza limitata all'analisi locale poiché il consumo equivalente reale, che tiene conto delle ricariche di energia elettrica in deposito, risulta pari al consumo del veicolo convenzionale e quindi non si apprezzano miglioramenti nelle emissioni globali. Se l'energia di ricarica provenisse totalmente da fonti rinnovabili (o nucleare), il computo della CO₂ emessa ne trarrebbe un vantaggio ed in tale caso si potrebbe parlare di vantaggio per le emissioni di gas serra. Le misure eseguite con il sistema di rilevazione delle emissioni 'on-board' hanno confermato questi valori con leggeri scostamenti dovuti agli errori di misura.

A livello ambientale, in ambito locale, un maggiore interesse è rivestito dalle emissioni di CO, HC ed NO_x che impattano direttamente con la popolazione cittadina. Le misure eseguite hanno rilevato una evidente riduzione delle emissioni, grazie alla minore cilindrata del motore termico nell'ibrido ed al punto di lavoro fisso del motore.

Il confronto tra i valori medi misurati in diverse prove sperimentali su strada indicano una forte riduzione delle emissioni di CO e di HC, circa un ordine di grandezza, con un dimezzamento di quelle di NO_x.

Tab. 19.3 - Confronto tra le emissioni rilevate di monossido di carbonio (CO), idrocarburi incombusti (HC) e ossidi di azoto (NO_x) in veicoli convenzionali e ibridi nelle sperimentazioni effettuate a Roma, Terni e Ferrara

| | <i>Emissioni (g/km)</i> | | |
|-----------------------|-------------------------|------|-----------------|
| | CO | HC | NO _x |
| <i>Roma</i> | | | |
| Veicolo convenzionale | 5,4 | 7,12 | 32,14 |
| Veicolo ibrido | 0,13 | 0,16 | 15,45 |
| <i>Terni</i> | | | |
| Veicolo convenzionale | 5,05 | 0,82 | 24,92 |
| Veicolo ibrido | 0,30 | 0,59 | 11,55 |
| <i>Ferrara</i> | | | |
| Veicolo convenzionale | 7,35 | 1,42 | 29,89 |
| Veicolo ibrido | 0,28 | 0,63 | 12,45 |

La valutazione puntuale delle emissioni ci porta a considerare in modo negativo la gestione del motore termico con la strategia ON/OFF che produce picchi emissivi di CO e HC all'atto della sua messa in moto. Superato il regime transitorio e stabilizzata la temperatura, dette emissioni raggiungono valori molto bassi. Tale comportamento è da addebitare ai tempi di risposta del convertitore catalitico che impiega un certo intervallo di tempo per raggiungere le sue condizioni ideali di regime. Poiché durante le operazioni di misura sono state eseguite diverse operazioni di accensione/spegnimento il livello medio delle emissioni ne è stato influenzato. Una migliore gestione dei transitori (convertitore preriscaldato) o una diversa strategia di controllo con l'eliminazione degli stati di transizione potrebbero migliorare ulteriormente le emissioni.

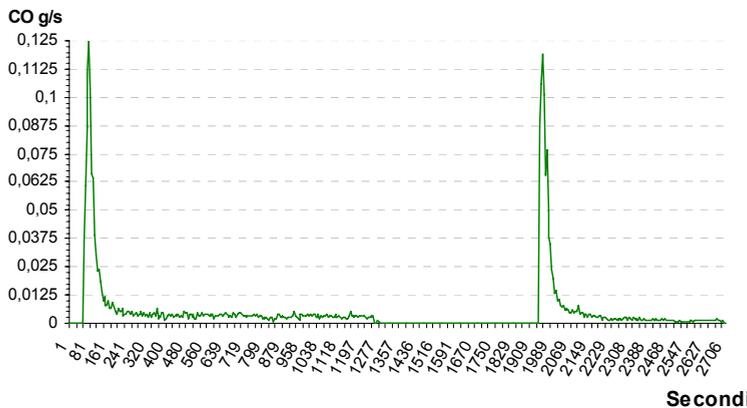


Fig. 19.8 - Picco di emissione di CO alla accensione del motore termico

Terni

A Terni i veicoli ibridi sono stati posti ad operare lungo la linea n. 3 del servizio di trasporto pubblico, caratterizzata da una lunghezza della tratta di 10,9 km [6]. Anche in questo caso la percorrenza massima per vettura era intorno ai 180 km e precisamente 182 km. Questa linea, rispetto a quella di Roma, presentava una maggiore pendenza media (circa il 4%) ed una maggiore velocità media commerciale (dichiarata in 18,7 km/h). La percentuale di percorso in solo elettrico non è stata una costante ma ha subito, durante l'intera sperimentazione, variazioni significative dovute al saldo negativo in batteria che ha richiesto maggiori tempi di accensione.

L'energia media richiesta dal motore elettrico (1,8 kWh/km) è stata superiore a quella erogata dal generatore (1,4 kWh/km) e sommando il contributo degli ausiliari si raggiunge una situazione di squilibrio energetico. Il saldo in batteria, escludendo le prime prove in cui è stato negativo, risulta leggermente positivo ma per gli stessi motivi evidenziati a Roma la batteria subisce una scarica che deve essere colmata a fine servizio. Il consumo del veicolo ibrido si è attestato mediamente intorno a 0,440 L/km contro i 0,437 L/km del bus diesel di confronto. In tali condizioni il consumo è uguale ma tenendo presente che il

saldo in batteria è positivo (condizioni di ipergenerazione) il consumo equivalente sarebbe potuto essere più piccolo, ossia pari a 0,41 L/km con un miglioramento teorico del 7%.

Dal punto di vista ambientale, le emissioni di CO₂ non hanno subito alcun beneficio avendosi uguale consumo di gasolio mentre per le emissioni normate (HC, CO, NO_x ecc.) si nota una diminuzione in virtù del funzionamento a punto fisso e della taglia ridotta del motore.

Anche a Terni si sono manifestate anomalie legate alle batterie con rotture delle medesime e scariche inattese (Fig. 19.9). Per quello che riguarda il loro esercizio, gli autisti sottoposti ad intervista hanno evidenziato la mancanza di freno motore al rilascio dell'acceleratore e difficoltà con lo sterzo mentre in positivo hanno evidenziato una fluidità di guida, una riduzione notevole del rumore ed una buona progressione dell'accelerazione

Le prestazioni a Terni sono state maggiormente spinte poiché il tipo di percorso alternava tratti con velocità commerciale ridotta a tratti con velocità commerciale elevata in cui le prestazioni del veicolo ibrido erano spinte al limite in termini energetici. A questa va aggiunta la distanza tra capolinea e deposito che a Terni era notevole, ed era percorsa ad elevata velocità causando una sollecitazione ulteriore ai veicoli.

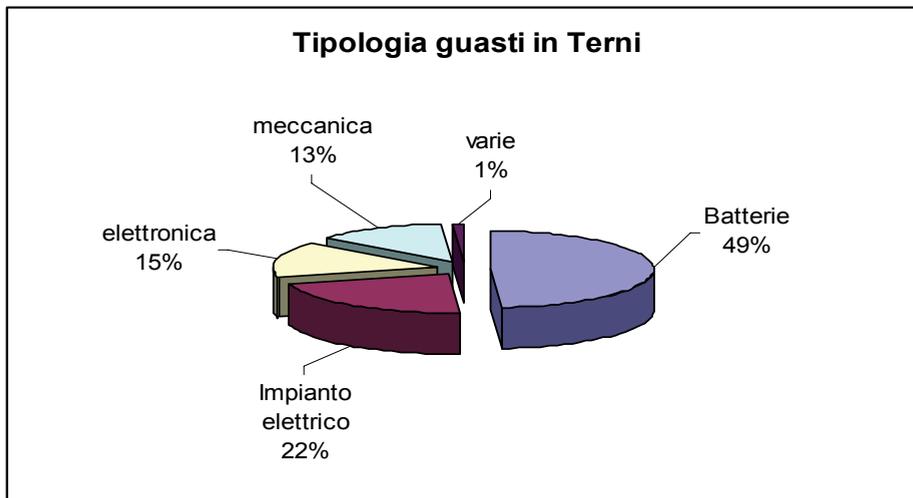


Fig. 19.9 - Percentuale delle cause di disservizio a Terni

Ferrara

Nella città di Ferrara la linea interessata dall'introduzione dei veicoli ibridi è lunga 4,7 km ed è caratterizzata da un profilo pianeggiante [7]. La velocità media commerciale dichiarata è di 14 km/h con un percorso di 192 km/giorno per vettura. L'energia media richiesta dal motore è stata di 1,89 kWh/km a fronte di 1,46 kWh/km erogati dal motogeneratore di bordo.

La differenza è fornita dall'accumulo, che presenta un saldo leggermente positivo lavorando il veicolo con alti rapporti di motogeneratore acceso (tra il 90 ed il 100%). Tuttavia, anche a Ferrara si sono mostrati problemi con il sistema di accumulo, che si presentava scarico dopo alcuni giorni a dispetto del bilancio in ipergenerazione. Il consumo del veicolo ibrido è stato misurato in 0,45 L/km contro gli 0,54 L/km mediamente consumati da un bus diesel nella medesima tratta. Il consumo equivalente, che tiene conto della condizione di ipergenerazione, conduce ad un consumo, per l'ibrido, di 0,41 L/km.

Per le emissioni si sono riscontrati i medesimi vantaggi già indicati nelle altre sperimentazioni, con una forte riduzione di NO_x, di CO e di HC. Le emissioni di CO₂ sono diminuite del 20% a causa del minore consumo di carburante. I problemi legati alla gestione delle batterie hanno successivamente condotto all'introduzione di un sistema di gestione delle batterie che, in relazione allo stato di carica stimato, potesse supportare l'autista nelle indicazioni di accensione/spengimento del motore termico.

In definitiva l'esperienza portata avanti nelle tre città ha prodotto interessanti indicazioni in merito alle criticità sistemiche ed alle impostazioni progettuali del veicolo. Innanzi tutto va evidenziata la necessità di migliorare il sistema di accumulo che deve risultare maggiormente idoneo a sopportare gli stress termici ed i picchi di corrente derivanti dal recupero in frenata. Il miglioramento dell'efficienza della batteria contribuirebbe a garantire l'effettivo saldo positivo in termini energetici ed a non dover ricorrere giornalmente alla ricarica in deposito. Inoltre si limiterebbero i fermi macchina che producono disservizi, e quindi costi aggiuntivi.

Un aumento della potenza erogata dal motogeneratore potrebbe contribuire ad alleviare l'eccessivo onere del ricorso alla batteria che produce scariche non sempre recuperabili ed inoltre richiede un dimensionamento maggiore dell'accumulo per far fronte a queste richieste continue nel tempo.

La gestione ON/OFF del motogeneratore dovrebbe essere abbandonata in quanto produce un aumento delle emissioni durante i transitori e potrebbe essere sostituita da una strategia maggiormente idonea a garantire basse emissioni ed uno stato di carica non inferiore ad un certo limite minimo.

La generazione successiva di autobus ibridi dell'ALTRA, da 12 m ed Europolis, ha in effetti tenuto conto degli insegnamenti derivanti dall'esperienza sul campo sopra descritta.

19.2.2 L'ibrido a gas naturale

Nella continua evoluzione delle configurazioni di veicolo ibrido, una soluzione interessante è quella introdotta dalla EPT, che ha introdotto una turbina a gas naturale in sostituzione del classico motore diesel.

Il veicolo, denominato Horus, è un veicolo corto (8 m x 2,4 m x 3,3 m) del peso massimo di 15,6 tonnellate, in grado di trasportare 46 passeggeri più il condu-

cente. Il convertitore di energia primaria è una microturbina a gas naturale con una potenza nominale di 30 kW ad un regime di rotazione di 96.000 giri/min. Il combustibile è immagazzinato in 6 bombole in acciaio da 85 L, collocate sul tetto alla pressione di 200 bar max. Il sistema di accumulo è costituito da batterie al Pb-gel per 336 V di tensione nominale (56 x 6 V) gestite da un sistema BMS. Il motore elettrico di trazione è asincrono trifase ed ha una potenza massima di 120 kW a 1800 giri/min ed una potenza continua di 64 kW.

Il costruttore dichiara che il veicolo può percorrere in puro elettrico 50 km mentre in ibrido l'autonomia dichiarata, in funzione del massimo contenuto di gas nei serbatoi, è di 180 km.

L'azienda di trasporto di Ferrara nel 2004 ha acquisito una piccola serie di tali veicoli per potenziare la propria flotta di bus a basso impatto ambientale. Da misure in campo per un periodo di più mesi è stato rilevato un consumo medio di 0,44 kg/km di gas naturale. Un veicolo a gas naturale di 12 m consuma tipicamente 0,60 kg/km per cui facendo la comparazione in proporzione il consumo non appare molto dissimile. Anche per il veicolo ibrido a gas naturale il vantaggio energetico è limitato ma l'utilizzo del gas naturale e la combustione costante in turbina riducono fortemente le emissioni di NOx e di particolato. L'autonomia del veicolo è stata rispettata avendosi per le singole giornate percorrenze comprese tra 150 e 160 km. I veicoli sono tuttora operativi lungo le linee di trasporto pubblico.



Fig. 19.10 - Il bus della EPT Horus, un ibrido da 8 metri con motore elettrico da 120 kW e gruppo di generazione con microturbina a gas naturale da 30 kW

19.2.3 L'ibrido a celle a combustibile

La richiesta di un veicolo che fosse a zero emissioni in ambiente urbano ma che potesse garantire ampia autonomia ha destato da sempre l'interesse di tutti gli amministratori locali. Alla fine del 1999 la Città di Torino ha promosso

la costituzione di un consorzio che si è fatto carico di progettare, realizzare e porre su strada, in servizio operativo, un veicolo ad idrogeno.

Al fine di realizzare questo ambizioso progetto il Ministero dell'Ambiente e la Regione Piemonte hanno parzialmente finanziato il Progetto "Autobus ad idrogeno: emissioni zero".

Il Consorzio è stato costituito da Irisbus, Ansaldo, GTT (la società di trasporto torinese), ENEA, Sapio e Compagnia Valdostana Acque. La filosofia progettuale che ha ispirato l'elaborazione tecnica è stata quella dell'ibrido serie in virtù dell'esperienza condotta con i veicoli ibridi già menzionati ed alle loro prestazioni. Ovviamente si è prestata maggiore attenzione alle problematiche emerse dalle precedenti risultanze sperimentali in modo da superare i nodi critici venuti alla luce.

Le dimensioni veicolari sono quelle tipiche di un veicolo lungo: 12 m x 3,3 m x 2,5 m capace di trasportare 73 passeggeri. Come dimensioni il veicolo ibrido ad idrogeno rispecchia quelle degli ibridi con motore a gasolio già illustrati, ma con una diversa carrozzeria, basata sull'IVECO CityClass. Il convertitore di energia primaria è stato sostituito con una Fuel Cell (FC - cella a combustibile) a polimeri prodotta dalla UTC, avente una potenza nominale di 60 kW ed in grado di soddisfare la richiesta di potenza media dal veicolo. Rispetto al veicolo ibrido a gasolio, la potenza massima del convertitore di energia primaria risulta raddoppiata e questo dovrebbe garantire la piena risposta alle esigenze energetiche medie del motore di trazione.

Il sistema di accumulo inizialmente previsto era basato su accumulatori al piombo, ma dopo le prime prove si è optato per le batterie Zebra (Ni-Cl). Queste batterie sono dotate di un sistema di controllo integrato che provvede a gestirle in modo da ottimizzare le loro prestazioni durante i cicli di carica e scarica. Le batterie sono inoltre munite di un riscaldatore interno che provvede a mantenerle alla corretta temperatura intorno ai 300 °C.

Tab. 19.4 - Caratteristiche principali dell'IVECO CityClass con celle a combustibile

| | |
|---|--------------------------------|
| Potenza nominale motore elettrico | 128 kW @ 1500 giri/min |
| Potenza massima motore elettrico | 160 kW @ 1500 giri/min |
| Coppia massima motore elettrico | 1500 Nm @ 1500 giri/min |
| Potenza della cella a combustibile (FC) | 60 kW |
| Tensione nominale | 558 V |
| Serbatoi | 9*140 lt in acciaio |
| Capacità serbatoi | 20 kg H ₂ @ 200 bar |
| Accumulatori | Zebra |
| Capacità | 128 Ah |
| Caricabatteria di bordo | 28 kW |

Le batterie sono caratterizzate da un rendimento coulombico pari ad 1 e pertanto è facile stimarne il loro State of Charge (SOC) con la semplice legge amperometrica. L'aspetto negativo è il maggior costo da sostenere per la loro acquisizione. Le batterie Zebra (4 pacchi) forniscono una tensione a vuoto di 557 V e possiedono una capacità di 128 Ah con 75 kWh di energia immagazzinata. La potenza di picco sale così a 120 kW per soddisfare le richieste di potenza durante le fasi di accelerazione.

Il tetto accoglie il sistema di stoccaggio dell'idrogeno, ospitando 9 bombole in acciaio-composito per la capienza globale di 1260 L, che alla pressione di 200 bar sono in grado di contenere 20 kg di idrogeno. La trazione elettrica è assicurata da un motore asincrono trifase da 160 kW di potenza massima e con una coppia massima di 1500 Nm.

Il progetto del veicolo ibrido a celle a combustibile è stato il fautore della messa punto della normativa di riferimento per l'omologazione dei veicoli ad idrogeno per il trasporto stradale collettivo, che in Italia non era ancora stata prevista.

Al fine di ottenere questa omologazione è stata eseguita l'analisi del rischio ed una serie di test su pista che hanno condotto ad una percorrenza di 5.000 km (di cui 500 km su superficie dissestata).

Alla fine di questi cicli di prova il veicolo ha conseguito l'omologazione alla circolazione su strada ma ha dovuto affrontare ulteriori 5.000 km di prove simulando il servizio pubblico.

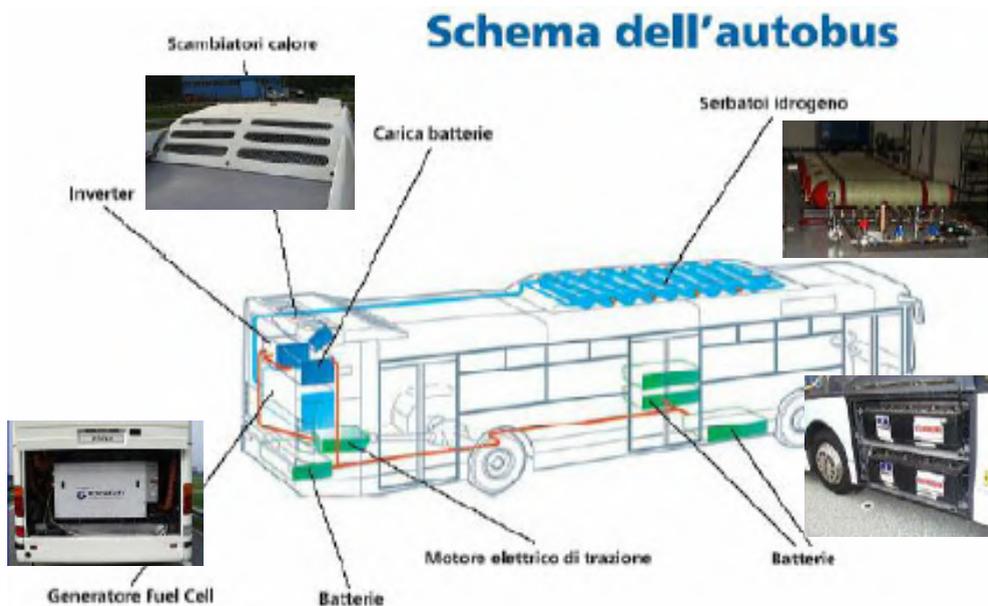


Fig. 19.11 - Schema autobus ibrido ad idrogeno



Fig. 19.12 - L'autobus a idrogeno in p.zza Castello a Torino nel novembre 2004

Al superamento di questi test il bus ibrido era pienamente operativo ed è stato immesso in ruolo per il trasporto ordinario in servizio pubblico, tra cui è da annoverare il trasporto degli atleti olimpici durante i giochi invernali del 2006 in Torino.

Le prove stradali sono state eseguite in due distinte campagne di misure (seguite direttamente dall'ENEA) nel 2005 e nel 2006 [9]. Nelle prime il veicolo è stato monitorato a vuoto in servizio simulato e nelle seconde durante il servizio pubblico reale.

La prima serie di prove è stata condotta con una configurazione della cella diversa da quella inizialmente prevista riducendo la potenza in erogazione a 30 kW. Il veicolo percorreva giornalmente un tracciato urbano semiperiferia-centro per una percorrenza totale di circa 70 km. Ogni sera al rientro in deposito veniva sottoposto ad una ricarica delle batterie.

La velocità media è stata di 11,5 km/h con un picco di 49 km/h. Il consumo medio di idrogeno rilevato è stato di 62 g/km pari a 2,09 kWh/km. Se riportiamo questo consumo al caso a pieno carico il consumo cresce a 90 g/km corrispondenti a 2,93 kWh/km. Confrontato con il consumo dell'ibrido con motore termico, il bus a fuel cell mostra un minore consumo energetico del generatore primario.

Questo è dovuto al maggior contenuto energetico dell'idrogeno rispetto al gassolio. La cella mostra inoltre un rendimento di conversione molto alto, pari a 0,57 contro un rendimento del motore termico-generatore misurato in 0,27. Questa netta differenza dell'efficienza di conversione produce benefici effetti sui consumi e consente di ridurre al minimo il quantitativo di combustibile a bordo, che nel caso dell'idrogeno richiederebbe pesi ed ingombri notevoli.

Le batterie hanno mostrato una riduzione dello stato di carica durante i test per cui il consumo equivalente massimo risulta superiore per compensare

questa riduzione, attestandosi intorno a 105 g/km massimi (un poco oltre i 3 kWh/km). L'energia media erogata dal gruppo convertitore primario FC-DC/DC è stata rilevata in 1,09 kWh/km per una potenza media di 12,1 kW contro un valore massimo di potenza pari a 29 kW.

L'energia mediamente è stata suddivisa per il 64% verso il carico e il rimanente 36% in batteria (Fig. 19.13, grafico a sinistra). In batteria finiscono mediamente 0,40 kWh/km mentre 0,68 kWh/km sono dirette a soddisfare le esigenze del carico.

La batteria riceve in ingresso energia dal convertitore di energia primaria e dal motore di trazione mediante il recupero in frenata: il 62% è derivata al gruppo celle-DC/DC e la rimanente parte deriva dal recupero in frenata (Fig. 19.13, grafico a destra).

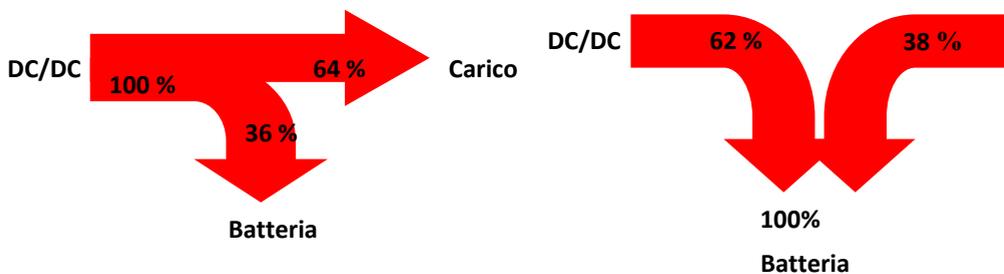


Fig. 19.13 - Ripartizione percentuale dell'energia

Il bilancio energetico in batteria è mediamente negativo essendoci un esborso da parte della batteria per sopperire alle necessità della trazione: lo sbilanciamento è circa il 20% rispetto all'energia in ingresso in batteria e questo richiede una ricarica in deposito. Le batterie Zebra rispondono bene alle richieste dei picchi di potenza con 130 kW erogati a fronte di 25 kW mediamente forniti.

Il carico, composto dal motore di trazione e dagli apparati ausiliari, ha richiesto punte di 158 kW fornite dall'intervento congiunto della batteria e del convertitore di energia primaria. Invece la potenza media richiesta dal carico è notevolmente più bassa, attestandosi sui 35 kW, coperti dal generatore e dalla batteria che diviene quindi un supporto indispensabile. Il recupero in frenata assume una percentuale elevata e contribuisce a ridurre notevolmente gli effetti dello squilibrio in ingresso/uscita della batteria.

La strategia di gestione implementata è quella del 'load following' corretta dal controllo del SOC: il generatore FC seguiva le richieste di potenza del carico e ai regimi di bassa erogazione forniva un minimo di potenza per le batterie. Al diminuire del SOC il livello di potenza erogata, durante le fasi di bassa richiesta di potenza da parte del carico, veniva accresciuto per cercare di compensare la diminuzione del livello di carica in batteria.

Le emissioni risultano ridotte del 100% poiché il risultato della combustione dell'idrogeno è acqua e quindi si annullano completamente le emissioni di un equivalente veicolo diesel. Tuttavia su scala globale occorre tener presente che la produzione di idrogeno richiede un esborso in termini energetici che quindi il veicolo a celle emette indirettamente un certo quantitativo di sostanze inquinanti, in proporzione alla percentuale di sorgenti fossili utilizzate per produrlo.

Nella sperimentazione il veicolo viene rifornito mediante idrogeno ricavato da elettrolizzatori, alimentati con energia elettrica da fonte rinnovabile (idroelettrica) e pertanto anche le emissioni globali sono prossime allo zero.

Durante le prove il veicolo non ha presentato inconvenienti di rilievo che ne abbiano ridotto drasticamente la disponibilità, escluso la sostituzione di una batteria che mostrava segni di funzionamento anomalo.

La maggiore criticità è stata dovuta alla cella a causa di inconvenienti che la portavano al blocco. Tuttavia questi inconvenienti sono stati generati non direttamente dallo stack ma dagli apparati ausiliari necessari al corretto funzionamento della FC.

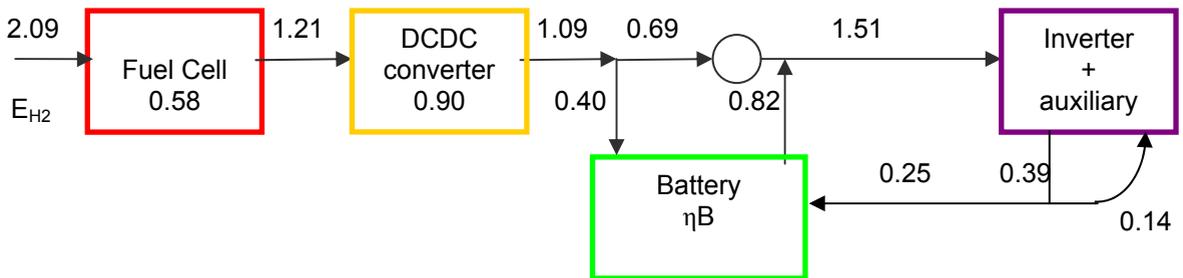


Fig. 19.14 - Ripartizione dei flussi di energia nell'ibrido a celle a combustibile (in kWh/km)

La sperimentazione ha messo alla luce il buon impianto del progetto e l'affidabilità dell'elettronica di bordo, che non ha generato problemi dopo la fase iniziale di messa a punto.

La ridotta potenza del convertitore di energia primaria ha condizionato l'equilibrio energetico costringendo la batteria a sopperire a questa riduzione con un intervento maggiore. Tuttavia la batteria Zebra ha reagito bene a queste richieste ed inoltre non ha mostrato inconvenienti a causa delle correnti in ricarica.

I tempi di risposta della FC si sono mostrati un po' lunghi a causa della limitazione imposta alla rampa di salita della potenza e questo ritardo è stato fonte di ulteriore esborso energetico da parte della batteria. La caduta del SOC della

batteria si è sempre mantenuta entro livelli tali da consentire la piena operatività del veicolo senza ridurre le sue prestazioni.

Differentemente dell'ibrido con il motore termico, in fase di frenata per limitare le potenze di carica in batteria, a causa degli elevati picchi del recupero in frenata, il convertitore di energia primaria non eroga energia per intervenire successivamente alla ripresa della richiesta di potenza da parte dell'inverter di trazione.

Per limitare la scarica della batteria, la strategia "load following" è integrata con una gestione del SOC: infatti quando il valore del SOC tocca l'80% la potenza minima erogata durante le fasi di fermo del mezzo tende proporzionalmente a salire (da 5 kW a 30 kW) in modo da ridurre la variazione dello stato di carica di batteria.

19.3 Conclusioni

La strada si è dimostrata essere un interessante banco di prova per testare i bus ibridi sia per sottolinearne i limiti che per evidenziarne i meriti. Dalle esperienze descritte in precedenza si possono effettuare alcune importanti considerazioni:

- nel veicolo serie (che non siano concepiti fin dall'inizio come plug-in hybrid) un corretto dimensionamento del convertitore di energia primaria è importante per evitare il ricorso eccessivo alle risorse energetiche del sistema di accumulo. In particolare la potenza media del sistema deve essere almeno sufficiente a garantire una erogazione pari alla potenza media del carico. Ogni situazione in cui detta condizione non è verificata comporta la riduzione dello stato di carica dell'accumulo che a fine servizio risulta pesantemente sbilanciato;
- per evitare danneggiamenti al sistema di accumulo, esso deve possedere delle ottime caratteristiche in termini di resistenza interna riducendosi, altresì, in questo modo le perdite energetiche. Inoltre il sistema di controllo deve provvedere alla limitazione della corrente in batteria durante il recupero in frenata riducendo l'apporto energetico del convertitore di energia primaria;
- l'utilizzo dei supercapacitori riduce gli stress elettrici prodotti dalle correnti di recupero sul sistema di accumulo avendo ottime caratteristiche nell'erogare ed assorbire forti variazioni di carica in brevissimo tempo. Inoltre l'introduzione dei supercapacitori è in grado di influenzare le dimensioni del sistema di accumulo che non deve più essere in grado di sopperire ai picchi di potenza istantanei;
- la strategia di gestione del complesso ibrido deve essere tale da favorire il raggiungimento degli obiettivi che hanno motivato l'utilizzo del veicolo ibrido, come la riduzione delle emissioni o del consumo energetico;

- la valutazione del SOC del sistema di accumulo, tramite un sistema di gestione dell'accumulo, è necessaria per poter operare utilizzando strategie integrate che tengano conto dei livelli di SOC ed attivino il convertitore di energia primaria ad erogazioni proporzionali di potenza;
- i moto-generatori termici devono essere caratterizzati da bassi profili emissivi ed essere dotati dei più recenti dispositivi di abbattimento delle emissioni, polveri comprese;
- l'utilizzo di gas naturale o di miscele idrogeno/gas naturale può contribuire a ridurre i valori di emissione ed anche a migliorare le prestazioni energetiche purché sia previsto l'utilizzo di motori appositamente sviluppati per ottimizzare la combustione;
- una attenta progettazione dei sistemi e dei suoi componenti consente di evitare problemi di affidabilità riducendo le fermate per guasto;
- lo sviluppo di generatori primari a FC in ambito nazionale deve essere considerato prioritario per poter garantire un approvvigionamento degli stack svincolato dalle restrizioni del mercato e dalle condizioni di fornitura ed assistenza;
- il miglioramento delle prestazioni delle FC in relazione alla sua affidabilità ed invecchiamento deve essere oggetto di ulteriori sforzi in modo da offrire prodotti con tassi di guasto molto bassi;
- i sistemi di stoccaggio dell'idrogeno devono migliorare i loro rapporti capacità/peso per ottimizzare gli ingombri ed aumentare il peso pagante;
- i percorsi urbani a minore velocità media risultano maggiormente idonei rispetto a quelli caratterizzati da tratti extraurbani in cui le prestazioni in termini di potenza subiscono vistosi incrementi con la riduzione del recupero in frenata;
- ridurre la fonte di rumore e di emissioni provvedendo allo spegnimento ai capolinea nel caso di soste prolungate;
- garantire una autonomia reale senza il ricorso a fastidiose ricariche in deposito.

Queste considerazioni scaturite dalle esperienze in campo sono solo alcune riflessioni sugli interventi con cui è possibile migliorare le prestazioni del veicolo ibrido per il trasporto pubblico. L'utilizzo di tali flotte ha in ogni caso ben evidenziato il profilo ambientale posseduto dal bus ibrido che consente una forte riduzione delle emissioni anche se sotto l'aspetto energetico non hanno mostrato sostanziali vantaggi nella versione con il generatore termico. Tuttavia la modalità di gestione del generatore influisce in modo basilare sui consumi per cui esistono ancora margini per migliorarli.

Prova di questo è il ridotto consumo energetico nell'ibrido ad idrogeno grazie all'utilizzo della cella ad alto rendimento di conversione.

L'ultimo elemento su cui soffermarsi è legato alla richiesta di un'alta affidabilità del veicolo al fine di ridurre al minimo il disservizio prodotto da un arresto indesiderato in linea. Questi disservizi producono un danno economico diretto per le necessità correlate al recupero del veicolo ed alla sua sostituzione, ma anche un danno di immagine presso l'utenza che è costretta ad attese maggiori.

Se i ricercatori ed i produttori di veicoli concentreranno i loro sforzi sui quei punti che maggiormente promettono di essere risolti, la probabilità di avere flotte di veicoli ibridi per il trasporto urbano diventerà non una occasione sperimentale ma una scelta ottimale e concreta.

Ringraziamenti

Un sentito e doveroso ringraziamento va ai colleghi M. Conti, F. Miselli, L. Somma che con il loro prezioso lavoro hanno consentito la realizzazione delle campagne sperimentali ed alle compagnie di trasporto pubblico urbano che hanno collaborato alla esecuzione delle misure su strada. Inoltre un sincero grazie va al collega R. Ragona, con cui abbiamo sovente condiviso le difficoltà lavorative per l'espletamento delle campagne di misure, per il suo prezioso apporto nell'elaborazione dei dati rilevati.

Bibliografia

- [1] Rapporto Energia e Ambiente 2003 – ENEA, ISBN 88-8286-042-6.
- [2] M. Conte, M. Conti, E. Marinelli, M. Romanazzo, A. D'Angelosante – Caratterizzazione sul campo di accumulatori per veicoli elettrici – RT/ENERG/90/06.
- [3] JUPITER project: final report.
- [4] JUPITER-2 project: final report – 2000.
- [5] R. Stussi, I. Santos, J. Esteves, M.J. Resende - Developing Monitoring and Maintenance Agreement and Tools for 5 Portuguese Cities with Electric Mini-buses - EVS-22 Yokohama, Japan, Oct. 23-28, 2006.
- [6] Autobus ibridi e mobilità sostenibile: progetto FLEETS – ENEA 2000;
- [7] M. Conti, V. Leonelli, F. Miselli, R. Ragona – La flotta ibrida a Ferrara: misure e risultati – RT ENEA 2000.
- [8] A. Genovese, D. Rizzacasa - Comparison of the Control Strategies for Hybrid Bus using road test and ADVISOR model – EVS20 Long Beach 2003.
- [9] A. Genovese, R. Ragona – Hybrid Fuel cell Experience in Turin: 'on road' experimental results – EVS22 Yokohama 2006.

CAPITOLO 20

I VEICOLI IBRIDI PER IL TRASPORTO DELLE MERCI IN AMBITO URBANO

Adriano Alessandrini, Antonio Coccia, Francesco Filippi

*CTL – Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica,
Università di Roma “La Sapienza”*

Premessa

Nel novembre del 2003, con un finanziamento del MIUR e della stessa Università, è stato avviato presso il Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade dell'Università degli Studi di Roma “La Sapienza” (DITS) il centro di eccellenza CTL (Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica). Recentemente diventato, con Decreto Rettoriale, un centro autonomo di spesa dell'Università, il CTL racchiude, oltre a quelle sui trasporti, le competenze di diversi dipartimenti dell'Università (Telecomunicazioni, Informatica e Meccanica) e si avvale di numerose collaborazioni esterne con imprese, come Telespazio e ViaSat, istituzioni, quali la Confindustria e l'Istituto del Commercio Estero, e centri di ricerca, quali l'ENEA.

Unico centro di eccellenza su trasporti e logistica del centro e sud Italia, il CTL svolge attività di ricerca e sviluppo, formazione e informazione per la sostenibilità e l'applicazione delle ICT (Information and Communication Technologies) e dei sistemi ITS (Intelligent Transport System) ai trasporti e alla logistica ed ha in corso ricerche sulle trasformazioni nella distribuzione commerciale, sullo sviluppo dell'e-Commerce, dei modelli di business e dei servizi logistici urbani, e sui veicoli a basso o nullo impatto ambientale.

Nell'ambito delle ricerche del CTL, quelle riguardanti i veicoli a basso impatto ambientale sono svolte in collaborazione col gruppo energia e ambiente (GEA) del CIRPS (Centro Interuniversitario di Ricerca Per lo Sviluppo sostenibile) con l'unità ENE-TEC dell'ENEA.

Il presente lavoro, sebbene redatto dagli autori indicati, è il risultato di tali collaborazioni e i ricercatori qui citati hanno, in diverse misure, contribuito alle ricerche che hanno consentito di raggiungere i risultati riportati.

Oltre gli autori hanno collaborato: Fernando Ortenzi, che ha contribuito in larga misura allo sviluppo delle strumentazioni e alle campagne di acquisizione; Daniele Stam, che ha contribuito nella fase di elaborazione dati della prima campagna; Andrea Campagna, che ha gestito i rapporti con le aziende di trasporto monitorate; Marco Valerio Salucci, che ha partecipato ad alcune fasi di raccolta dati; Massimo Panella, Antonello Rizzi, Gianluca Grisanti, Francesco Barcellona e Gabriele Allegria che, sebbene non coinvolti direttamente nelle

acquisizioni, hanno reso possibile l'automazione della strumentazione di misura che consente di replicare le acquisizioni con facilità ad altri casi reali. Dal gruppo GEA del CIRPS hanno contribuito Fabio Orecchini, Federico Villatico e Fabrizio Zuccari che, oltre a coordinare il progetto HOST che ha reso possibili le prime acquisizioni di dati, sono i principali artefici delle misure emissive.

I ricercatori dell'ENEA che hanno collaborano a questa ed alle altre ricerche sul veicolo del CTL sono Maurizio Romanazzo, Giovanni Pede, Ennio Rossi, Roberto Ragona e Antonino Genovese che hanno consentito con la loro assistenza e le loro strumentazioni la validazione delle strumentazioni e delle metodologie sviluppate.

20.1 Introduzione

Nell'attuale contesto urbano, ed in particolare in quello romano, diviene sempre più difficile conciliare le esigenze del trasporto di persone e merci con quella di garantire una qualità dell'aria accettabile ed un ragionevole costo energetico. I veicoli convenzionali mossi da motori a combustione interna alimentati a combustibile fossile debbono confrontarsi sia con la necessità di rendere l'ambiente urbano più salubre, sia con quella di ottimizzare e razionalizzare l'uso delle fonti energetiche in vista del maggior risparmio possibile.

L'Agenzia Nazionale Protezione Ambiente (ANPA, ora denominata ISPRA) ha fornito un quadro d'insieme della qualità dell'aria in Italia al dicembre 1999 (Legambiente 2001). Da esso risulta una situazione in via di miglioramento per alcuni inquinanti, mentre ancora critica per altri, soprattutto nei centri cittadini. Le emissioni di biossido di zolfo sono diminuite a partire dagli anni 80 grazie all'introduzione di combustibili desolforati; gli ossidi di azoto (NO_x) presentano, soprattutto nei centri urbani, picchi con superamento dei limiti; il monossido di carbonio (CO), sebbene in diminuzione a partire dal 1995, rimane oltre i limiti nelle medie su otto ore nei centri urbani; le emissioni di composti organici volatili (HC) diversi dal metano (NMHC) risultano in diminuzione a partire dal 1995; le emissioni di anidride carbonica, direttamente correlate al consumo di combustibili fossili, sono in continuo aumento, procedendo in senso opposto rispetto agli accordi internazionali sanciti nel Protocollo di Kyoto. In ogni caso i trasporti stradali rappresentano su scala nazionale la maggior sorgente di ossidi di azoto, monossido di carbonio e di composti organici non metanici, nonché di circa un quarto di delle emissioni complessive di anidride carbonica. Sempre secondo il rapporto di Legambiente, il 30% di NO_x, il 70% di CO, l'80% di NMHC viene emesso all'interno delle aree urbane e di queste percentuali il trasporto delle merci è responsabile rispettivamente del 40%, del 4% e del 6%.

Il trasporto delle merci su gomma non è un problema secondario. Fino ad oggi è stata intrapresa la strada del miglioramento delle tecnologie propulsive già consolidate. Ciò intervenendo sia a monte, e cioè trasferendo, anche sui veicoli

commerciali, i nuovi sistemi di iniezione del gasolio di origine automobilistica con l'intento di ottimizzare la combustione e quindi efficienza energetico-emissiva, sia a valle, montando dispositivi catalitici preposti all'abbattimento delle emissioni. Questo tipo di approccio, sebbene economicamente comprensibile, ha migliorato solo in parte la situazione. Se da un lato le prestazioni energetico-emissive del singolo veicolo sono andate crescendo, è altrettanto vero che l'aumentato tasso di mobilità urbana ne ha attutito gli effetti benefici.

La tecnologia ibrida è vista da molti come una potenziale soluzione a questi problemi (Alessandrini et al. 2001; Kwai et al. 2006; Hosoya et al. 2006; Oogushi 2006; Orecchini et al. 2005; Pede et al. 2006) sia perché offre la possibilità di recuperare parte dell'energia cinetica nelle fasi di rallentamento del veicolo sia perché i motori a combustione interna sono utilizzati a punto fisso (ibrido serie), o comunque con transitori meno severi rispetto alla situazione convenzionale (ibridi parallelo e misti). Attualmente il mercato automobilistico assiste all'introduzione di alcuni modelli dotati di questa tecnologia, che, all'atto pratico, si è dimostrata significativamente migliorativa, soprattutto per le emissioni inquinanti.

Nissan (Kwai et al. 2006) ha recentemente prototipato un veicolo per la distribuzione urbana delle merci di media taglia ibrido parallelo con sistema di accumulazione dell'energia composto da super condensatori per ottenere una maggiore efficienza nel recupero dell'energia di frenatura. Il veicolo pesa a vuoto 4,5 tonnellate ed ha un carico utile di circa 3,5 t. Ha un motore termico da 152 kW ed un elettrico da 55 kW. La scelta di una siffatta soluzione (con solo 55 kW utilizzabili in frenatura recupero e 207 kW in accelerazione) è motivata dal cercare di realizzare un veicolo che in città sia in grado di inquinare poco e recuperare l'energia di frenatura senza però avere preclusi i viaggi extraurbani. Tale soluzione, sebbene interessante, presenta il problema di avere comunque un motore termico molto sovradimensionato per i viaggi urbani che, come si vedrà nel paragrafo 20.4, tende a funzionare poco efficientemente in città.

Sulla stessa linea Isuzu (Oogushi 2006) ha sviluppato, e applicato in un veicolo commerciale analogo a quello Nissan, un sistema ibrido chiamato "Smoother e Autoshift" che, come dice il nome, ha l'unica funzione di addolcire i transitori e fungere da cambio automatico. Nel complesso il motore termico è quello convenzionale mentre il sistema elettrico è in grado di fornire 25 kW in continua e 29 kW di picco.

Anche Hino (Hosoya et al. 2006) ha sviluppato un sistema ibrido per autobus e veicoli commerciali, anch'esso parallelo con 175 kW termici ed un contributo dell'elettrico non dichiarato. Il sistema è poi stato testato solo su un autobus per il trasporto passeggeri.

In Italia Microvet (Pede et al. 2006) ed IVECO (Giorgio Mantovani, 2009) hanno sviluppato ed installano sistemi ibridi di tipo parallelo in furgoni per la distribuzione delle merci, in grado di viaggiare anche in puro elettrico.

Queste esperienze, solo le più recenti in un panorama in cui si studiano e costruiscono ibridi da diverse decine di anni, hanno alcuni fattori in comune: i veicoli derivano tutti dalla produzione di serie, modificati per ospitare un power train ibrido, sono veicoli non pensati per un particolare scopo ma concepiti per essere versatili e, teoricamente, in grado di rivaleggiare con i veicoli convenzionali in tutti i campi, e sono confrontati con i veicoli convenzionali quasi sempre su prove sui cicli di marcia sintetici di omologazione.

Queste considerazioni suggeriscono la necessità di cambiare l'approccio al problema del trasporto urbano delle merci su gomma, e in particolare di invertirlo. Se fino ad oggi si è proceduto scegliendo il veicolo da adoperare tra quelli disponibili in commercio, evidentemente scendendo a compromessi e non portando nessuna innovazione sostanziale, ora si propone una progettazione ad hoc finalizzata alla realizzazione di un veicolo espressamente realizzato per la città. Si tratta di realizzare un mezzo in grado di diminuire significativamente i livelli di consumi energetici ed emissioni necessari allo svolgimento della propria missione, garantendo lo stesso livello prestazionale dei furgoni e camion attuali.

Un esempio di progettazione di veicolo ibrido partendo dalle esigenze della città e non dalle disponibilità di mercato si ha in Alessandrini et. al. (2001) in cui un'auto da città fu dimensionata a partire da cicli di marcia sperimentali e non standard. Tale approccio è stato poi ulteriormente perfezionato nel progetto HOST (Orecchini et al. 2005) in cui misure ad hoc in varie città europee sono state fatte per dimensionare il veicolo sulle reali esigenze di guida (driving needs analysis). HOST propone anche un ulteriore passo in avanti nell'ottica dell'ottimizzazione del trasporto delle merci, prevede che le merci siano portate nel centro urbano via treno nel MUDC (Multimodal Urban Distribution Centre), da cui poi vengano smistate in città tramite un veicolo ecologico per la distribuzione.

Gli obiettivi della ricerca svolta e riassunta in questo capitolo sono quelli di utilizzare tale tecnica di progettazione di veicoli ibridi sia per dimensionare un veicolo di medio-piccole dimensioni (capacità di carico di circa 4 t) per la distribuzione a partire da piattaforme logistiche interne alla città (il power train del progetto HOST appunto), sia per dimensionare un veicolo equivalente per capacità di carico ad un Iveco 120E18 con cui confrontarlo per quantificare i benefici energetico-emissivi conseguibili con l'utilizzo della tecnologia ibrida.

Le campagne di misura sono state tre, le prime due specificamente organizzate (in numerosità, caratteristiche del veicolo monitorato e strumenti di acquisizione) per il progetto HOST, l'altra con l'intento di determinare le emissioni inquinanti in sede reale. Nelle prime due si è adottato un terminale GPS portatile in grado di rilevare automaticamente i cicli di marcia, e successivamente di scaricarli Wi-Fi al rientro in deposito; nella terza campagna di prove, oltre ai dati provenienti dal satellite, si sono anche acquisiti quelli provenienti dalla sensoristica di bordo.

I dati relativi ai cicli di marcia, per il tramite delle specifiche tecniche del veicolo, consentono il calcolo della potenza necessaria alla ruota. La conoscenza di quest'ultima, noti i rendimenti della catena cinematica di trasmissione e del sistema di accumulo delle batterie, consente di dimensionare il power train in tutte le sue componenti, cioè capacità sistema di accumulo, motore a scoppio, motore elettrico (tale metodologia di dimensionamento è già stata presentata in Alessandrini et. al. 2001 ed in Pede et al. 2006). L'ibrido serie, espressamente pensato per soddisfare le prestazioni richieste da HOST, è stato anche confrontato con quello che sarebbe necessario al soddisfacimento delle richieste del servizio svolto dai veicoli di cui si sono valutate le emissioni.

Effettuato il dimensionamento del veicolo, si possono stimare gli eventuali benefici nella realizzazione della propria missione. In effetti è risultato come, in ambito urbano, il concetto di ibrido serie ha le potenzialità di migliorare drasticamente le prestazioni energetiche ed emissive dei veicoli. I motori a gasolio con cui sono equipaggiati i veicoli commerciali sono di norma sovradimensionati per l'utilizzo cittadino, e vengono quindi adoperati in punti di funzionamento sfavorevoli (bassi carichi e numero di giri). Inoltre le fasi di marcia a "stop and go", essendo numerose, incidono in maniera sostanziale sui consumi di combustibile. L'ibrido serie, mantenendo costante il regime di funzionamento del gruppo termico e recuperando l'energia in frenata, riesce a ridurre le emissioni inquinanti ed i consumi in maniera significativa.

Rimane comunque la considerazione che un veicolo veramente efficiente in città non è adatto per i tratti extraurbani e, quindi, per una reale riduzione delle emissioni del sistema di distribuzione urbana della merce si deve pensare ad una sua drastica riorganizzazione.

20.2 I servizi di trasporto analizzati e le campagne di acquisizione

Nell'ambito delle ricerche del CTL, tramite accordi di partnership con operatori logistici operanti nel bacino romano, si sono organizzate delle campagne di monitoraggio dei cicli di marcia effettuati durante le consegne della merce da veicoli commerciali.

La Fresh Food Center SpA, con sede a Santa Palomba, si occupa della grande distribuzione organizzata nel settore agroalimentare romano e dell'Italia centrale. Essa ha due diverse piattaforme logistiche da cui inizia e termina i propri giri di consegna dei prodotti freschi e freschissimi ai supermercati SMA e SIDIS: il nuovo CAR (Centro Agroalimentare Romano) di Guidonia da cui distribuisce prodotti agroalimentari e i magazzini di Santa Palomba per i prodotti ittici.

La Omniologica SpA è un'azienda del gruppo FS, quella che nel gruppo si occupa della penetrazione urbana delle merci col treno. La piattaforma logistica di Roma è allo Scalo San Lorenzo, vicino l'antica "Porta Maggiore" delle mura aureliane. Da lì la merce che arriva con il treno viene distribuita a vari clienti fra cui i grandi magazzini Upim e Rinascente.

20.2.1 La distribuzione dei prodotti ittici Fresh Food Center

La consegna dei prodotti ittici freschi ai supermercati per la loro vendita al dettaglio avviene ogni giorno a partire dalle ore 6. Il pesce arriva ai magazzini tra le 6 e le 12 del giorno prima (fase di RICEZIONE in Fig. 20.1) e fra le 8 e le 17 viene ventilato e preparato in apposite cassette secondo gli ordinativi dei vari supermercati da servire (fase di PREPARAZIONE in Fig. 20.1). La mattina della consegna il carico dei veicoli viene effettuato (fase di CARICO in Fig. 20.1) fra le 4 e le 6.



Fig. 20.1 - Orari della gestione dei prodotti ittici

I primi camion lasciano la piattaforma logistica già alle 5, gli ultimi alle 6. La durata complessiva dei giri è in media di 4,5 ore, con rientro alla piattaforma tra le 9:30 e le 10:00. Di queste 4,5 ore di giro, circa 2,5 sono passate in marcia e 2 in sosta per scarico della merce o in attesa. Ogni veicolo serve ogni giorno 4 punti vendita in media.

20.2.2 La distribuzione di frutta e verdura Fresh Food Center

La merce, che in questo servizio parte dal Centro Agroalimentare Romano, è della categoria “prodotti freschi”, ossia ortofrutticoli e da banco frigo, che devono essere mantenuti alla temperatura di 4-5 °C sia in fase di stoccaggio che di trasporto. Sebbene ciascuna giornata sia diversa dalle altre, più che nel servizio prodotti ittici, si possono individuare delle caratteristiche comuni, oltre al punto di partenza, che sono:

- orario di partenza intorno alle ore 14:00;
- orario di rientro in piattaforma alle ore 17:30;
- tempo di marcia effettivo giornaliero circa 3 ore;
- tempo di scarico merci effettivo giornaliero circa 1 ora;
- numero di consegne giornalieri pari a circa 4;
- destinazione prevalentemente extraurbana della merce (litorale di Ostia, Comuni di Fiumicino, Marino, Velletri, Ciampino).

20.2.3 Il servizio di distribuzione merci a Roma di Omnialogistica

Le merci trattate dalla Omnialogistica sono: acqua minerale, carta e derivati, succhi di frutta e alimentari conservati, mix prodotti “no food” per la grande distribuzione e cemento.

Al contrario degli altri due servizi, che trattando generi alimentari freschi hanno una cadenza giornaliera ed una certa regolarità nelle consegne e negli orari, i prodotti distribuiti a Roma dalla Omnialogistica sono consegnati ai punti vendita su richiesta del cliente, qualora la merce sia già nei magazzini presso la piattaforma logistica, o al momento dell'arrivo a Roma della merce col treno.

La merce viene consegnata su richiesta (e quindi non con cadenza prestabilita) in punti abituali di consegna urbani e non; dallo Scalo San Lorenzo partono a volte anche camion destinati fuori dal Lazio.

20.3 Le campagne di acquisizione dati

Le prime acquisizioni sono state fatte fra primavera ed estate del 2005 per il progetto europeo HOST, che ha costruito il prototipo di un veicolo ibrido serie multi utilizzo con cabine intercambiabili. Il veicolo può distribuire le merci, effettuare la raccolta dei rifiuti, effettuare servizio di taxi collettivo e di car-sharing. Tali acquisizioni erano specificamente mirate a dimensionare il power train del veicolo ibrido.

Una seconda fase di campagne di misura è stata effettuata tra maggio e giugno 2006 per quantificare il reale impatto ambientale che la distribuzione delle merci ha su Roma.

Le due campagne, sebbene simili nelle modalità di esecuzione, presentano delle differenze sia negli scopi che negli strumenti utilizzati e richiedono che siano discusse separatamente.

Le campagne di misura per HOST sono state effettuate per dimensionare un veicolo per la distribuzione urbana più piccolo di quelli attualmente usati e quindi si sono raccolti i cicli di marcia dei veicoli odierni e sulla base di questi si è effettuato un dimensionamento del power train.

La campagna per la misura delle emissioni invece aveva lo scopo di quantificare le emissioni prodotte dai veicoli odierni e di quantificare i benefici ambientali derivanti dall'adozione di veicoli ibridi al posto dei convenzionali; ovviamente perché i due dati fossero comparabili i veicoli dovevano avere stesse dimensioni e stesse portate utili.

20.3.1 *Le campagne per HOST*

In totale nelle campagne di acquisizione per il progetto HOST sono stati monitorati 34 giri per quasi 150 ore di funzionamento e 3.000 chilometri. Di questi, 20 giri si sono, almeno in parte, svolti in città per un totale di quasi 100 ore e 1.300 chilometri in città.

Tali campagne, condotte per dimensionare il power train di HOST nel servizio di distribuzione urbana delle merci, si sono svolte tra primavera ed estate del 2005.

Tutti e tre i servizi di distribuzione delle merci, di entrambi gli operatori logistici con cui si sono stabiliti rapporti di partenariato, sono stati oggetto di queste campagne di acquisizione.

Lo strumento utilizzato per le analisi è stato un terminale mobile di tipo *automotive* collegato con un GPS, che, attivandosi all'accensione del mezzo, raccoglie secondo per secondo posizione e velocità del veicolo. Il terminale mobile è concepito per trasmettere automaticamente, al rientro in deposito, i dati acquisiti nella giornata tramite un collegamento Wi-Fi oppure, in assenza di collegamento Wi-Fi, per immagazzinare i dati per diversi giorni finché questi non vengano scaricati manualmente.

In alternativa al sistema di raccolta automatizzata, preferibile perché non è necessario impiegare specifica forza lavoro nella raccolta dei dati ma anche perché l'autista tende ad ignorare di essere monitorato e non altera il suo comportamento, si è adottato anche un sistema manuale in cui il software di raccolta dati girava su un PC portatile.

Dei tre servizi monitorati la distribuzione dei prodotti ittici FFC è stata monitorata col sistema automatico mentre gli altri due servizi, per problemi tecnici sui terminali, sono stati monitorati da una persona presente sul camion per raccogliere i dati in ognuno dei giri.

I veicoli su cui si sono effettuate le acquisizioni sono sei, quattro Iveco Eurocargo (120E21, 120E18, 100E18 e 80E18) e due Mercedes un 814 e un 817.

20.3.2 *La campagna per la misura delle emissioni*

Gli strumenti impiegati per la seconda campagna di acquisizione sono ben più complessi.

La strumentazione di bordo è un'evoluzione di quella descritta in Alessandrini et al. (2006) in cui il veicolo fornisce in tempo reale (tramite la presa di diagnosi OBD - On Board Diagnostic) i valori istantanei dei sensori che regolano il funzionamento del veicolo e dei suoi apparati di bordo. La differenza principale fra la strumentazione qui impiegata e quella di cui Alessandrini et al. (2006) è il sistema di comunicazione interno del veicolo, che in questo caso è di tipo CAN (Controller Area Network).

Fra i parametri che tale strumentazione è in grado di acquisire, quelli di maggiore interesse per questo studio sono: la velocità, la coppia istantanea che il guidatore richiede al veicolo, il carico (che corrisponde alla percentuale di coppia erogata rispetto ad un valore di riferimento a quel numero di giri), la velocità angolare del motore, la portata d'aria in aspirazione ed il consumo istantaneo di combustibile. Questi 6 parametri, oltre a consentire il calcolo di diversi indicatori energetici, come il rendimento istantaneo e medio del veicolo, del solo motore e del solo sistema di trazione, nonché i consumi istantanei e medi, consentono anche di calcolare in tempo reale le emissioni prodotte.

L'effettuazione di misure in tempo reale delle emissioni di un veicolo in esercizio (Alessandrini, Persia 2000 e 2001) è normalmente fatta con strumentazioni portatili che spillano parte dei gas di scarico dallo scappamento e li analizzano per misurare la concentrazione delle diverse specie inquinanti. Misurando poi la portata dei fumi allo scarico si risale alle portate in volume e massa dei vari inquinanti emessi.

Tali strumentazioni, il CTL utilizza la Horiba OBS-1300, sono ingombranti e pesanti, riducono la capacità di carico utile del veicolo, richiedono la continua presenza di un operatore a bordo per intervenire con una ricalibrazione quando necessario e costringono a soste non richieste o a missioni più corte per ricalibrare. D'altro canto, precedenti studi del CTL hanno mostrato come i motori diesel di ultima generazione abbiano emissioni proporzionali al carico ed in minima parte al numero di giri.

Per quantificare le emissioni istantanee e medie dei veicoli monitorati sono quindi state realizzate prove preliminari col veicolo equipaggiato con Horiba con cui si è caratterizzato il comportamento emissivo dello stesso. In particolare si sono calibrate le relazioni che legano le concentrazioni delle specie inquinanti emesse ai valori istantanei di carico, numero di giri, quantità di combustibile iniettato e portata d'aria in aspirazione letti dalla linea CAN; quindi acquisendo tali parametri in tempo reale si sono calcolate le emissioni istantanee.

Per ridurre il numero delle prove preliminari necessarie sono stati monitorati solo i due servizi della Fresh Food Center, entrambi eserciti con un veicolo Eurocarga 120E18.

La campagna di acquisizione con partenza dal CAR si è svolta nel periodo compreso tra il 9 ed il 15 maggio del 2006, ed ha riguardato cinque giorni effettivi di consegne.

La campagna di acquisizione con partenza dal comprensorio industriale di Santa Palomba si è svolta nel periodo compreso tra il 6 giugno 2006 ed il 23 giugno 2006, ed ha riguardato cinque giorni effettivi di consegne.

Nelle due settimane si sono percorsi complessivamente oltre 1000 km per circa 30 ore di marcia ed altrettante di soste per carico e scarico.

20.4 Valutazione logistico-energetico-emissiva dei veicoli odierni

L'analisi dei dati acquisiti nelle due campagne poteva essere fatta aggregando i dati per servizio, per veicolo, o per giro di consegna. Tuttavia, sebbene la grande maggioranza dei giri di consegna monitorati in ognuna delle campagne di acquisizione abbia tratti sia urbani che extraurbani, si è ritenuto più utile, nell'ottica di dimensionare veicoli ibridi per la distribuzione delle merci, suddividere l'analisi in tratti urbani ed extraurbani. In pratica tutte le volte che il veicolo in ogni parte del suo giro entrava all'interno del Grande Raccordo Anulare (l'anello autostradale che circonda Roma) si considerava la porzione di percorso come urbana altrimenti extraurbana.

Tale distinzione consente di scindere il comportamento energetico emissivo del veicolo riscontrato in ambito urbano da quello riscontrato in ambito extraurbano. Ad oggi, per come sono organizzati i servizi (erogati sia in città che fuori), un veicolo ibrido in grado di muoversi esclusivamente in uno dei due ambiti non sarebbe utilizzabile.

Tuttavia, per diminuire l'impatto della distribuzione delle merci, oltre a studiare nuovi veicoli, si deve pensare ad una riorganizzazione che separi nettamente i due ambiti, in modo da utilizzare veicoli più idonei al contesto.

Esistono sensibili differenze tra i percorsi in ambito urbano e quelli percorsi in ambito extraurbano in termini di prestazioni "logistiche" dei veicoli ma anche energetico-emissive.

L'utilizzazione del veicolo nel caso extraurbano evidenzia un tempo trascorso sulla strada rispetto a quello disponibile pari al 72-80%, con tempi di sosta nei punti di scarico inferiori ad un'ora al giorno; nel caso urbano questi valori diventano rispettivamente del 55-65% e di quasi due ore al giorno. Ciò a causa di una gestione non ottimale delle piattaforme di movimentazione delle merci presso le destinazioni urbane.

Molto spesso in città è stato necessario attendere che i parcheggi adibiti allo scarico dei prodotti si liberassero perché occupati da auto in divieto di sosta o da altri camion in ritardo sulla loro tabella di marcia.

Naturalmente l'efficientamento energetico della distribuzione urbana delle merci non può prescindere dall'affrontare anche questi problemi.

I servizi di trasporto monitorati hanno prodotto 171 kWh di lavoro utile su 810 kWh complessivamente erogati dal motore, quindi circa il 21% dell'energia meccanica prodotta è effettivamente servita alla movimentazione delle merci.

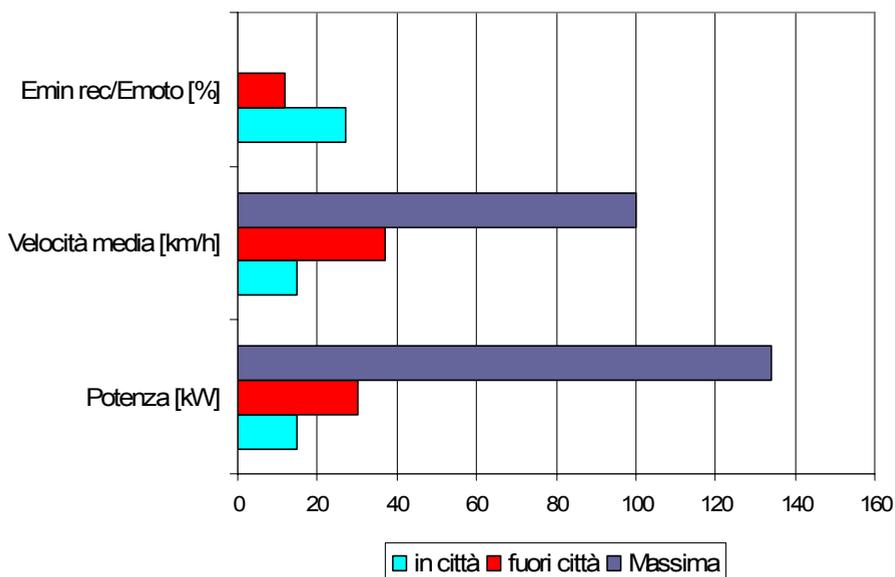


Fig. 20.3 - Confronto urbano-extraurbano riguardo l'energia media recuperabile in fase di rallentamento o frenatura, le velocità medie e le potenze medie

Le potenze medie dei percorsi urbani risultano relativamente basse rispetto a quelli extraurbani e si aggirano sui 10-20 kW contro i 30-35 kW (barre in basso di Fig. 20.3); analogamente le velocità medie si aggirano sui 15 km/h contro 35 km/h; i consumi scendono da 3,5 km/litro (urbano) a 5,2 km/litro (extraurbano).

Nel confronto grafico urbano-extraurbano di Fig. 20.3 emerge anche (barre dall'alto) come l'energia recuperabile nelle fasi di frenatura supera il 20% in città mentre fuori si attesta sul 15%.

Il confronto di consumi ed emissioni è sintetizzato dalla Fig. 20.4. In particolare le emissioni di NO_x , che sono le emissioni di maggior rilievo per veicoli diesel di grande cilindrata, si attestano oltre i 23 g/km in città contro i 6 g/km fuori e, per quanto concerne la misura in g/kWh, che è quella di riferimento per la normativa europea per questo tipo di veicoli, i valori si attestano, per questo veicolo omologato Euro 2, a 18 g/kWh in città ed a 7 g/kWh, coincidente col valore limite Euro 2, fuori.

Le ragioni del peggioramento di tutti i parametri di monitoraggio dentro la città sono dovuti al funzionamento del motore in zone coppia-numero di giri lontane da quelle ottimali.

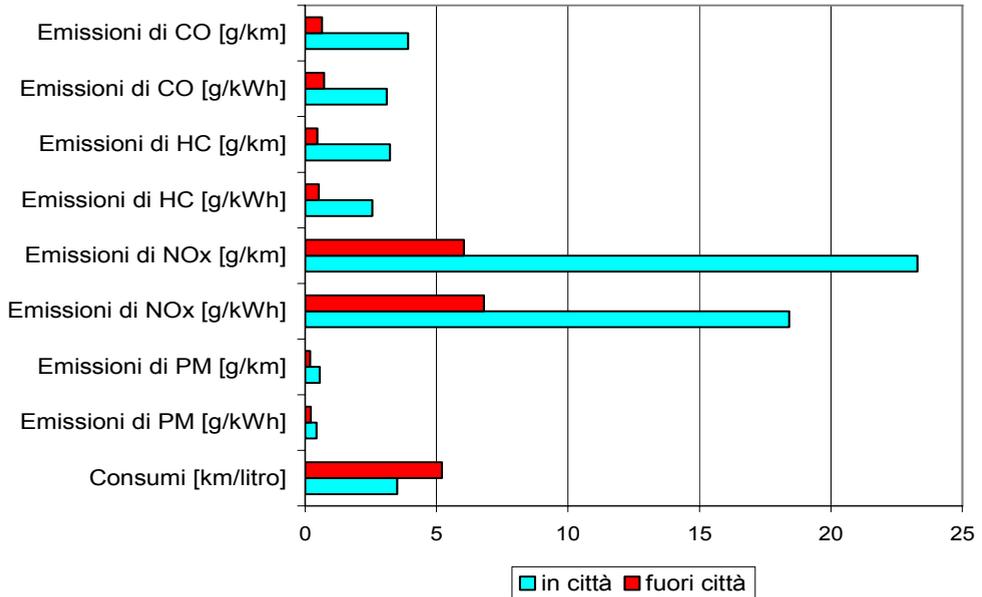


Fig. 20.4 - Confronto urbano-extraurbano riguardo le emissioni specifiche in g/kWh ed in g/km ed i consumi in km/litro

Nella Fig. 20.5 sono presentati i punti di funzionamento coppia-numero di giri in un percorso extraurbano. Si constata una distribuzione dei punti di funzionamento con concentrazione prevalentemente nella zona in alto a destra del grafico. Si vede inoltre una zona di funzionamento a giri costanti, circa 2400 giri/minuto, determinata dal mantenimento, per un certo periodo di tempo, di velocità costante.

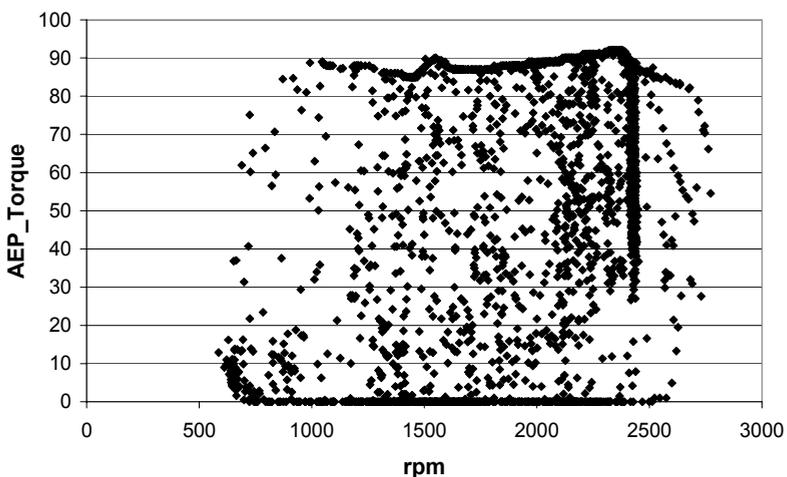


Fig. 20.5 - Punti di funzionamento coppia-numero di giri di un percorso extraurbano

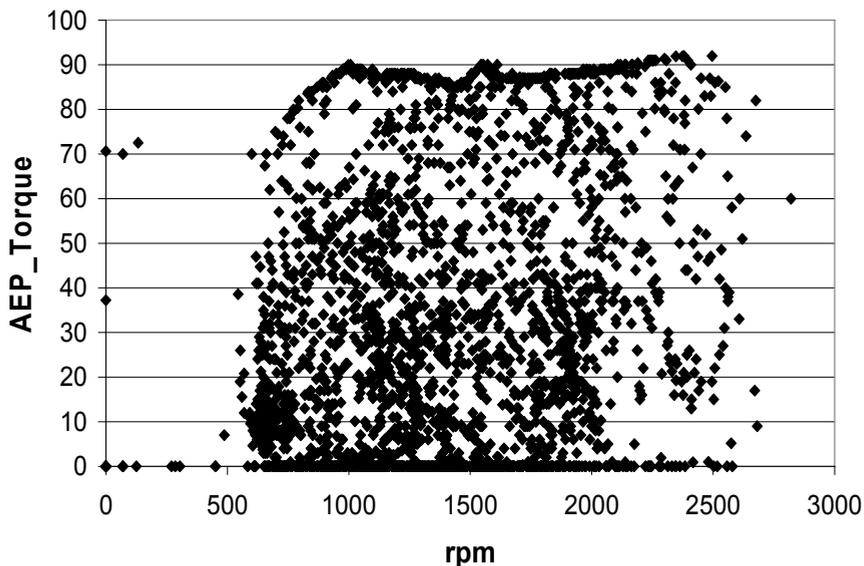


Fig. 20.6 - Punti di funzionamento coppia-numero di giri di un percorso urbano

Ciò significa uno sfruttamento migliore delle prestazioni del motore, e conseguentemente un aumento della potenza media erogata ed una diminuzione delle fasi di accelerazione, e, come si è visto, maggiori percorrenze chilometriche con un litro di combustibile associate a minori emissioni specifiche sia in g/kWh, che in g/km.

Nella Fig. 20.6 sono presentati i punti di funzionamento coppia-numero di giri in un percorso urbano. Si constata una distribuzione dei punti di funzionamento con concentrazione prevalentemente nella zona in basso a sinistra del grafico. Non ci sono zone di funzionamento a numero di giri, e quindi velocità, costanti. Ciò implica condizioni di marcia fortemente variabili e frequenti “stop and go”. Questo causa uno sfruttamento delle prestazioni del motore non ottimale, e conseguentemente una diminuzione della potenza media erogata, un aumento delle fasi di accelerazione, e, come si è visto, minori percorrenze chilometriche con un litro di combustibile, associate a maggiori emissioni specifiche sia in g/kWh, che in g/km.

Un veicolo che presenti una buona efficienza complessiva in ambito extraurbano, non può funzionare altrettanto bene dentro la città. Per questo si deve considerare la possibilità di diversificare la flotta di veicoli in base al contesto in cui essi verranno usati. All'interno del GRA un veicolo come l'Eurocargo 120E18 non solo è penalizzato dagli ingombri, sia nella marcia normale che nelle manovre per parcheggiare in fase di scarico merci, ma risulta sovradimensionato come potenza erogata e carico trasportabile.

20.5 Dimensionamento di veicoli ibridi per la distribuzione delle merci

Come già evidenziato nel precedente paragrafo il dimensionamento di un veicolo ecologico per la distribuzione della merce non può prescindere da una riorganizzazione del sistema di distribuzione in modo che le consegne urbane vengano effettuate a partire da piattaforme urbane e quelle extraurbane da piattaforme extraurbane.

Il concetto è che la penetrazione urbana, da una piattaforma esterna ad una interna alla città, avvenga via treno (Fig. 20.7) in cui il carico è già organizzato per la distribuzione in piccole unità mobili (contenitori lunghi quanto metà dei container standard). La piattaforma urbana o MUDC (Multimodal Urban Distribution Centre) deve essere, per limitare i costi della doppia rottura di carico, gestita in maniera ottimizzata e con funzioni di transhipment (il passaggio delle unità mobili dal treno ai camioncini e viceversa) automatizzate.

Il progetto HOST (Orecchini et al. 2005) sta appunto sviluppando un power train ibrido idoneo per questo concetto.

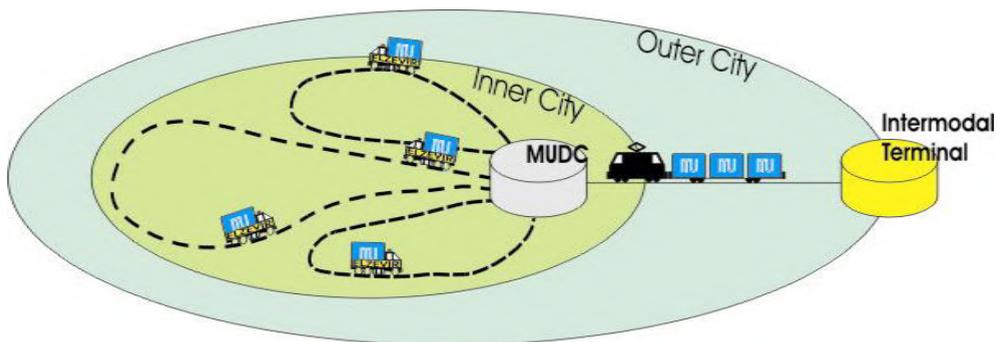


Fig. 20.7 - La distribuzione multimodale urbana delle merci

(fonte: progetto HOST- Orecchini et al. 2005)

20.5.1 Veicoli per la distribuzione urbana delle merci

La metodologia per il dimensionamento di veicoli ibridi serie è stata qui applicata in tre diversi modi. Dapprima si sono utilizzati i dati acquisiti in entrambe le campagne per dimensionare il power train di un veicolo concepito per rispondere allo scenario MUDC, in cui i veicoli sono piccoli (portata massima 4 tonnellate e spazio nell'unità di carico per 6 euro-pallet standard).

Quindi per avere un veicolo comparabile con l'Eurocargo 120E18 di cui si sono quantificate le emissioni ed i consumi nel precedente paragrafo, si è dimensionato il sistema ibrido per un veicolo con analoghe dimensioni (7 metri di lunghezza) e payload (7,5 tonnellate utili di carico) in due modi, per tempi ordinari e per tempi minimizzati.

Il dimensionamento del sistema di generazione e della capacità del sistema di accumulo è infatti diverso a seconda che il sistema della distribuzione sia migliorato in modo da accorciare le soste che, per motivi di congestione e parcheggio illegale (come detto nel precedente paragrafo), sono più lunghe in città.

Ne risultano tre diversi dimensionamenti realizzabili in funzione di quanto profondamente si possa incidere sulla riorganizzazione del sistema di distribuzione.

Veicoli leggeri

I tre sottosistemi da dimensionare per progettare il sistema di trazione di un ibrido serie sono: il gruppo moto-generatore, i motori di trazione (in frenatura ed in trazione) e l'accumulo elettrico.

La metodologia qui adottata si basa sulla determinazione dei valori medi di potenza del gruppo moto-generatore e del sistema di accumulo di ogni missione e sui valori massimi di potenze di trazione e frenatura e seleziona quei valori che nel 95% dei casi rispondono allo scopo.

La Fig. 20.8 mostra come per i veicoli leggeri già una potenza del gruppo moto-generatore di 9 kW è più che sufficiente a garantire che un veicolo leggero possa espletare tutte le sue missioni urbane e circa il 60% anche di quelle combinate.

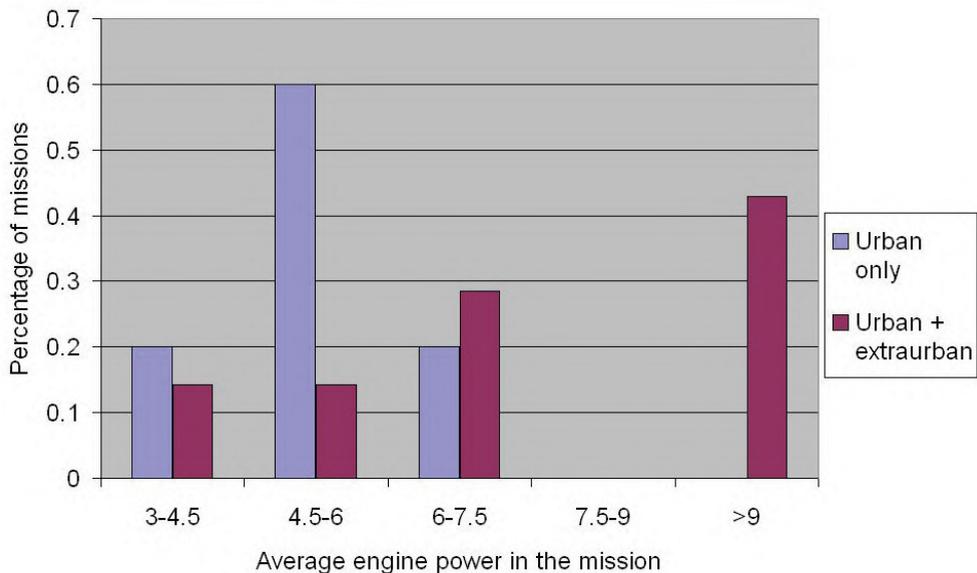


Fig. 20.8 - Distribuzione percentuale delle potenze medie del gruppo moto-generatore necessarie nelle missioni in itinerari esclusivamente urbani o misti per veicoli "leggeri"
(fonte: Pede et al. 2006)

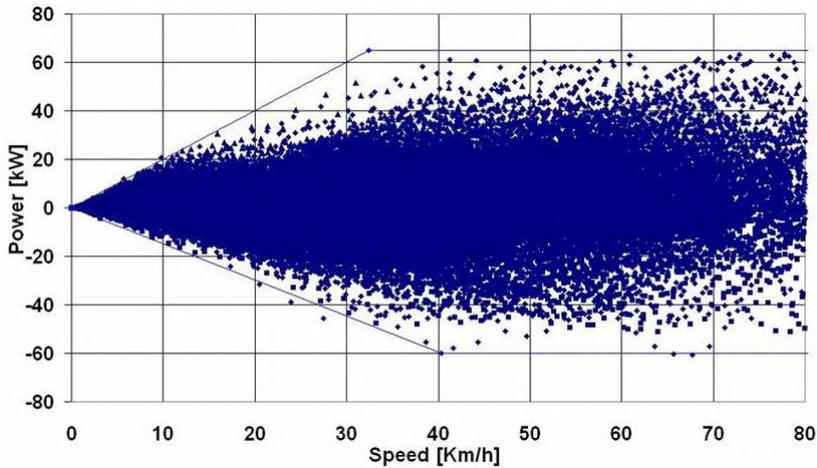


Fig. 20.9 - Valori di potenza alle ruote in trazione e frenatura per veicoli leggeri in sede urbana esclusi il 5% di valori estremi (fonte: Pede et al. 2006)

La Fig. 20.9 mette in risalto come, eliminando il 5% più gravoso degli istanti misurati, quelli in cui le potenze di trazione o frenatura siano sporadicamente molto elevate, si ottengono delle caratteristiche meccaniche da fornire ai motori di trazione simili a quelle teoriche, a coppia costante per velocità inferiore ai 35-40 km/h e a potenza costante da quei punti fino a velocità massima. Tra l'altro, con soli 66 kW alle ruote (potenza massima) è possibile effettuare il servizio di distribuzione con i veicoli ibridi leggeri.

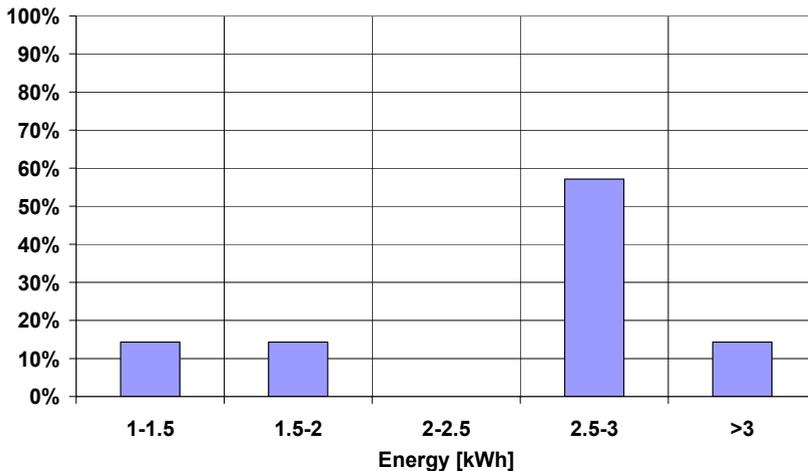


Fig. 20.10 - Distribuzione percentuale delle capacità energetiche del sistema di accumulo minime necessarie nelle missioni in itinerari esclusivamente urbani per veicoli "leggeri" con gruppo moto-generatore da 9 kW (fonte: Pede et al. 2006)

L'ultima caratteristica necessaria per dimensionare il sistema di trazione ibrido è la capacità del sistema di accumulo. Per garantire il solo effetto di volano energetico il sistema di accumulo, con 9 kW di potenza del gruppo moto-generatore, può essere limitato a poco più di 3 kWh per includere il 95% delle missioni come mostrato in Fig. 20.10. Poiché il Δ di potenza da fornire è 57 kW (66-9 kW), ne risulta un valore P/E pari a 6,3, caratteristico delle "batterie di potenza".

Veicoli pesanti per distribuzione con tempi di sosta minimizzati

Utilizzando veicoli più pesanti, uguali per dimensione e carico pagante al benchmark l'Eurocargo 120E18, e riorganizzando i giri di distribuzione in modo da minimizzare i tempi di sosta, le potenze medie necessarie al veicolo triplicano. Per soddisfare il 100% delle missioni solo urbane, come mostrato graficamente dalla Fig. 20.11, basta utilizzare un gruppo moto-generatore da 25 kW.

Tra l'altro è interessante notare, confrontando la Fig. 20.11 con la Fig. 20.8, come mentre con veicoli più piccoli vi era una sovrapposizione del range delle potenze medie richieste da missioni urbane e missioni miste urbane-extraurbane, con maggiori pesi in gioco le missioni extraurbane richiedono potenze medie anche doppie di quelle urbane.

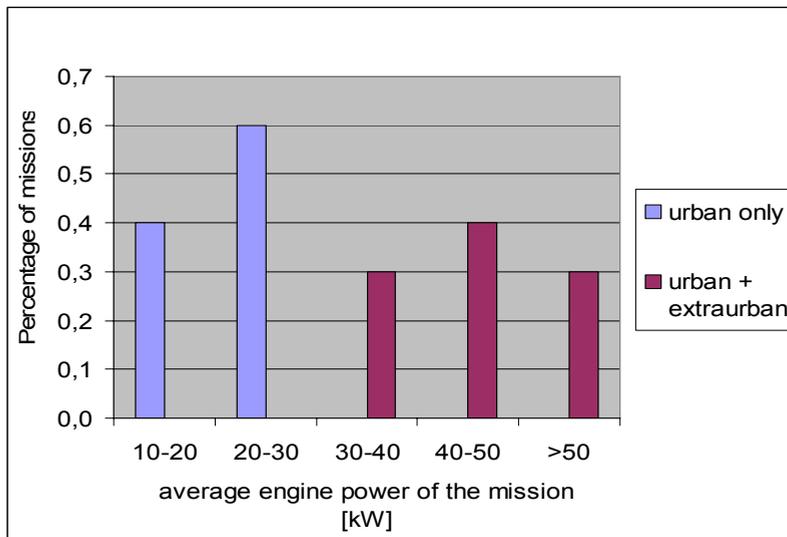


Fig. 20.11 - Distribuzione percentuale delle potenze medie necessarie del gruppo generatore nelle missioni in itinerari esclusivamente urbani o misti per veicoli "pesanti" e soste razionalizzate

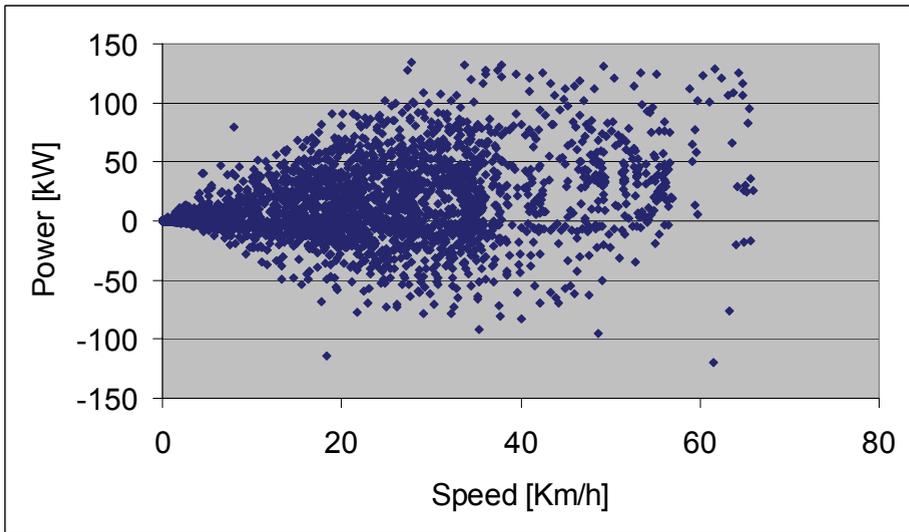


Fig. 20.12 - Valori di potenza alle ruote in trazione e frenatura per veicoli “pesanti” e soste razionalizzate in sede

La Fig. 20.12, che, come precedentemente la 20.9, riporta i valori istantanei di potenza misurati alle varie velocità necessaria per determinare quale sia la caratteristica meccanica che i motori di trazione e frenatura debbano avere, non è, contrariamente alla Fig. 20.9, epurata del 5% di valori estremi.

La Fig. 20.12 mette in risalto che la caratteristica meccanica teorica a coppia costante (fino ai 20 km/h) è ancora possibile a patto di eliminare alcuni punti sporadici che rappresentano dei comportamenti eccezionali dei guidatori. Dai 20 km/h in poi, quando la caratteristica meccanica diventa a potenza costante, è possibile limitare la potenza ai 100 kW eliminando alcuni punti (circa il 5%) che si inseriscono tra i 10 ed i 150 kW.

La Fig. 20.13 mostra che 2 kWh di capacità del sistema di accumulo sono sufficienti per la totalità delle missioni. Comparando tale Figura con la Fig. 20.10, che evidenziava come fossero necessari più di 3 kWh per garantire di effettuare la totalità delle missioni di un veicolo più leggero, si mette in risalto un’importante conclusione: più il veicolo è leggero e maggiore è il rapporto tra la potenza elettrica e quella termica installate a bordo.

In altre parole con veicoli più leggeri è possibile (in proporzione) avere gruppi generatori più piccoli affidandosi a maggiori capacità del sistema di accumulo mentre per veicoli più pesanti, specialmente riducendo i tempi di sosta, è necessario avere gruppi generatori più potenti diminuendo la capacità energetica del sistema di accumulo. In termini di rapporto P/E richiesto all’accumulo elettrico, si passa quindi al campo delle “batterie di potenza” a quello dei supercondensatori. Nel caso di Fig. 20.13, infatti, il rapporto P/E vale 32,5.

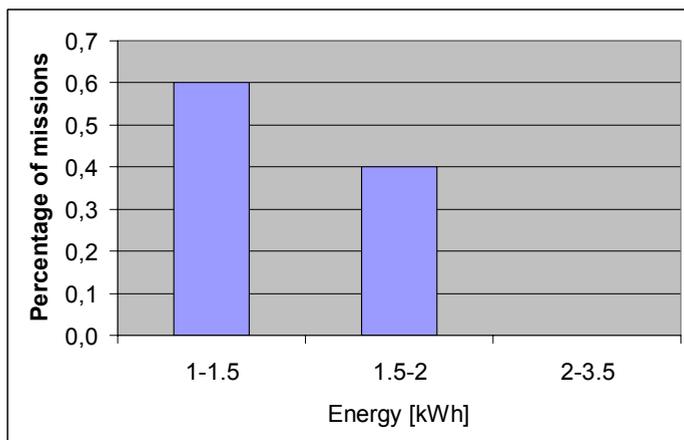


Fig. 20.13 - Distribuzione percentuale delle capacità energetiche del sistema di accumulo minime necessarie nelle missioni in itinerari esclusivamente urbani per veicoli "pesanti" e soste razionalizzate in sede con gruppo moto-generatore da 25 kW

Un ibrido siffatto è stato poi confrontato con il suo benchmark, il convenzionale Eurocargo 120E18, sia per quanto riguarda i consumi che per le emissioni.

La Fig. 20.14 raffigura i risultati di questo confronto. La prima cosa che si nota è come l'ibrido riesca, a parità di tecnologia motoristica, Euro 2, a ridurre di un fattore 3 le emissioni di NOx che sono il tallone di Achille di questi veicoli quando usati in città. Le altre tre emissioni monitorate diventano poi pressoché trascurabili.

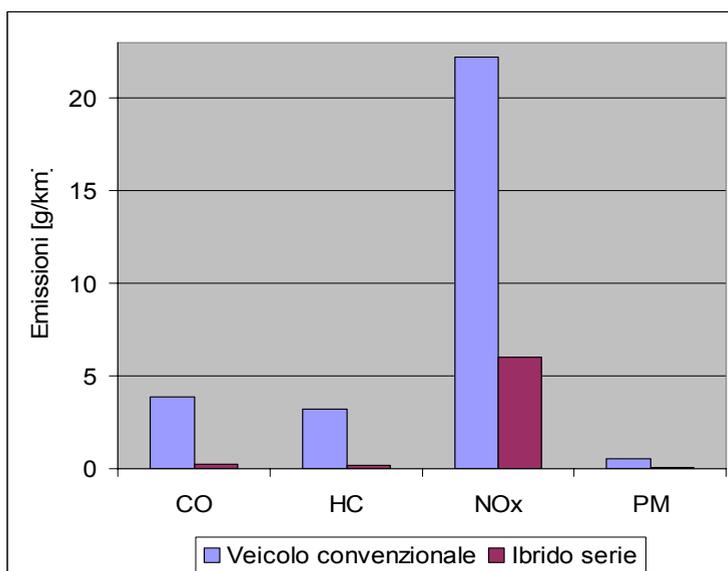


Fig. 20.14 - Confronto di emissioni per veicolo convenzionale e ibrido di uguale capacità

Veicoli pesanti per distribuzione con tempi di sosta odierni

Reinserendo nei percorsi del veicolo pesante anche gli attuali tempi di sosta “inutili” in cui tuttavia il gruppo moto-generatore può restare in funzione diminuendo così la sua potenza a scapito di un aumento della capacità energetica del sistema di accumulo, il dimensionamento del veicolo si trasforma come in Fig. 20.15.

La potenza del gruppo moto-generatore scende dai 25 kW ai 12,5 kW mentre la capacità del sistema di accumulo nella sua funzione di volano energetico (secondo gruppo di colonne nella Fig. 20.15) sale dai 2 ai 4 kWh. Infine si è calcolata la capacità di un sistema di accumulo necessaria per rendere il veicolo “puro elettrico” (PE) che, essendo uguale nei due casi, supera i 10 kWh.

In pratica un veicolo ibrido per un sistema di distribuzione della merce meno efficiente, vale a dire in cui il veicolo è costretto a delle lunghe inutili soste frutto di congestione e disorganizzazione, può, a parità di carico e di dimensioni, avere un minor rapporto tra la potenza del termico e quella di trazione, e cioè un grado di ibridizzazione minore.

È sorprendente notare tuttavia, come a parità di tecnologia motoristica, aumentare il rapporto tra la potenza elettrica e quella termica reimmettendo le soste inutili non porti ad alcun beneficio di carattere ambientale.

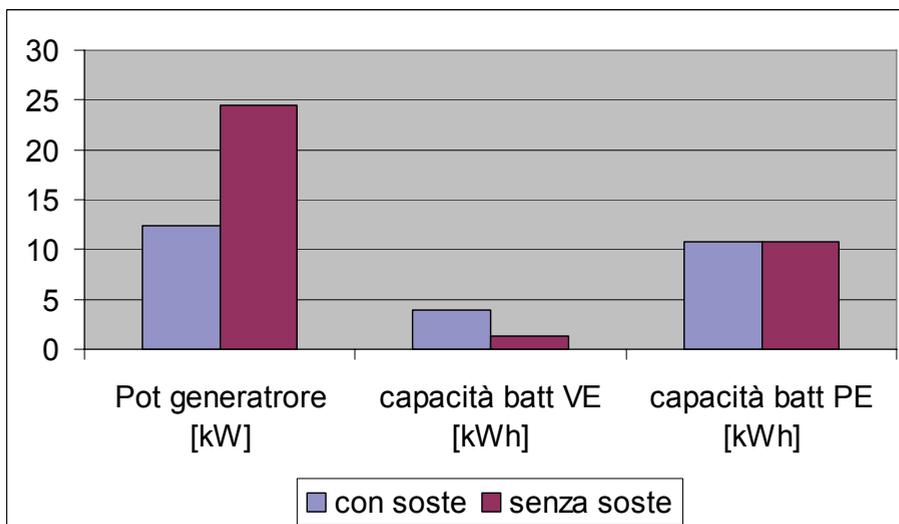


Fig. 20.15 - Dimensionamento del veicolo ibrido “pesante” reinserendo le soste

Infatti la Fig. 20.16 mostra che, comparando le emissioni dei due ibridi, in realtà queste risultano molto simili con una leggera prevalenza del veicolo con grado di ibridizzazione minore. Ciò si giustifica osservando che, a causa dei rendimenti di carica e scarica delle batterie, l'energia necessaria a compiere il ciclo di marcia è superiore nel caso di soste prolungate, proprio perché le batterie sono adoperate in maniera più consistente. Poiché le emissioni sono proporzionali a tale energia, si spiega l'apparente contraddizione.

In particolare le emissioni di ossidi di azoto riaumentano, sia pur leggermente, diminuendo il grado di ibridazione mentre le altre restano grosso modo costanti con un'impercettibile tendenza al rialzo. Tutto questo, però nell'ipotesi che l'ibrido sia "charge sustaining", e cioè che non venga utilizzata la ricarica da rete (plug-in), che ribalterebbe il risultato, a favore del mezzo con batterie più capaci e termico più piccolo.

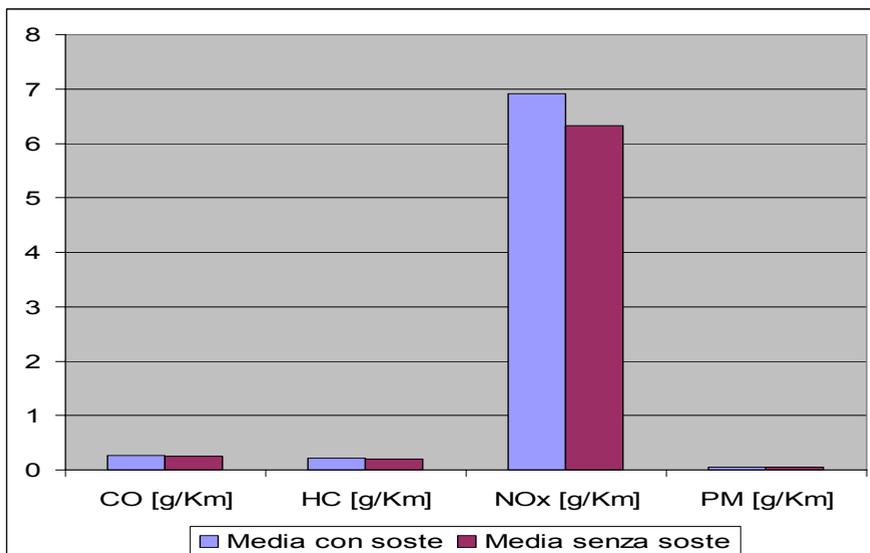


Fig. 20.16 - Confronto di emissioni per veicoli ibridi a diverso grado di ibridazione

Veicoli per giri di consegna extra-urbani

L'idea di utilizzare un veicolo ibrido serie per i giri di consegna extraurbani è da scartare. La potenza del gruppo moto-generatore da installare sarebbe (si veda la precedente Fig. 20.11) superiore ai 50 kW con una variabilità talmente elevata da non consentire di gestire il motore in modo da fargli erogare in ogni missione una potenza costante.

D'altro canto, come già evidenziato commentando la Fig. 20.4, gli attuali veicoli diesel se usati fuori città rispettano le normative per cui sono omologati e hanno una buona efficienza energetica (percorrono oltre 5 km con un litro di

gasolio) che sarebbe difficilmente raggiungibile con un qualsiasi veicolo ibrido serie.

L'unico motivo per voler applicare la tecnologia ibrida ai veicoli per la distribuzione extraurbana delle merci è la disponibilità, si veda la Fig. 20.3, di un 15% di energia da recuperare.

Tale recupero potrebbe essere fatto con un ibrido di tipo parallelo in cui il motore elettrico interviene in assistenza solo in aiuto al motore termico e può intervenire in fase di frenatura per recuperare l'energia.

Tuttavia dimensionare efficacemente un tale ibrido non è cosa facile perché il motore elettrico, come anche il sistema di accumulo, dovrebbero raggiungere i 200 kW di potenze di picco per poter immagazzinare efficacemente l'energia prodotta nelle fasi di frenatura ad alta velocità mentre in fase di assistenza il motore elettrico dovrebbe avere non più di 25-30 kW per aiutare il motore termico nelle fasi di accelerazione.

I veicoli allo stato dell'arte sono già efficienti nella distribuzione extraurbana delle merci, quindi sarebbe sufficiente riorganizzare la catena logistica in modo da separare nettamente la parte urbana della distribuzione da quella extraurbana, lasciando ai veicoli convenzionali il compito della distribuzione extraurbana e dimensionando ibridi per la sola distribuzione urbana.

20.6 Conclusioni e futuri sviluppi

Il capitolo ha riportato le attività di ricerca svolte al fine sia di dimensionare il power train di un veicolo ecologico per il trasporto urbano delle merci, sia di valutare le emissioni inquinanti prodotte dai mezzi attuali in sede reale, confrontandole con quelle ottenibili da un veicolo innovativo. Il lavoro è stato suddiviso in una fase sperimentale di raccolta dati, in una fase di elaborazione, in una di dimensionamento del veicolo per il progetto HOST (Orecchini et al. 2005), e in una fase di confronto dei risultati ottenuti.

Sono state effettuate tre campagne di acquisizione su veicoli adibiti alla consegna delle merci in sede reale nell'ambito del Comune di Roma. Le prime due hanno avuto come scopo primario quello di raccogliere cicli di marcia dei veicoli commerciali in numero statisticamente significativo per il progetto HOST. La terza ha riguardato principalmente la misura delle emissioni dei veicoli convenzionali, ed anche la raccolta dei cicli di marcia relativi a veicoli diversi (più grandi) rispetto a quelli previsti da HOST.

Le emissioni dei veicoli sono state valutate per mezzo dei dati provenienti dalla centralina di bordo e di dati estrapolati da prove specifiche.

Sono stati dimensionati tre veicoli del tipo ibrido serie, concettualmente simili, ma capaci di fornire prestazioni diverse. Il primo (portata massima di 4 tonnellate e spazio per 6 euro-pallet standard) espressamente realizzato per il progetto HOST; gli altri (payload massimo di 7,5 tonnellate) concepiti come

termine di paragone tra un veicolo convenzionale con carico utile di 7,5 tonnellate di cui sono note le emissioni in sede reale, e due ibridi serie di cui sono state valutate le emissioni a parità di prestazioni fornite.

La differenza tra questi ultimi risiede nella rimozione o meno, in fase di dimensionamento, dell'ipotesi di utilizzo dei tempi di sosta per ricaricare le batterie.

Dalle analisi svolte risulta chiaro come i veicoli a gasolio presi in considerazione (Euro 2) producano in ambito urbano quantità significative di CO, HC, PM e soprattutto di NO_x, e cioè, rispettivamente, 3,9 [g/km], 3,2 [g/km], 0,5 [g/Km], 22,2 [g/km]. Ciò a causa sia delle caratteristiche del veicolo considerato (grande e pesante per l'utilizzo cittadino), sia per le modalità con cui l'autista è costretto ad adoperare il motore a causa del traffico. Nella gran parte delle situazioni infatti al motore è richiesto di funzionare sia in zone a basso numero di giri e bassi carichi, sia a singhiozzo (accelerazioni e frenate ripetute), ciò a detrimento dell'efficienza complessiva.

Si è calcolato che l'utilizzo della tecnologia ibrido serie può effettivamente portare un contributo significativo in termini di riduzione delle emissioni, ed infatti si stimano emissioni di CO pari a 0,2 [g/km], di HC pari a 0,2 [g/km], di PM pari a 0,1 [g/km], di NO_x pari a 6,0 [g/km] con medesima tecnologia motoristica. Ciò è dovuto sia alla minore energia da produrre per realizzare i cicli di marcia (recupero in frenata), sia al funzionamento a punto fisso del motore a combustione interna, quindi con assenza di transitori, che costituiscono di norma fasi di forte produzione di inquinanti.

All'esterno del contesto cittadino i veicoli ibridi risultano essere meno efficienti rispetto a quelli convenzionali. Ciò principalmente perché la marcia extraurbana presenta un minor numero di fasi alterne di accelerazione e rallentamento (minore energia recuperabile in frenata), e perché il motore diesel viene di norma adoperato in range di carico e numero di giri tali da fornire prestazioni energetiche e di consumo molto elevate.

A conclusione di questo studio si può affermare che i veicoli merci dotati di tecnologia ibrido serie possono significativamente ridurre l'impatto ambientale nel contesto urbano.

Al contrario, fuori città, non consentirebbero vantaggi significativi. Per questo occorre riorganizzare la penetrazione urbana delle merci, creando piattaforme urbane di distribuzione rifornite tramite treno, da cui poi smistare i beni con veicoli più piccoli, ibridi, ed espressamente progettati per la città (progetto HOST). Eventualmente tale sistema può essere affiancato da un altro per la raccolta differenziata dei rifiuti, con l'intento di razionalizzare gli investimenti e quindi diminuire i costi.

Bibliografia

1. Alessandrini A., F. Filippi, F. Orecchini and F. Ortenzi (2006) A New Method To Collect Vehicle Behavior in Daily Use For Energy and Environmental Analysis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -Part D- Journal of Automobile Engineering ISSN: 0954-4070 vol. 220 Issue 11 Nov.2006
2. Alessandrini A. and L. Persia (2001) Evaluation of hybrid buses in urban public transport service. Presented at PROSPER congress – Hybrid technology in public transport service Karlsruhe 19-20 September 2001 included in the pre-printed CD-rom conference proceedings.
3. Alessandrini A., C. M. Bartolini, F. Caricchi, F. Crescimbini, A. Di Napoli, O. Honorati, V. Naso, F. Orecchini, A. Santiangeli, L. Solero, F. Zuccari (2001) "Studio preliminare di un sistema energetico ibrido a basso inquinamento", Presented at X Convegno TESEC - Tecnologie e Sistemi Energetici Complessi, Genova, Italia,2001.
4. Alessandrini, A. and L. Persia (2000) Effects of low environmental impact buses. Presented at the ISATA 2000 conference, Dublin 2000. Pages 217-228 Conference proceedings Electric/Powertrain volume ISBN 1-902856-09-0
5. Dufour J.-G., J.F. Fritsche, C.Ripert (1996) "Le programme «Transports de marchandises en ville»: quelques repères pour une approche globale"; Transport Urbains, n.91, avril-juin 1996
6. Kawaji T., Nishikawa S., Okazaki a., Araki s., Sasaki M., (2006) Development of Hybrid Commercial Vehicle with EDLC EVS-22 Yokohama, Japan, Oct. 23-28, 2006 The 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition
7. Hosoya R., K. Shimizu, H. Ueno (2006) A Development of New Hybrid Truck & Bus EVS-22 Yokohama, Japan, Oct. 23-28, 2006 The 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition
8. Oogushi A. (2006) Development Of Hybrid Diesel Truck As The Main Target For Delivery Vehicle EVS-22 Yokohama, Japan, Oct. 23-28, 2006 The 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition
9. Orecchini F., F. Villatico Campbel and A. Alessandrini (2005) The Host Vehicle Concept: Human Oriented Sustainable Transport. Proceedings of FUELCELL 2005: Third International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology May 23-25, 2005, Ypsilanti, Michigan
10. Legambiente, Dossier sull'inquinamento da traffico, marzo 2001
11. Pede G., Alessandrini A., F. Filippi, F. Ortenzi, F. Villatico Campbel and C. Fonsati (2006) "Which Low Environmental Impact Vehicles for Freight Distribution in Big Cities?", EVS-22 Yokohama, Japan, Oct. 23-28, 2006 The 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition
12. Giorgio Mantovani (IVECO) "Field test on hybrid van fleet", 3rd International Conference - Hybrid, electric and fuel-cell propulsion systems ,Torino, giugno 2009.

CAPITOLO 21

L'ESPERIENZA DI MOBILITÀ SOSTENIBILE ELETTRICA DI REGGIO EMILIA

Roberto Badalotti

Amministratore delegato di TIL Srl

21.1 Reggio Emilia prima città *elettrica* d'Europa

Nel corso degli ultimi anni, Reggio Emilia si è vista a più riprese assegnare il titolo di “prima città elettrica d'Europa”, aggiudicandosi prestigiosi premi internazionali, che hanno acceso i riflettori della comunità scientifica sulla “sperimentazione di mobilità sostenibile elettrica” reggiana, segnalata con grande rilievo come un esempio di “buona pratica” da seguire, non solo a livello nazionale.

L'uso sempre più ampio e diffuso dei veicoli elettrici per muovere persone e cose in ambito urbano, salutata come “una delle più avanzate esperienze di trasporto a impatto zero sviluppate in Europa”, ha fatto meritare al capoluogo emiliano alcuni importanti “attestati internazionali”.

Nel 2003 la “Città del Tricolore” si è aggiudicata il prestigioso *Global E-Visionary Award WEVA*, il più significativo riconoscimento assegnato a livello mondiale dalla *World Electric Vehicle Association* alle città distintesi per il loro impegno nell'uso e nella diffusione di veicoli elettrici in ambito urbano: insieme a Reggio Emilia, prima classificata per l'area Europa-Africa, furono premiate Los Angeles per le Americhe e Yokohama per l'area Asia-Pacifico (la cerimonia ufficiale di consegna del premio si svolse il 19 novembre 2003 a Long Beach, California USA, nell'ambito della ventesima edizione dell'*International Electric Vehicle Symposium EVS 20*).

Due anni più tardi, la città emiliana si è vista conferire il premio “Best Practice” dall'Agenzia Internazionale per l'Energia dell'*Hybrid & Electric Vehicle Implementing Agreement* nell'ambito del 21° *Simposio Internazionale dei veicoli elettrici, ibridi e a celle a combustibile* che si è tenuto dal 2 al 6 aprile 2005 a Montecarlo, con il patrocinio del Governo del principe di Monaco, il sostegno della Società Monegasca dell'Elettricità e del Gas ed il contributo dell'Automobile Club di Monaco, in collaborazione con l'*Association Européenne des Vehicules Electriques Routiers (AVERE)*.

21.2 Una sperimentazione coraggiosa

Il progetto cui il Comune e la Provincia di Reggio Emilia, con la loro Azienda Consorziale Trasporti (ACT), hanno saputo dare vita è nato nel corso dell'anno 1999 da un'idea molto semplice: “convertire” all'uso del veicolo elettrico le

principali aziende pubbliche che ogni giorno, per svolgere il proprio lavoro (chi per trasportare passeggeri, chi per pulire le strade e raccogliere i rifiuti, chi per assistere gli anziani e i disabili), fanno transitare i loro mezzi sulle strade cittadine e in particolare nel centro storico.

Dalla sensibilità ambientale e dalla collaborazione tra il Comune e la Provincia di Reggio Emilia e ACT, con la sua partecipata TIL Srl (la società capofila del progetto), FCR Farmacie Comunali Riunite, AGAC Servizi Energetici e Ambientali (oggi Enìa) e Confcommercio, che hanno scelto di impiegare in modo sempre più massiccio, nei loro quotidiani servizi alla comunità, veicoli a propulsione elettrica, è iniziata questa innovativa esperienza di mobilità sostenibile, pubblica e privata, di rilievo nazionale e internazionale.

21.3 L'impulso normativo

La spinta che ha consentito la realizzazione del progetto viene indubbiamente esercitata dalle norme nazionali nel frattempo promulgate in materia di mobilità sostenibile. A seguito del decreto del Ministero dell'Ambiente (Ronchi) del 27 marzo 1998 *"Mobilità sostenibile nelle aree urbane"*, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 179 del 3 agosto 1998 – che all'art. 5 recitava: *"Nel rinnovo annuale del loro parco autoveicolare, le amministrazioni dello Stato, delle regioni, degli enti locali, degli enti e dei gestori di servizi pubblici e dei servizi di pubblica utilità, pubblici e privati, dovranno prevedere che nella sostituzione degli autoveicoli delle categorie M1 e N1 in dotazione una quota sia effettuata con autoveicoli elettrici, ibridi, o con alimentazione a gas naturale, a GPL, con carburanti alternativi con pari livello di emissioni, dotati di dispositivo per l'abbattimento delle emissioni inquinanti, nelle seguenti percentuali ed entro i tempi sottoindicati: entro il 31/12/98 nella misura del 5%; entro il 31/12/99 nella misura del 10%; entro il 31/12/00 nella misura del 20%; entro il 31/12/01 nella misura del 30%; entro il 31/12/02 nella misura del 40%; entro il 31/12/03 nella misura del 50%"*, – le amministrazioni pubbliche della città di Reggio Emilia decidono non solo di attenersi al dettame legislativo, ma in qualche misura di *superarlo*, dandosi l'obiettivo di utilizzare per la più parte dei loro trasporti veicoli a zero emissioni (ZEV).

21.4 L'uso dei veicoli elettrici come parte di un progetto organico di mobilità sostenibile

Negli ultimi anni Reggio Emilia ha messo a punto una serie di interventi in grado di incidere in termini significativi sulla riduzione dell'inquinamento atmosferico e di sviluppare una mobilità più sostenibile. Una forte soluzione è stata individuata proprio nell'utilizzo dei veicoli ad emissione zero: attualmente in città sono 238 i veicoli elettrici impiegati quotidianamente dalle aziende (pubbliche e private) per le attività di trasporto passeggeri, trasporto merci e per servizi.

Si tratta indubbiamente di un fatto straordinario, primo in Italia ed Europa per le proporzioni ed inquadrabile in una precisa volontà divenuta scelta: andare oltre le “buone intenzioni”, adottare “buone pratiche” che diventano prassi concrete e durevoli per la vivibilità delle città e a favore dell’ambiente.

L’esperienza di mobilità sostenibile sviluppata nel bacino reggiano dimostra nel modo più efficace come sia possibile promuovere e diffondere l’uso dell’auto elettrica in ambito urbano, attuando concreti interventi di compatibilità ambientale, senza attendere la comparsa di tecnologie magari ancor più stimolanti, ma lontane nel tempo. E dà il senso di come la Pubblica Amministrazione può contribuire a generare importanti “esperienze virtuose”, capaci di incidere in modo sensibile sul miglioramento dell’ambiente e sulla qualità della vita, promuovendo un insieme di interventi che, complessivamente, concorrono a rendere più respirabile l’aria delle città in cui viviamo.

Tra i più importanti realizzati a Reggio Emilia merita menzionare:

- l’adozione di mezzi pubblici e privati a basso impatto ambientale (minibus a trazione elettrica per il centro cittadino, taxi a metano o GPL, flotte pubbliche elettriche, a metano o GPL);
- l’acquisto di mezzi pubblici ecocompatibili (come i bus urbani a GPL o quelli extraurbani a trazione diesel omologati “Euro 3”);
- l’uso di carburanti migliori (come il gasolio a basso tenore di zolfo);
- l’utilizzo di sistemi di filtrazione antiparticolato (CRT) sui bus urbani;
- la sperimentazione e la verifica costante di nuove tecnologie.

Una serie di interventi che ha richiesto certamente un impegno costante, ma che nel suo insieme ha già prodotto un importanti benefici per tutti, concretamente misurabili e verificabili.

21.5 Il progetto

21.5.1 Punto cardine del progetto: la scelta vincente dell’econoleggio

La “sperimentazione elettrica” reggiana – che a questo punto può dirsi positivamente consolidata – è stata resa possibile grazie a una scelta che si è rivelata vincente: quella di promuovere l’uso dei veicoli elettrici attraverso l’originale formula dell’*econoleggio*, ovvero il noleggio senza conducente dell’auto e del veicolo commerciale a zero emissioni, che ha consentito di far superare i pregiudizi legati al mezzo elettrico (es. costo d’acquisto elevato, livello dell’assistenza post-vendita non conforme alle aspettative, ecc.) e avviare progetti studiati a misura delle esigenze dei cittadini.

Il servizio viene promosso da TIL Srl, società a totale partecipazione pubblica, che si occupa sia dell’acquisto dei veicoli elettrici sia della loro manutenzione. In pratica, come ogni società di “*car rent*”, TIL ha la completa gestione della flotta e fornisce un servizio che comprende anche l’immediata sostituzione del veicolo in caso di avaria.

Attraverso l'*econoleggio* il cliente acquista un servizio e non un bene: l'utilizzatore finale supera così le sue iniziali resistenze e il suo "scetticismo" (che sono poi alla base della mancata diffusione dell'auto elettrica) e sperimenta concretamente i vantaggi dell'uso del veicolo elettrico per muoversi nelle città.

Il Comune, dal canto suo, promuove con azioni concrete l'uso dell'auto elettrica (transito in ZTL, sosta gratuita, transito nelle corsie preferenziali bus).

21.5.2 Le fasi del progetto

Il progetto si è sviluppato in più fasi:

1^a fase

Aziende che svolgono pubblici servizi

PROGETTO FCR – Farmacie Comunali Riunite

Dal 1° gennaio del 2001, la flotta dell'azienda FCR Farmacie Comunali Riunite (che svolge un servizio di assistenza domiciliare per anziani), composta da n° 46 Fiat Panda ad alimentazione a benzina Euro 0, viene interamente sostituita con veicoli elettrici: un risultato (il 100% dei vecchi veicoli inquinanti sostituiti da nuovi veicoli a zero emissioni) pari al triplo di quanto raccomandato dal decreto ministeriale (30% entro il 2001).

Il servizio viene svolto nell'ambito dell'intero territorio comunale mediante un'organizzazione suddivisa per le 8 circoscrizioni: ciascuna di esse ospita un centro di residenza diurna per anziani, dal quale partono quotidianamente le assistenti per il servizio di assistenza domiciliare.

La media giornaliera di chilometri percorsi è quella consentita dall'autonomia del mezzo elettrico. Per questo, in ogni circoscrizione viene realizzato un parcheggio dotato di centrali di ricarica per i veicoli elettrici.

2^a fase

COMUNE DI REGGIO EMILIA

Flotta dei veicoli destinati ai servizi tecnici dell'Ente

Dal 1° giugno del 2002, la flotta dei veicoli destinati ai servizi tecnici del Comune di Reggio Emilia, composta da 139 veicoli a motore termico di differente tipologia quale Fiat Panda e Fiat Punto Euro 0, viene sostituita con 76 veicoli a trazione elettrica: si realizza così un risultato pari quasi al doppio di quanto richiesto dal decreto ministeriale (40% entro il 2002).

3^a fase

PROGETTO "ARIAMIA"

A seguito dei positivi risultati ottenuti dal progetto nelle precedenti fasi 1 e 2, l'11 dicembre 2003 prende il via – in accordo con Confcommercio – il progetto denominato "Ariamia", rivolto agli operatori commerciali ed artigianali del centro storico della città, per i loro servizi di trasporto merci, consegne a domicilio e spostamenti casa-lavoro.

Il progetto, che prevedeva l'*Econoleggio* da parte di TIL di 30 veicoli elettrici agli operatori privati, si sviluppa per *step* successivi:

1. individuazione da parte della Confcommercio di uno sponsor che, attraverso l'apposizione del proprio marchio sul veicolo, contribuisce ad abbassare il canone di noleggio a favore del fruitore finale;
2. erogazione di ecoincentivi a fondo perduto da parte della locale Camera di Commercio al fine di abbattere ulteriormente il canone di noleggio;
3. autorizzazione da parte del Comune di Reggio Emilia al transito in centro storico gratuitamente e senza limitazione alcuna;
4. autorizzazione alla sosta gratuita nelle aree di sosta a pagamento (zone blu) da parte del Comune di Reggio Emilia;
5. garanzia che l'*Econoleggio* è un servizio affidabile e efficace;
6. pubblicità dell'attività commerciale mediante l'apposizione sul veicolo del marchio aziendale.

4^a fase

PROGETTO "VIA LIBERA"

Analogamente a quanto realizzato nella 3^a fase del progetto, il 2 settembre 2005 parte "Via Libera": mediante l'erogazione da parte della Provincia di Reggio Emilia di ecoincentivi a fondo perduto per ridurre il canone di noleggio, il progetto – che interessa 20 veicoli elettrici – è rivolto a privati cittadini e ad aziende non artigianali.

Per le diverse fasi del progetto sono stati utilizzati veicoli commerciali a trazione elettrica Piaggio MicroVett, che si prestano infatti a numerosi impieghi:

- multimpiego: trasporto di 4 persone + vano di carico di 1,4 metri cubi
- trasporto commerciale urbano: 2 posti, 3 portelloni e vano di carico di 3 metri cubi
- trasporto persone: 6 posti, utilizzato come navetta, *courtesy car*, o per interscambi
- trasporto disabili: 3 posti + disabili, con pedana di sollevamento elettrica
- trasporto di carichi ingombranti: 2 posti con pianale aperto di oltre 2,7 mq
- pulizia urbana e salvaguardia naturale: 2 posti con vasca ribaltabile per la raccolta rifiuti.

21.5.3 *Effetti attesi*

Gli effetti attesi dalla realizzazione del progetto erano i seguenti:

- ridurre le emissioni inquinanti in atmosfera. Infatti l'impiego di un'auto elettrica tipologia Porter Piaggio, rispetto ad un autoveicolo di un'analoga categoria a motorizzazione endotermica consente una ri-

duzione delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) pari a circa 100 g/km, di ossido di carbonio (CO) pari a circa 3,64 g/km, di ossidi di azoto (NO_x) pari a circa 0,21 g/km ed inoltre di polveri sospese PM10, e idrocarburi policiclico aromatici (IPA) e di BTX (benzene, toluene, xilene). I parametri sono considerati al netto delle emissioni in atmosfera della centrale termica deputata alla produzione dell'energia elettrica. Si riducono così i pericoli per la salute umana e la qualità della vita derivanti dalle emissioni nell'atmosfera di sostanze chimiche nocive o pericolose da parte degli autoveicoli nelle aree urbane;

- contribuire così a rispettare i parametri disposti dalle direttive europee in materia di qualità dell'aria nel 2005 (concentrazioni di polveri fini inferiori a 50 mg per metro cubo al giorno, e inferiori a 40 mg come media annua);
- rispettare anche i criteri di sostenibilità indicati dalla VAS ed in particolare: limitare le emissioni di gas a effetto serra che contribuiscano al riscaldamento globale e ai cambiamenti climatici (VAS criterio 8 obiettivo 1); ridurre i pericoli per l'ecosistema, la salute umana e la qualità della vita derivanti dalle emissioni nell'atmosfera, nelle acque e nel suolo di sostanze chimiche nocive o pericolose (VAS criterio 8 obiettivo 7).
- ridurre l'inquinamento acustico dell'ambiente urbano, fonte di disturbo per la collettività;
- sensibilizzare la collettività all'impiego di mezzi sostenibili per gli spostamenti privati;
- promuovere e diffondere l'utilizzo delle autovetture nelle flotte pubbliche con la formula del noleggio acquistando, perciò, un servizio anziché un bene, al fine di garantire un migliore controllo in termini di efficienza e economicità gestionali;
- educare la collettività a scelte sostenibili anche negli acquisti, orientando il mercato verso le aziende che producono prodotti ecocompatibili, come ad esempio i veicoli elettrici;
- diffondere il *know-how* acquisito dal Comune di Reggio Emilia;
- ottenere nell'immediato un risparmio economico conseguente al mancato acquisto della benzina e del gasolio in luogo alla fornitura dell'energia elettrica.

Attraverso l'attuazione di questo progetto sono quindi stati sostituiti 172 veicoli in precedenza alimentati a benzina o a gasolio, con emissioni inquinanti rispondenti alla normativa Euro 0, per una spesa complessiva di euro 4.370.000 (Iva esclusa), per il 35% finanziata da TIL che ne detiene la proprietà, per un importo complessivo pari a Euro 1.529.500 (Iva esclusa,) e per il restante 65 % dal Ministero dell'Ambiente (Legge 426/98), per un importo complessivo pari a euro 2.840.500 (Iva esclusa).

21.6 I risultati ottenuti dall'esperienza elettrica reggiana

I 172 Porter utilizzati hanno percorso complessivamente 5.964.516 km. L'esperienza si è dimostrata estremamente positiva e di elevato gradimento. Non vi è stata alcuna voce critica, anzi numerosi sono stati gli apprezzamenti e le richieste da parte dei cittadini perché tali veicoli venissero utilizzati anche dai commercianti per le consegne nell'area urbana.

Le principali ricadute positive dell'attuazione di questo progetto sono relative al contenimento sia della rumorosità sia delle emissioni in atmosfera in ambiente urbano derivanti anche dagli spostamenti dei dipendenti comunali e delle aziende pubbliche per l'espletamento dei servizi di competenza degli enti. Oltre alla riduzione della rumorosità, del 90% circa, ed all'annullamento delle emissioni di benzene, toluene, cilene, idrocarburi policiclici aromatici, si sono infatti ottenute:

riduzione di CO₂: kg 596.452

riduzione di CO: kg 21.711

riduzione di NOx: kg 1.253

non emissione di PM10: 328.

I riscontri sono stati molto positivi anche dal punto di vista della redditività dell'investimento, grazie ai ridotti costi di gestione, derivanti dal minor costo del kWh elettrico rispetto a quello termico, e naturalmente grazie al finanziamento pubblico che assorbe il maggior costo dei veicoli.



Fig. 21.1 - Reggio Emilia, "Giornata dell'auto elettrica" (18 settembre 2008): la sfilata delle auto a impatto zero parte dal Municipio...



Fig. 21.2 - ... e raggiunge i Ponti di Calatrava

Infatti il risparmio di carburante, dal 01/01/2001 al 31/12/2007, è pari a 497.043 litri. Ad un costo al litro (dic. 2007) di € 1,125 al netto delle imposte, il risparmio economico di € 559.173.

I kWh consumati sono circa 1.431.484. Ad un costo unitario (1° semestre 2007) di € 0,1548/kWh, al netto delle imposte, il costo totale dell'energia consumata è stato di € 143.466. Il risparmio totale, quindi, è stato pari a € 415.707.

21.7 Le attività di informazione e promozione

Sia nel corso della prima fase di avvio che durante la realizzazione delle ulteriori fasi successive, il progetto è stato costantemente accompagnato da puntuali iniziative di comunicazione, rivolte in primis a tutta la cittadinanza reggiana e poi all'opinione pubblica nazionale: realizzazione di materiali informativi ad hoc (tra cui un CD-ROM multimediale), filmati, servizi fotografici; manifesti e stampati; i siti web del Comune di Reggio Emilia, di ACT e di TIL; due convegni pubblici (nel 2001 e nel 2005), e un'attività continuativa di ufficio stampa che ha generato molti articoli di stampa e diversi passaggi radio-televisivi dedicati.

21.8 Valutazione dell'esperienza e conclusioni

Il servizio di noleggio delle auto elettriche alle aziende e agli enti pubblici, ai commercianti, agli artigiani e ai privati cittadini di Reggio Emilia (cui si sono aggiunte nel corso degli ultimi anni molte altre città italiane) è svolto da TIL Trasporti Integrati Logistica, società partecipata dalla locale Azienda Consorziale Trasporti.

Nata il 17 novembre 1998 e divenuta operativa il 18 gennaio 1999, oggi TIL non è solo una società di trasporti specializzati al servizio della mobilità reggiana (capace di integrare i servizi di trasporto pubblico locale con servizi rivolti a particolari categorie di utenti: servizi di trasporto a prenotazione per anziani e persone disabili, servizio bus urbano notturno a prenotazione telefonica "Aladino", servizi di scuolabus e di noleggio turistico), ma è la società leader italiana ed europea dell'Econoleggio.

TIL possiede oggi la più ampia flotta di veicoli elettrici a zero emissioni d'Europa: oltre 500 Porter Piaggio Electric Power (nella sola Reggio ne circolano 240), disponibili in oltre venti allestimenti differenti per rispondere specificamente alle più diverse esigenze di trasporto, nel pieno rispetto dell'ambiente.

Dal 2000 a oggi, a Reggio Emilia si fa un uso "normale e quotidiano" dell'auto-veicolo a trazione elettrica: in questi otto anni, i cittadini si sono ormai abituati a vedere, nell'esperienza di tutti i giorni, che quello che un tempo veniva percepito come "alternativo" ed "ecologico" oggi è invece sinonimo di quotidianità e praticità.

Oltre a poter circolare in qualsiasi fascia oraria, senza alcuna limitazione legata al traffico, i vantaggi derivanti dall'uso del veicolo elettrico sono quelli di poter parcheggiare gratuitamente l'auto in tutte le aree di sosta di Reggio Emilia e provincia (anche quelle a pagamento) e di poter circolare liberamente all'interno delle Zone a Traffico Limitato del centro.

Per concludere: quella di Reggio Emilia è stata una scelta radicale, primo tassello di un più vasto programma per la mobilità sostenibile che punta alla diffusione del noleggio di veicoli elettrici anche agli operatori privati e ai singoli cittadini. Si è trattato di una sperimentazione di grande innovatività, che ha comportato (soprattutto all'inizio) scelte coraggiose, da parte di tutti gli attori coinvolti nel progetto: da parte di ACT e di TIL anzitutto, che nel loro ruolo di "apri-pista" e di "capo-cordata" ne hanno curato l'ideazione e la regia, da parte delle amministrazioni comunale e provinciale di Reggio, che vi hanno creduto fortemente, così come da parte del Ministero dell'Ambiente, che lo ha finanziato, mettendo a disposizione i fondi per l'acquisto dei veicoli elettrici, e che – a dispetto dei numeri, che possono sembrare poca cosa – dimostra in termini realistici come un altro modo di trasportare persone e cose, nelle nostre città, sia possibile: non solo auspicabile, ma concretamente fattibile, qui e ora.

CAPITOLO 22

APPLICAZIONI DEI SISTEMI DI ACCUMULO ELETTRICO AL TRASPORTO SU ROTAIA

Romano Giglioli¹, Giovanni Pede²

¹ *Università degli Studi di Pisa,*

² *ENEA, Tecnologie per l'Energia, Fonti Rinnovabili e Risparmio Energetico*

L'emergere in campo ferroviario di alcune problematiche ambientali da tempo presenti in ambito automobilistico, hanno portato ad una ripresa di interesse per l'utilizzo dei sistemi di accumulo elettrico nel trasporto su rotaia. In effetti, anche se il contributo dei sistemi di trasporto su rotaia all'inquinamento locale e globale è molto ridotto rispetto a quello del trasporto su strada, a livello locale, in alcuni casi, il diesel ferroviario inquina significativamente, come mostrato nella pagina seguente in Fig. 22.1.

Di conseguenza, si sono moltiplicate le iniziative e le proposte relative ai sistemi di generazione elettrica di bordo,

- sia con l'utilizzo di sistemi di accumulo elettrico in tranvie/metropolitane leggere (o anche in ferrovie turistiche¹), per consentire a questi mezzi l'attraversamento di aree di rispetto per le quali sia preferibile non installare una linea aerea,
- sia con l'utilizzo degli stessi in associazione a convertitori di energia primari (motogeneratori e celle a combustibile) e quindi in configurazione ibrida del sistema di trazione, sulla linea evolutiva del classico diesel-elettrico ferroviario.

Vediamo in quali casi e per quali ragioni quest'ultima configurazione possa essere proponibile anche in ambito ferroviario, a partire dagli aspetti energetici della questione. Confrontiamo dunque le tipiche ripartizioni della domanda finale di energia per diverse classi di servizio ferroviario, per avere un'idea di come questa si distribuisca tra i diversi utilizzi finali.

In Fig. 22.2 sono riportate 5 distinte tipologie, per ciascuna delle quali si è valutato quanto sopra detto, basandosi sulla letteratura e facendo alcune assunzioni di massima². Come può vedersi, per i treni regionali e suburbani una percentuale assai alta dell'energia richiesta è utilizzata con modalità non dissipative, per vincere l'inerzia del veicolo in fase di accelerazione e per il superamento di dislivelli, e si trasforma perciò in energia cinetica e/o potenziale.

¹ Come la tranvia intercomunale Cogne-Acque Fredde-Plan Praz (per la quale è stato realizzato da Firema un convoglio formato da dieci carrozzette e due locomotive ad accumulatori, con una capacità di trasporto di 1600 passeggeri/ora).

² Come ad esempio la percentuale del 20% considerata per il carico dovuto al riscaldamento/condizionamento (comfort).

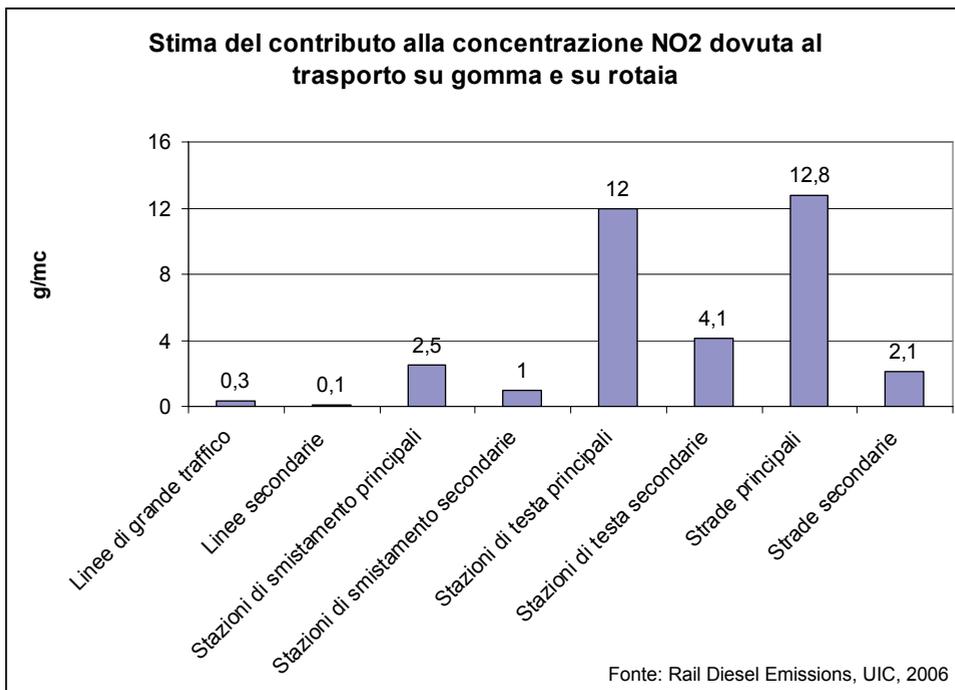


Fig. 22.1 - Stima del contributo alla concentrazione di NO₂ dovuta al trasporto su gomma e su rotaia

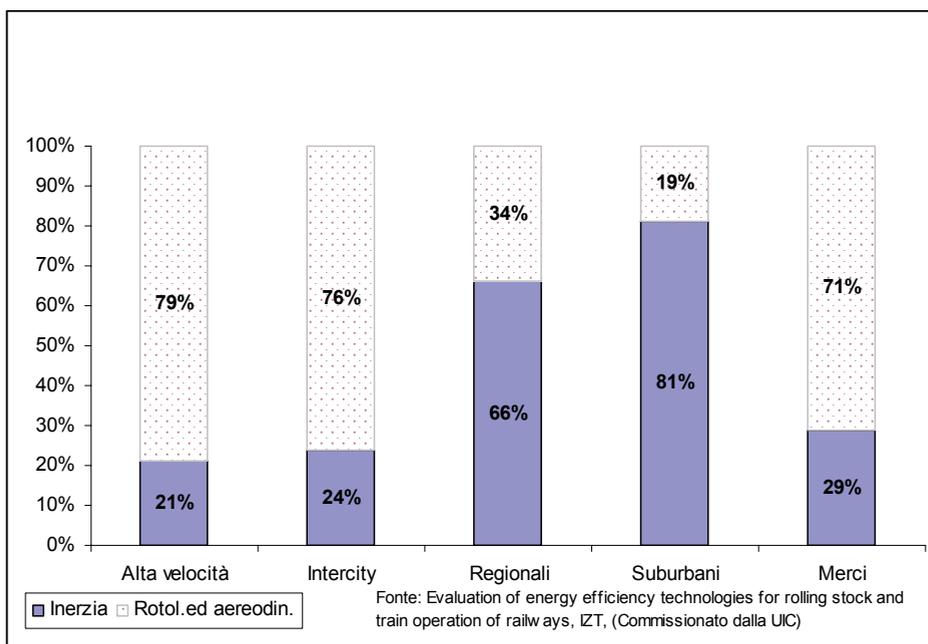


Fig. 22.2 - Ripartizione % dell'energia utilizzata per la trazione, per alcuni tipi di treni

Nei treni a trazione elettrica o diesel-elettrica, grazie alla reversibilità delle macchine elettriche, questa energia può essere restituita al sistema, durante le fasi di frenatura e/o nelle discese, e di fatto spesso lo è, nella cosiddetta frenatura “reostatica”, andando così definitivamente perduta, oppure reimpressa in rete, purché si realizzi una delle seguenti ipotesi:

- in linea ci sia un altro treno ad utilizzarla (sistemi in continua o a frequenza ferroviaria)
- le sottostazioni di alimentazione siano reversibili o provviste di un sistema di accumulo.

La presenza a bordo del treno di un accumulo elettrico rende invece possibile il recupero di energia in modo indipendente dalle caratteristiche della linea.

Sono stati quindi recentemente proposti accumuli elettrici “on board”, di diverso tipo, per le categorie treni regionali e suburbani, per le quali è massima l'utilità del recupero d'energia.

Altre applicazioni dell'ibridizzazione ai sistemi di trazione su rotaia si sono avute per i locomotori di manovra e per i treni ad alta velocità, con l'obiettivo principale della riduzione dell'impatto ambientale del sistema di generazione di bordo e/o la riduzione della sua taglia.

22.1 La trazione elettrica ferroviaria ad accumulatori, cenni storici

Alla fine dell'Ottocento, quando la trazione elettrica tranviaria a 600 V era stata già adottata a Firenze (1890), Milano (1893) e Roma (1895), si compiono in Italia le prime esperienze di trazione ferroviaria in corrente continua (650 V) e trifase (3500 V) ed anche le prime sperimentazioni della trazione ad accumulatori, ritenuta interessante per la minore complessità del sistema, che non richiedeva impianti fissi di alimentazione.

Le due principali amministrazioni ferroviarie di allora, la Rete Mediterranea e la Rete Adriatica, misero infatti in servizio alcune automotrici di questo tipo, sulla Milano-Monza, la prima, l'8 febbraio 1899, sulla Bologna-Modena la seconda, il 1 dicembre 1900. In entrambe le linee il servizio fu riconvertito ancor prima della nascita delle Ferrovie dello Stato, il 1 luglio 1905, per le insufficienti caratteristiche degli accumulatori, che si riflettevano in autonomie dell'ordine dei 50-100 km e quindi in una disponibilità ridotta a causa della lunga durata delle fasi di ricarica.

Queste prestazioni risultavano tuttavia sufficienti per l'esercizio di tranvie extra-urbane che erano allora molto diffuse e numerose automotrici ad accumulatori, di costruzione Carminati&Toselli-TIBB, furono utilizzate sulla Torino-Saluzzo, sulla Monza-Trezzo-Bergamo, sulla Udine-San Daniele, sulla Verona-Garda, sulle Tranvie Provinciali Mantovane, sulle tramvie Pisa-Pontedera e Pisa-Marina di Pisa ecc.

Altro utilizzo piuttosto diffuso fu quello di locomotori per servizi di manovra e merci sui raccordi industriali (il TIBB di Vado Ligure, i raccordi Sondel in Alta Valtellina, la ferrovia marmifera di Laas/Lasa, la Crotona-Timpa Grande ecc.), per la pulizia, l'economicità e la praticità di esercizio offerte dalla trazione elettrica, decisamente superiori rispetto al vapore (il diesel all'epoca era ancora poco diffuso). In alcuni casi questi mezzi erano di tipo bimodale, con alimentazione dalla linea di contatto, ove presente, oppure dall'accumulo elettrico di bordo.

Anche le FS usarono locomotive di questo tipo, per prima la E421, una vera e propria "batteria su ruote" per il peso degli accumulatori che arrivava quasi al 50% del peso totale, poi la conversione bimodale della E.626.061. Questa locomotiva faceva parte della serie allora in costruzione per l'esercizio della trasversale appenninica Benevento-Foggia, prima linea al mondo elettrificata a 3000 V in continua. La macchina nel settembre del 1932 fu dotata di una batteria di accumulatori Marelli, per consentirne l'esercizio per brevi tratti sotto la linea trifase, all'epoca molto diffusa in Italia. L'esperimento durò soltanto un paio d'anni, per i numerosi problemi presentati dall'esercizio delle batterie, ma le macchine da manovra più piccole e le automotrici per le tramvie continuarono a circolare, alcune fino agli anni 50, soppiantate infine dallo sviluppo del diesel sia per il trasporto su gomma sia nella trazione ferroviaria.



Fig. 22.3 - Locomotore da manovra ad accumulatori conservato al Museo Ferroviario di Trieste

22.2 Lo stato dell'arte della trazione ibrida per il trasporto urbano e regionale su rotaia

Come visto in premessa, nei mezzi su rotaia per il trasporto urbano, suburbano e regionale, le potenzialità di recupero dell'energia cinetica e potenziale mediante l'uso di un accumulo elettrico di bordo sono migliori rispetto ad altre tipologie, e consentono quindi un più rapido recupero dell'investimento aggiuntivo.

L'esercizio di questi mezzi è infatti caratterizzato dalla presenza di fermate piuttosto ravvicinate, e non sempre è possibile la frenatura elettrica a recupero perché non necessariamente (secondo alcune stime solo in un 20% dei casi) quando un mezzo frena ce n'è un altro in fase di accelerazione nel tratto servito dalla medesima sottostazione.

In queste applicazioni, l'indipendenza dalla linea di alimentazione garantita dall'accumulo elettrico di bordo consente anche una limitata autonomia in solo elettrico, a moto-generatore spento, con vantaggi estetici ed ambientali, come all'attraversamento di piazze e zone di rispetto nei centri storici.

Ulteriore aspetto positivo è la non interruzione immediata del servizio in caso di guasti, con la possibilità di riportare gli utenti alla fermata più vicina e garantire l'evacuazione del mezzo in condizioni di sicurezza.

Partiamo dai *mezzi urbani e suburbani* che viaggiano comunque su sede propria, come il Civis dell'IVECO ed il Translohr, e sono un gradino sotto i tram in termini di capacità di trasporto (fino a 4.000 passeggeri/ora contro i 6.000 dei tram).

Per questi sistemi di trasporto, che richiedono infrastrutture più semplici dei tram, le possibilità/capacità di marcia autonoma sono ancora più importanti e nella Tab. 22.1 si può notare come, in effetti, siano tutti proposti anche con una sorgente di energia elettrica a bordo.

Tab. 22.1 - Comparazione tra diversi modelli ibridi di treni urbani/regionali

| | <i>CIVIS</i> | <i>STREAM</i> | <i>TRANSLOHR</i> | <i>TVR</i> |
|---|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| <i>Dimensioni</i> - sezione trasversale (m) - lunghezza (m) | 2,55 x 3,22 | 2,50 x 2,40 | 2,20 x 2,89 | 2,50 x 3,40 |
| | 12 18 | 12 18 | 25 32 | 12 18 |
| <i>Raggio di sterzata</i> (m) | 25 | 12,5 | 10,5 | 12 |
| <i>Passeggeri a bordo</i> (p) | 70 120 | 70 120 | 116 148 | 145 |
| <i>Velocità commerciale</i> (km/h) | 20÷25 | 20÷25 | 20÷25 | 20÷25 |
| <i>Sorgente di energia:</i> <i>esterna</i> | Linea aerea (due conduttori) | In sede stradale (ad induzione) | Linea aerea (due conduttori) | Linea aerea (due conduttori) |
| | <i>di bordo</i> | Diesel-elettrico | Batterie | Batterie |



Fig. 22.4 - Tram-treno in stazione nei sobborghi di Karlsruhe (Germania)

Passando ai tram ed ai tram-treni (Fig. 22.4), diversi costruttori europei sono pure impegnati nello sviluppo di versioni ibride degli stessi.

L'Alstom ha equipaggiato con sistemi di accumulo elettrico, due sistemi tranviari, con batterie nichel-idruri il Citadis per Nizza, con volani un tram a Rotterdam (Fig. 22.5).



Fig. 22.5 - Tram ibridi realizzati da Alstom: (a sinistra) con accumulo elettrico a batterie nichel-idruri, operante a Nizza, Francia; (a destra) con accumulo a volani, operante a Rotterdam, Olanda



Fig. 22.6 - Tram ibrido con alimentazione aerea e sistema d'accumulo con supercondensatori realizzato dalla Bombardier, operante a Mannheim (Germania)

L'azienda canadese Bombardier ha invece realizzato il Mitrac, un sistema d'accumulo con supercondensatori (600 V/1,5 kWh), che consente un risparmio energetico del 30% ed ha sufficiente energia da consentire la movimentazione autonoma del convoglio, per brevi tratti, in caso di guasto sulla linea aerea di alimentazione.

La distanza così percorribile è di 5-600 m, un valore leggermente inferiore a quello consentito dal volano installato sul tram Alstom in servizio a Rotterdam, di cui si è detto nella pagina precedente.

Il sistema è in esercizio dal 2003 su un tram a Mannheim in Germania (Fig. 22.6) e la Bombardier ne ha proposto l'applicazione anche per i convogli diesel-elettrici.

La Siemens ha partecipato ai due progetti di ricerca europei del consorzio U-LEV-TAP, I e II, dove sono stati utilizzati volani, dello stesso tipo del tram olandese.

Il consorzio si propone la realizzazione di un tram-treno più efficiente del 40% di un sistema con linea aerea e meno costoso del 30% circa. Il convertitore di energia primaria, che nel primo progetto era una turbina, nel secondo è un diesel.

Anche il settore del trasporto regionale si presta a questo tipo di applicazioni, e alle ragioni già viste per i tram si aggiunge la possibilità di partenza dalle grandi stazioni cittadine (lì dove la trazione diesel inquina in misura rilevante) in solo elettrico, grazie ad un opportuno dimensionamento del pacco batterie.



Fig. 22.7 - Convoglio ibrido diesel-elettrico KIHA-E200 in servizio in Giappone

Su questa linea la East Japan Railway ha ibridizzato una automotrice diesel-elettrica (2 motori di trazione da 120 kW nominali) aggiungendo al sistema di trazione diesel delle batterie litio-ione. Dalle prove il risparmio di combustibile è risultato del 20% circa, senza considerare i vantaggi ambientali e l'autonomia (sulle batterie da sole) di 5 km in caso di guasti alla rete. Nel luglio del 2007 tre convogli KIHA-E200, ciascuno formato da due automotrici ibride di questo tipo, sono entrati in regolare servizio commerciale (Fig. 22.7). L'Hitachi ha poi sviluppato per il Regno Unito l'analogo "Hayabusa".

Analoga trasformazione è stata progettata da Trenitalia per la rimotorizzazione delle automotrici diesel Aln 668, le cui prestazioni (calcolate), prima e dopo la modifica, sono illustrate in Tab. 22.2. Come può vedersi, il vantaggio delle versioni ibride in termini di riduzione dei consumi energetici è importante (>20% per quella con motogeneratori, un valore analogo a quello misurato sul prototipo giapponese), e lo è anche in termini ambientali, perché le automotrici rimotorizzate affiancano a ridotte o nulle emissioni in ambiente extraurbano, capacità di marcia in solo elettrico in ambiente urbano.

22.3 L'utilizzo dell'idrogeno come combustibile per i sistemi di trasporto su rotaia

In termini di peso, la versione con celle a combustibile è penalizzata dallo stoccaggio dell'idrogeno, nonostante l'impiego di bombole con liner metallico e completamente avvolte in compositi (Tipo 3, 150 litri, 65 kg ciascuna). Gli oltre 60 kg di idrogeno necessari per una autonomia di 600 km necessitano infatti di 20 bombole, sistemate sull'imperiale del mezzo, per un peso totale del sistema di 1400 kg.

Tab. 22.2 - Comparazione delle prestazioni dell'automotrice Aln 668 con diverse motorizzazioni

| | | | |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| <i>ALN668</i> | <i>Convenzionale</i> | <i>Ibrido diesel</i> | <i>Ibrido fuel-cell</i> |
| <i>Fuel Cell</i> | - | - | 3 × 120kW |
| <i>Motori Diesel</i> | 2 × 205 kW | 2 × 150 kW | - |
| <i>Accumulo elettrico</i> | - | 16 × moduli ZEBRA | 6 × moduli ZEBRA |
| <i>Combustibile</i> | 600 litri (gasolio) | 700 litri (gasolio) | 80 kg (idrogeno) a 350 bar |
| <i>Pesi</i> | | | |
| <i>a carico normale</i> | 40,6 | 44,5 | 45,2 |
| <i>Autonomia</i> | | | |
| <i>Normale/ibrido</i> | 700 | 1000 | 600 |
| <i>zero emission</i> | - | 30 | 600 |
| <i>Consumi</i> | | | |
| <i>[kg/km]</i> | > 0,5 (gasolio) | 0,39 (gasolio) | 0,11 (idrogeno) |
| <i>[kWh/km]</i> | > 6 | 4,7 | 3,8 |
| <i>Emissioni</i> | | | |
| <i>CO₂ [kg/km]</i> | > 1,5 | 1,2 | - |
| <i>NO_x [g/km]</i> | > 22,5 | 8,3 | - |
| <i>HC [g/km]</i> | > 1,5 | 0,02 | - |
| <i>CO [g/km]</i> | > 5,7 | 0,22 | - |
| <i>PM [g/km]</i> | non disponibile | 0,013 | - |

Fonte: Trenitalia

Bombole a 350 bar sono state utilizzate anche per il primo treno con celle a combustibile, un'elettromotrice modificata dal Railway Technical Research Institute di Tokyo con l'installazione a bordo di una cella a combustibile da 100 kW prodotta dalla italo-americana Nuvera FC, e nel 2006 c'è stato il viaggio inaugurale della R291 (Fig. 22.8).



Fig. 22.8 - L'elettromotrice R291, con cella da 100 kW basata sullo stack Nuvera FC

Il quantitativo di idrogeno trasportato a bordo, 18 kg, è chiaramente sufficiente solo per scopi di sperimentazione del sistema.

La versione studiata dall'istituto di ricerca per un uso sostitutivo delle attuali elettromotrici è invece un ibrido "a prestazioni invariate", con celle a combustibile da 217 kW, pari alla potenza massima continuativa della motorizzazione, e supercondensatori di potenza e capacità sufficiente alla alimentazione dei motori durante gli spunti a potenza massima "di picco".

Nel 2007 c'è stato poi il viaggio inaugurale della versione con celle a combustibile della automotrice ibrida EJR. Rispetto alla versione con motogeneratori, non ci sono differenze nello schema costruttivo (due sistemi di generazione ibridi, uno per ciascun carrello motorizzato), ma c'è un diverso proporzionamento dell'accumulo elettrico, che è più grande stante la minor potenza disponibile dei due sistemi di cella a combustibile (2 x 65 kW). La riduzione aggiuntiva dei consumi energetici, kWh/t km, realizzata grazie al miglior rendimento delle celle rispetto ai motogeneratori, è del 18% circa.

Anche per tram e mezzi gommati in sede propria è stata proposta la generazione di bordo con celle a combustibile, con le stesse motivazioni che ne hanno motivato la sperimentazione a bordo degli autobus urbani (assenza di emissioni, silenziosità). La principale difficoltà incontrata dai progettisti è stata la collocazione a bordo del mezzo dell'accumulo di idrogeno, per questioni più che di peso, come nelle auto, di volume. In un tram a doppia alimentazione non è possibile sistemare le bombole di idrogeno gassoso sull'imperiale per motivi di sicurezza (presenza della linea aerea e delle apparecchiature di contatto), né sotto il pavimento per motivi di spazio (si tratta infatti di mezzi a pianale ribassato). Prima ancora che per motivi di costo e di affidabilità delle celle a combustibile, è stato questo il motivo della sospensione del Fultram, un tram sviluppato dall'Alstom nell'ambito dell'omonimo progetto francese.

Il volume occupato, necessario per un'autonomia di marcia giornaliera, va infatti da 4 a 12 m³, secondo che si usino bombole a 750 bar o a 350 bar, ed avrebbe quindi richiesto quindi una riprogettazione del mezzo con l'inserimento di una sezione intermedia aggiuntiva per l'alloggiamento del generatore di bordo ibridizzato e dell'accumulo primario.

22.4 I locomotori di manovra ibridi

L'ibridizzazione ha utile applicazione in campo ferroviario, oltre che per il recupero in frenatura dell'energia cinetica e potenziale del treno, anche per quei mezzi che impegnano una potenza media che è solo una piccola frazione di quella massima necessaria, come i locomotori da manovra; in questi casi l'accumulo elettrico, "spianando" i picchi di potenza, consente di usare un convertitore primario dimensionato per la potenza media giornaliera, e quindi molto più piccolo e meno costoso del motogeneratore del diesel-elettrico tradizionale, che è necessariamente dimensionato per la potenza di picco.



Fig. 22.9 - Il locomotore diesel-elettrico Green Goat, realizzato dalla nord-americana RailPower

In queste locomotive, infatti, se è notevole la potenza richiesta all'avviamento, la velocità massima e la potenza media oraria sono ridotte; inoltre è in genere basso anche il duty-cycle (tempi di fermata lunghi rispetto al totale), per cui la potenza media su base giornaliera è ancora minore.

Poiché con questo dimensionamento il motore funziona per un tempo maggiore in condizioni più vicine alla condizione di minimo consumo specifico, il rendimento medio di trazione (calcolato durante tutta la missione, compresi quindi i transitori ed il funzionamento al minimo) migliora e si riducono consumi ed emissioni.

È questo il caso del locomotore ibrido Green Goat (Fig. 22.9), realizzato in Canada dalla RailPower, sostituendo il motore diesel originario da 1100 kW (si tratta di un locomotore diesel elettrico) con uno di derivazione camionistica molto più piccolo (200 kW), che marcia in condizioni ottimali, abbinato a batterie al piombo. Nell'esercizio del locomotore si sono infatti ottenute significative riduzioni delle emissioni gassose (dell'80% quelle di NOx e particolato), del rumore e dei consumi di combustibile (circa il 30%).

Nella Fig. 22.10 è illustrata, con tre esempi diversi, una evoluzione del concetto del locomotore da manovra ibrido, con generazione a celle a combustibile. Mentre il progetto statunitense denuncia, per il peso rilevante dato alle batterie, una impostazione da *plug-in-hybrid* ed il progetto francese Platée è dichiaratamente un banco prova mobile, il progetto di Trenitalia ha evidenziato un problema fondamentale dell'idrogeno, quello del suo stoccaggio a bordo, assicurato in questo caso da 46 bombole a 350 bar da 150 L ciascuna, 140 kg di idrogeno in tutto.

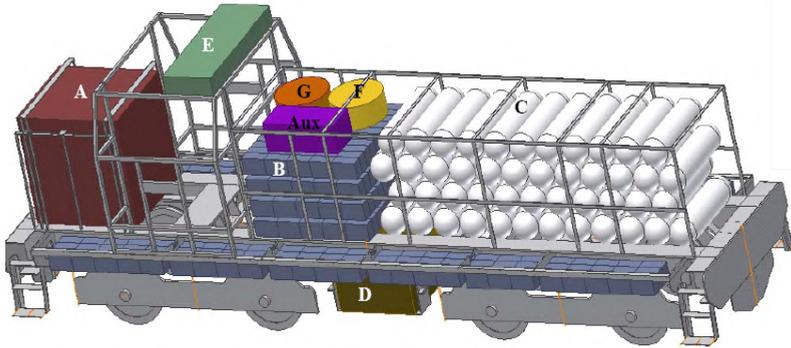
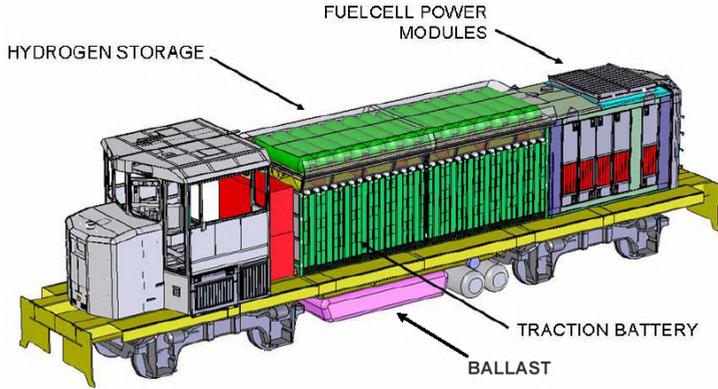


Plate-form pour Trains Hybrides
Économiques en
Énergie et Respectueux de l'
Environnement

ADENE
Agence de l'Environnement
et de la Pêche de l'Énergie

SNCF INRETS 2 ENERGY IVECO Group ERCTEEL Laplace ALSTOM

Fig. 22.10 - Tre progetti/programmi di locomotori di manovra con celle a combustibile: dall'alto in basso quello statunitense (basato sul Green Goat), l'italiano (Trenitalia) e il francese

Il quantitativo di idrogeno necessario a garantire un esercizio giornaliero di 20 h con un duty-cycle > 91%, secondo il ciclo FS, sarebbe tre volte maggiore, e quindi solo l'uso di bombole a 700 bar, o di altri sistemi di accumulo a maggiore densità energetica, consentirebbe il rispetto di tutte le specifiche di progetto.

22.5 Alcune considerazioni sul dimensionamento

Nella progettazione dei locomotori di manovra, un parametro essenziale è il rapporto tra il tempo di marcia effettiva ed la durata del turno di utilizzo della macchina, cioè il duty-cycle della missione in specifica. Infatti la gamma di questi locomotori vede, insieme a macchine di potenza molto diversa tra di loro, tipologie di utilizzo che vanno da dall'uso quasi continuativo a quello che prevede lunghi tempi di sosta.

Si è pertanto calcolato, nell'ambito del progetto eseguito per un operatore ferroviario nazionale e sulla base delle specifiche relative al singolo microciclo compreso tra due periodi di sosta, la potenza di generazione minima necessaria per arrivare a fine giornata in condizioni di equilibrio energetico, per diversi valori del tempo di inutilizzazione.

Si ricordi che un limite superiore pratico alla potenza installabile in un locomotore a celle a combustibile è comunque dato dal quantitativo di idrogeno stoccabile a bordo: in breve, non avrebbe senso installare una cella tanto potente da richiedere, nell'ipotesi di tenerla accesa alla potenza nominale per tutta la durata del turno di lavoro, una quantità di idrogeno maggiore di quella disponibile. Si sono quindi riportati in un grafico i risultati delle simulazioni eseguite su di un locomotore da manovra da 600 kW, per sistemi di generazione di bordo di potenza crescente da 120 a 240 kW. Si è successivamente modificato tale diagramma perché potesse essere utilizzato con riferimento per macchine di potenza diversa, sostituendo in ordinata al valore della potenza di generazione quello del grado di ibridizzazione del sistema di trazione.

Con questa modifica, che lo generalizza, il grafico può essere utilizzato per il dimensionamento del sistema di generazione, in corrispondenza alle diverse missioni possibili per i locomotori di manovra. Le versioni proposte, infatti, potrebbero essere più d'una anche per la stessa macchina, per le diverse esigenze dell'operatore ferroviario o di operatori diversi, secondo il concetto illustrato nella Fig. 22.11, che rappresenta l'evoluzione del Green Goat, già illustrato, con il raddoppio della potenza del motogeneratore.

Ad esempio, nelle stazioni cittadine, dove è massima la necessità della cella a combustibile, il servizio potrebbe non essere molto pesante in termini di duty-cycle ed in termini di peso (medio) del treno spostato, e quindi si potrebbero considerare mezzi con basso valore del grado di ibridizzazione, mentre nelle stazioni di smistamento la potenza di generazione dovrebbe avvicinarsi di più al valore della potenza di picco dell'azionamento.

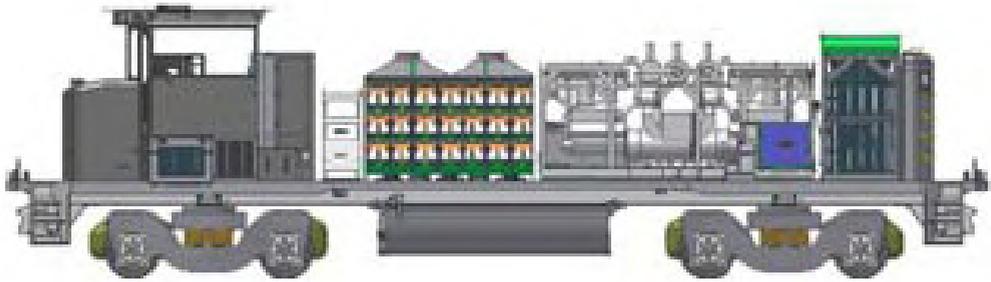


Fig. 22.11 - Il Green Goat nella versione polivalente, locomotiva da treno/locomotore di manovra

Anche dal punto vista dell'accumulo si potrebbero costruire macchine specializzate con sistemi d'accumulo di diversa tipologia. Più precisamente potrebbero essere adottati accumuli elettrici orientati all'energia (basso valore del rapporto Potenza/Energia dell'accumulo) per le macchine che svolgono un servizio leggero, e che quindi possono essere equipaggiate con sistemi cella piccoli, e sistemi orientati alla potenza per le macchine che svolgono un servizio pesante.

Mentre nel primo caso la scelta fatta inizialmente in favore delle batterie per trazione al piombo a vaso aperto può essere senz'altro confermata, nel secondo caso l'uso di un accumulo misto, costituito da batterie dello stesso tipo ma di capacità inferiore, supportate da banchi di supercondensatori, potrebbe essere una interessante alternativa all'uso di batterie orientate alla potenza.

Tutte queste considerazioni sono state riportate nel grafico di Fig. 22.12, che è perciò da intendersi come un grafico generalizzato per locomotori di manovra di potenza compresa tra 600 e 1500 kW.

La curva rappresenta il limite tra le condizioni di funzionamento in condizioni di equilibrio energetico delle batterie tra inizio e fine ciclo, comprese nell'area al di sopra della curva stessa, e la zona di funzionamento che richiede la ricarica alla rete a fine ciclo, secondo il concetto del *plug-in-hybrid*.

Tale concetto potrebbe comunque essere utilmente considerato ed utilizzato, perché in termini economici il kWh dalla rete è probabilmente, nella maggioranza dei casi, più conveniente del kWh autoprodotta da idrogeno.

Anche in termini di impatto globale, e cioè di emissioni di CO₂, la convenienza della generazione "on-board" dipende evidentemente dalle modalità di produzione e distribuzione dell'idrogeno.

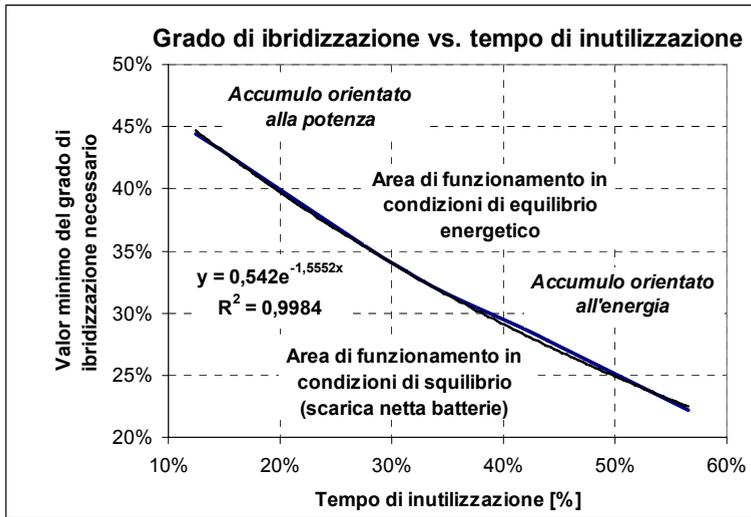


Fig. 22.12 - Rapporto tra la capacità necessaria minima delle batterie e il tipo di servizio svolto dai locomotori (nel range di potenza 600-1500 kW)

22.6 I treni ad alta velocità

L'uso di motori termici in campo ferroviario risponde alle esigenze di economicità di esercizio su quelle linee, dove i flussi di traffico non raggiungono la soglia che giustifica le spese necessarie all'elettificazione.

La trazione termica, seppur economica ed affidabile, appare quindi per molti versi una soluzione di minor valore rispetto alla trazione elettrica, che, consentendo prestazioni più performanti, espande sempre più il suo campo di applicazione.

Le possibilità offerte da una generazione a bordo "pulita", possono però favorire la scelta di non passare all'elettificazione, con una valutazione tecnico-economica che tenga conto non solo dei costi evitati per la realizzazione delle linee e delle centrali di generazione, ma anche della interoperabilità intrinseca di locomotive e convogli di questo tipo e per superare i limiti legati alla presenza della linea elettrica di contatto, che comporta problemi di impatto visivo, di sicurezza, di manutenzione, tanto maggiori questi ultimi quanto maggiore è la velocità del treno.

Il primo motore che si propose come sostituto del diesel fu il turbogas, la cui sperimentazione in ferrovia fu avviata nel secondo dopoguerra (vedi Cap. 5, pagg. 118-119), per arrivare alla realizzazione dei turbotreni francesi RTG ed ETG, messi progressivamente fuori servizio per gli alti consumi.



Fig. 22.13 - Il turbotreno francese ETG

La tecnologia delle macchine dinamiche a fluido compressibile è con il tempo notevolmente migliorata, consentendo oggi di riproporre il turbogas per la motorizzazione elettrica di veicoli di tipo ferroviario. Infatti il turbogas, rispetto ai motori termici volumetrici alternativi, si avvantaggia di una struttura semplice e compatta, minori temperature di picco, ridotte di emissioni di NO_x , possibile funzionamento policombustibile e moto puramente rotatorio, che induce ridotti fenomeni vibratorii. Tutto questo si traduce in potenze molto elevate a parità di peso rispetto al diesel e prestazioni molto buone del treno anche dal punto di vista ambientale, come emissioni e rumore.

Il problema dei turbogas sono i bassi rendimenti ai carichi parziali, che ne rende poco conveniente l'uso nel campo della trazione rispetto al diesel.

Gli sviluppi della tecnologia degli ibridi nel campo automobilistico aprono però anche ai turbogeneratori nuove ed interessanti prospettive anche nel settore dei trasporti su rotaia, perché il sistema di accumulo si fa carico del funzionamento ai carichi parziali, ad esempio all'avviamento, e dei picchi di potenza in accelerazioni. In questo modo i turbogeneratori (conviene frazionare la potenza totale in più macchine) possono operare sempre a pieno carico, e quindi con rendimenti accettabili (nelle macchine più moderne superiori al 30%).

Stante la durata delle fasi di accelerazione di questi treni, dell'ordine dei minuti, il sistema di accumulo elettrico che meglio si presta a sostenere il delta di potenza aggiuntivo per il tempo necessario sono le batterie litio ioni ad altissima potenza specifica, come nell'Hayabusa della Hitachi, ed i volani, caratterizzati da un valore del rapporto Potenza/Energia dell'ordine delle decine, come il volano da 2 MW sviluppato negli Stati Uniti nell'ambito del progetto ALPS del 2002, poi sospeso per le difficoltà incontrate nella commercializzazione del Jet-Train della Bombardier, per il quale era stato studiato (e realizzato).

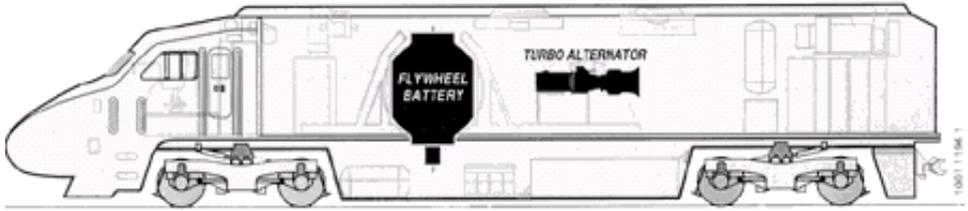


Fig. 22.14 - Il turbotreno AMTRACK ibridizzato (Progetto ALPS)

Nella Fig. 22.14 è visualizzato uno schema della sistemazione e dell'ingombro dei componenti principali del turbotreno ibridizzato.

Potenza ed energia del sistema di accumulo sono in questo caso in un rapporto 20:1 (2 MW, 350 MJ, passando da 15.000 a 7500 g/1'), e di conseguenza il volano consente al treno di accelerare per un massimo di 180" a potenza (dell'accumulo) costante, aumentando gradualmente la potenza del convertitore primario e portandosi in questo modo alla velocità massima che può essere sostenuta dal turbogeneratore da solo (250 km/h).

Durate dell'ordine dei 2-3' per le fasi di accelerazione sono tipiche delle applicazioni ferroviarie, e i volani, con un valore del rapporto Potenza/Energia intermedio tra quello delle batterie (<10) e quello dei supercondensatori (>100), sono particolarmente adatti a queste applicazioni.



Fig. 22.15 - Curve prestazionali del treno Minuetto

Bibliografia

- [1] Trenitalia, DISQS, Ricerca e Sviluppo, “Studio e progettazione di massima di propulsori ibridi innovativi a basso impatto ambientale per l’automotrice diesel Aln668 e il locomotore di manovra D141”, 2005.
- [2] R. Cheli, G. Grande, R. Giglioli, R. Manigrasso, G. Pedè, “Rail-car hybrid trains to reduce fuel consumption and emissions”, 7th World Congress on Railway Research, Montreal 2006.
- [3] Junji Kawasaki, EJR : “Development of a fuel cell- hybrid railcar”, 3rd UIC Railway Energy Efficiency Conference, settembre 2007.

CAPITOLO 23

L'IBRIDO IN AGRICOLTURA

Massimo Ribaldone¹, Bruno Paggi², Samuele Tomasoni³

¹*R&D SDFG Power Train Director*, ²*R&D Concept / Innovation Manager*,

³*R&D Concept / Innovation*

Il continuo accrescimento, in termini di qualità, delle produzioni agricole richiede mezzi sempre più efficienti con costi di esercizio contenuti ed impatto ambientale minimizzato. L'auspicabile incremento della velocità operativa, in linea con la normativa 2003/37/CEE recepita in Italia nel luglio 2005, conduce a ricerche, studi e sperimentazioni sui rendimenti globali dei sistemi meccanici, elettrici ed automatici delle macchine ed a percorrere strade nuove per quanto riguarda la propulsione in campo agricolo.

Offrire alla meccanizzazione agricola la possibilità di disporre di mezzi a propulsione ibrida, che hanno già dimostrato la loro efficacia in altre applicazioni nei confronti dell'impatto ambientale e amplia le possibilità di scelta della motrice agricola consentendo, inoltre, un sensibile risparmio di combustibile ed inedite modalità operative che, con il solo utilizzo del motore endotermico e la tradizionale trasmissione meccanica, non sono allo stato attuale proponibili. L'opportunità di usufruire di una simile innovazione nel settore agricolo, infatti, consente l'utilizzo della trattrice in luoghi nei quali non risulta possibile accedere con propulsori a combustibile e movimentazioni nelle quali il trattore ha necessità di risultare in moto con limitato utilizzo della propulsione, quali ad esempio le operazioni di raccolta, il lavoro in serre o le operazioni in stalla. Una maggior versatilità di queste nuove macchine permetterà di ottimizzare anche i trasporti intermodali in agricoltura, riducendo i tempi morti di trasferimento di prodotto a bordo campo e consentendo spostamenti più rapidi nei trasporti a breve-medio raggio, nel completo rispetto della sicurezza stradale. Lo sviluppo di nuove conoscenze e tecnologie, industriali ed operative, darà la possibilità di aumentare il livello tecnologico delle macchine oggi in produzione, toccando temi di ricerca di grande attualità che riguardano i rendimenti nello sfruttamento delle risorse di combustibile fossile, la riduzione dell'impatto ambientale di macchine per lo più destinate ad operare con prodotti a destinazione alimentare ed ultimo, ma non per questo meno importante, la salute e la sicurezza degli operatori che sempre più spesso fanno un uso intensivo del veicolo agricolo.

Allo stato attuale, la trasmissione in un veicolo agricolo, risulta essere elemento determinante nella meccanica del mezzo stesso e spesso risulta essere l'elemento di maggiori perdite di rendimento e vincolante in termini di ingombri.

Con il duplice obiettivo di massimizzarne l'efficienza e di elevarne le capacità produttive, l'introduzione di una trasmissione ibrida su un veicolo agricolo, porterà con se tutti i pregi che i motori elettrici forniscono, integrando le esigenze operative in agricoltura con le più moderne tecnologie, realizzando una trasmissione a variazione continua efficiente e versatile allo stesso tempo, eliminando dunque le limitazioni legate alla tradizionale trasmissione meccanica.

Allo stato dell'arte attuale si possono prevedere tre schemi principali di massima di trasmissione ibrida:

- schema "tipo CVT";
- schema parallelo;
- schema serie.

23.1 Vantaggi dell'ibrido in agricoltura

Nell'impiego quotidiano del trattore si possono incontrare situazioni in cui è richiesta una potenza supplementare al motore rispetto alle condizioni nominali di normale funzionamento. Tali circostanze si possono verificare in due conduzioni ben distinte: trasporto su strada (ad alta velocità) o lavoro in campo (bassa velocità ma massima potenza richiesta).

Nel trasporto su strada, magari con al gancio rimorchi pesanti (Fig. 23.1), situazioni particolari quali possono essere ad esempio il superamento di un cavalcavia od il sorpasso di un veicolo lento possono richiedere uno spunto superiore al motore al fine di evitare una caduta del regime motore obbligando ad effettuare un cambio marcia.



Fig. 23.1 - Trattore in attività di trasporto su strada con rimorchio



Fig. 23.2 - Trattore impegnato in operazioni di PTO (fresatura)

Anche nelle lavorazioni in campo si può verificare la stessa necessità di uno spunto da parte del motore (terreno particolarmente tenace, ad esempio) ma in situazioni completamente diverse come può essere la fase di lavoro con la PTO a bassa velocità ma alla massima potenza, come può essere la fresatura (Fig. 23.2).

Inoltre, l'adozione di trasmissioni ECO, ovvero trasmissioni che permettono di raggiungere la velocità massima ad un numero limitato di giri motore mediante l'adozione degli ultimi rapporti di trasmissione "lungi", con l'obiettivo di ridurre i consumi di carburante nelle fasi di trasferimento su strada, ha peggiorato il comportamento nei transitori, penalizzando in particolar modo i tempi di ripresa per raggiungere la massima velocità.

Tutti questi fattori obbligano il conducente a scalare una o più marce per superare alla riduzione di giri motore che si genera quando il trattore, dotato di motore endotermico con mappatura "tradizionale", si trova a dover superare un ostacolo od a far fronte ad una richiesta improvvisa e momentanea di potenza supplementare alla PTO; il tutto si ripercuote fortemente sulla produttività ed incide notevolmente sui consumi.

Per ovviare a tutte queste problematiche è stato introdotto il boost, ovvero un sistema a controllo elettronico che, in caso di necessità, agisce sul regolatore elettronico del motore variando la mappatura dello stesso e permettendo di incrementare le prestazioni (aumento della coppia e della potenza di circa il 10% rispetto alle condizioni nominali) per un tempo sufficiente a superare quelle situazioni nelle quali le prestazioni nominali del motore non sono sufficienti (Fig. 23.3).

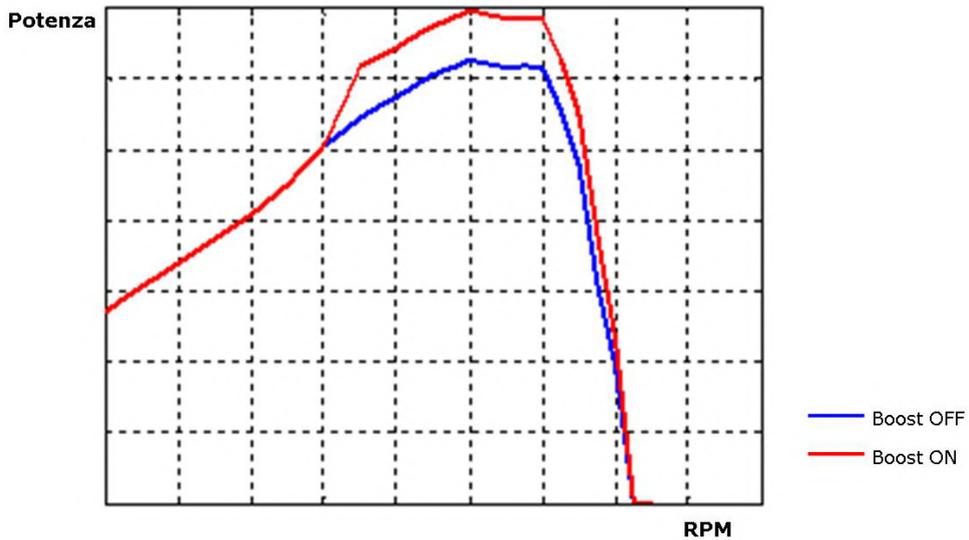


Fig. 23.3 - Confronto curve potenza motore con boost e senza boost

Con l'adozione della motorizzazione ibrida non risulta più necessario l'impiego del boost tradizionale che agisce sul motore endotermico ma è possibile sfruttare le doti dei motori elettrici di fornire, per brevi periodi di tempo, una potenza massima pari al doppio della potenza nominale (che possiamo definire "boost elettrico"). In tal modo è possibile superare l'ostacolo senza variazione del regime motore del propulsore endotermico ma sfruttando solamente le variazioni di coppia e potenza delle macchine elettriche (Fig. 23.4). In aggiunta, è possibile sfruttare l'alta coppia messa a disposizione dai motori elettrici a basso numero di giri per il superamento di ostacoli a bassa velocità nelle fasi di lavoro in campo.

Altro vantaggio che le macchine elettriche possono fornire è dato dalla variazione continua della velocità, pur mantenendo il motore endotermico a regime costante (regime impostato al valore per cui si raggiunge il punto di massima efficienza del motore endotermico) limitandone dunque i consumi e le emissioni inquinanti.

Una condizione particolare in cui può venire utile la regolazione elettrica della velocità può essere quella di mantenere costante la velocità di avanzamento del trattore al variare della pendenza del terreno e del carico, requisito che, ad esempio, risulta fondamentale nelle operazioni di concimazione, fertilizzazione e diserbo del terreno o nelle fasi di distribuzione di fitofarmaci sulle colture (frutteti e vigneti in particolare), dove è richiesto di mantenere costante la velocità di avanzamento per ottenere una distribuzione uniforme del prodotto su tutto l'appezzamento (Fig. 23.5).

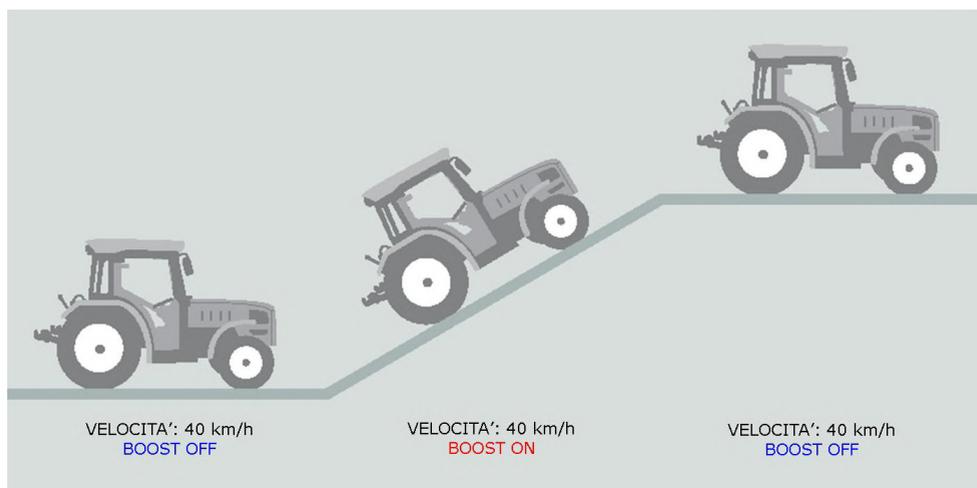


Fig. 23.4 - Intervento del boost nel caso di incontro di ostacolo



Fig. 23.5 - Distribuzione di fitofarmaci

Ulteriore vantaggio derivante dall'adozione della propulsione ibrida è la possibilità di funzionamento in solo elettrico; tale opportunità può essere sfruttata nelle attività che si svolgono in ambienti chiusi come possono essere serre e tunnel per la coltivazione di ortaggi (Fig. 23.6), capannoni per lo stoccaggio di prodotti agricoli quali cereali, fieno ecc. (Fig. 23.7) od in prossimità di capi di bestiame come stalle ed allevamenti intensivi (Fig. 23.8).



Fig. 23.6 - Lavorazione in serra



Fig. 23.7 - Movimentazione materiali



Fig. 23.8 - Lavorazione in stalla (distribuzione mangime unifeed)

Si può anche pensare un impiego della trattrice ibrida, magari in funzionamento solo elettrico o con regime del motore endotermico ridotto, nelle varie attività che vengono svolte nei centri cittadini, operazioni quali, ad esempio, la manutenzione del verde pubblico o interventi di pulizia delle strade (Fig. 23.9).



Fig. 23.9 - Attività di manutenzione del verde pubblico e pulizia cittadina

23.2 Schema ibrido “tipo CVT”

La versione più semplice, per quanto concerne lo schema costruttivo, di una macchina agricola a propulsione ibrida è quella dell’adozione dell’attuale schema logico utilizzato nei trattori con trasmissione a variazione continua (i cosiddetti CVT). Attualmente, infatti, le trasmissioni CVT si compongono, a valle del motore endotermico, di riduttore epicicloidale e due macchine idrauliche. Il riduttore epicicloidale, che riceve il moto dall’albero primario in uscita dal motore, ha il compito di trasmettere il moto alle ruote (mediante il portasatelliti) ed a una macchina idraulica (tramite la corona dentata esterna), la

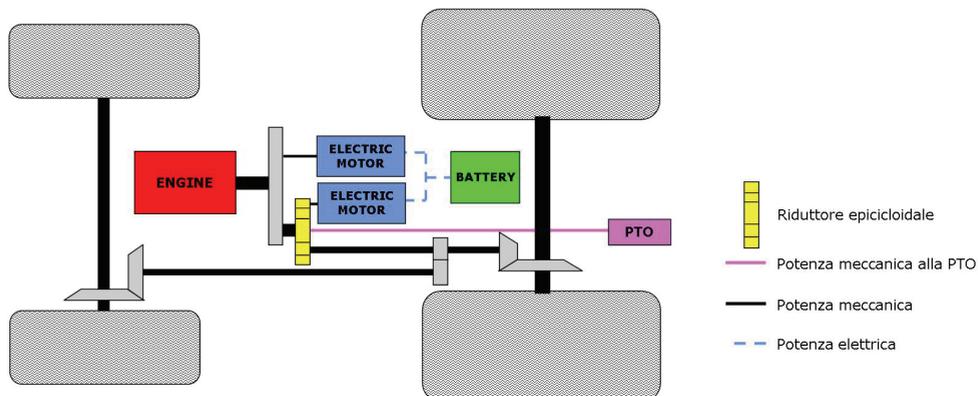


Fig. 23.11 - Schema logico trasmissione ibrida "tipo CVT"

Di contro, l'applicazione dello schema logico "tipo CVT" richiede macchine elettriche importanti in termini di potenza e conseguentemente di dimensioni elevate; ne deriva che anche le batterie devono avere elevate capacità con conseguente aumento del numero delle stesse influenzando gli ingombri al fine di garantire la possibilità di funzionamento in solo elettrico.

23.3 Schema serie

I trattori di attuale concezione (Fig. 23.12) risultano essere vincolati, nella forma e nelle dimensioni, dalla disposizione del motore (anteriore longitudinale) e dal collegamento diretto trasmissione-motore; questa disposizione obbliga i progettisti a collocare la cabina in posizione arretrata ed in corrispondenza dell'asse posteriore, a svantaggio sia della visibilità anteriore (cofano anteriore alto) sia del comfort di guida (cabina collegata, seppur mediante ammortizzatori o sospensioni, al ponte posteriore rigido).

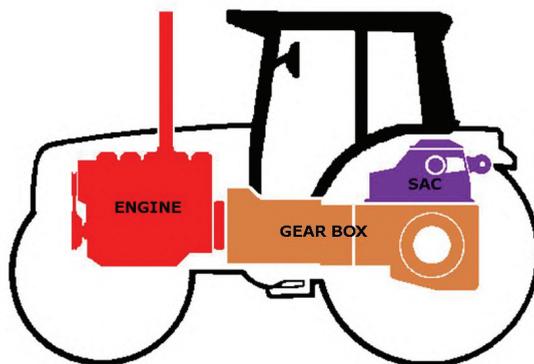


Fig. 23.12 - Lay-out trattore tradizionale

Inoltre, tale soluzione, implica vincoli dimensionali sia in termini di altezza massima che di lunghezza massima; fortemente vincolato risulta essere il passo del veicolo, parametro fondamentale e particolarmente sentito per trattori specialistici da frutteto/vigneto che condiziona notevolmente i raggi di volta e conseguentemente la manovrabilità del trattore stesso.

L'adozione della propulsione ibrida con schema serie, permette di portare alla completa revisione del concetto attuale di trattore ed ha come risultato una macchina che adotta nuovi schemi costruttivi sfruttando l'assenza di un collegamento meccanico obbligato tra motore endotermico e ruote. L'adozione di una propulsione ibrida serie permette, infatti, di svincolarsi dagli obblighi progettuali che legano motore e trasmissione e creare un layout del trattore che sia funzione dell'ambito di impiego del trattore (trattori specialistici, trattori da serra, trattori utility tuttfare per l'impiego in azienda, comunali per l'impiego in città).

Lo svincolarsi dal tradizionale layout può permettere quindi di realizzare una macchina agricola a telaio portante su cui collocare il propulsore endotermico, di ridotte dimensioni, in posizione ottimizzata (anche trasversale) annullando gli ingombri del cofano e permettendo di ricercare poi la posizione migliore per la cabina (magari frontale avanzata), non più vincolata in posizione arretrata dal motore, a tutto vantaggio della visibilità nella parte anteriore e laterale, oltre a garantire una ridotta altezza massima, tutte caratteristiche peculiari per un trattore specialistico impiegato nel lavoro tra i filari (Fig. 23.13) con attrezzature ad attacco frontale (cimatrice, spollonatrice ecc.) od ad attacco ventrale (rincalzatore, zappatrice interfilare ecc.).



Fig. 23.13 - Trattore provvista di attrezzatura frontale (cimatrice)



Fig. 23.14 - Trattore provvista di attrezzatura posteriore (trinciatrice)

La parte posteriore, liberata dalla presenza vincolante della cabina dei trattori attuali, può essere occupata dal solo gruppo trasmissione e dagli organi di collegamento alle attrezzature posteriori (PTO, impianto idraulico, SAC) riuscendo a garantire un profilo posteriore della macchina basso ai fini della visibilità sull'attrezzatura posteriore (Fig. 23.14).

Per quanto riguarda la trasmissione, questa può essere realizzata con l'impiego di due motori elettrici per le ruote posteriori (uno per ogni ruota) ed una sola macchina elettrica per la sala anteriore che dunque resterebbe identica a quella attuale ricevendo il moto dal motore elettrico dedicato (Fig. 23.15).

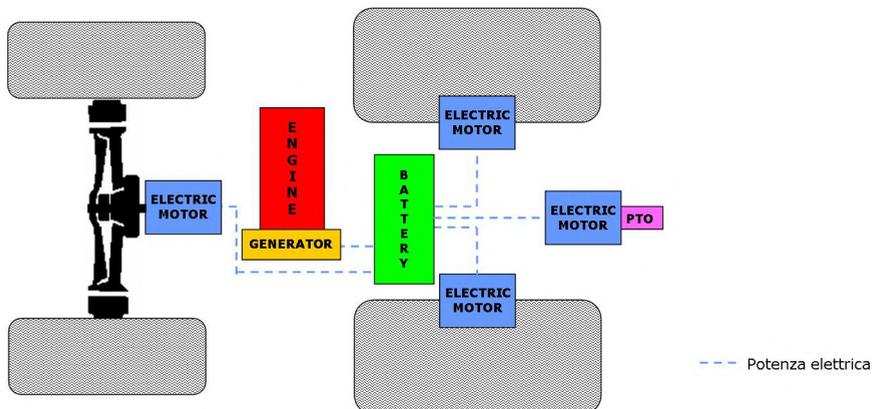


Fig. 23.15 - Schema logico trasmissione ibrida serie (versione con tre macchine elettriche)

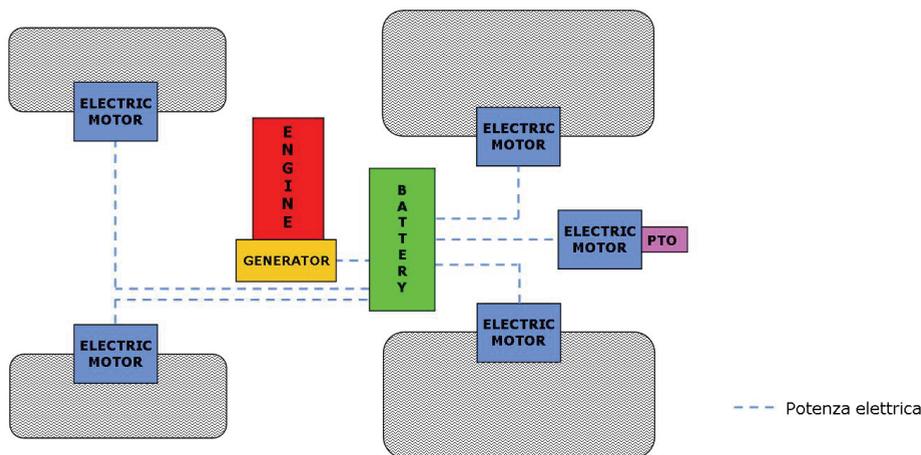


Fig. 23.16 - Schema logico trasmissione ibrida serie (versione con quattro motoruote)

Soluzione molto più innovativa, per il campo trattorisitico, risulta essere invece quella dell'impiego di motori elettrici per ogni ruota (motoruote). Quest'ultimo schema risulta essere quello con le maggiori possibilità di sfruttamento delle doti dei motori elettrici e rivoluzionario per quanto riguarda il concetto di trattore (Fig. 23.16).

Innumerevoli risultano i vantaggi che si possono ottenere da tale schema di propulsione. Come primo vantaggio possiamo indicare quello di *downsizing* del motore endotermico che deve assolvere al solo compito di azionamento del generatore; tale impiego permette di far lavorare il motore endotermico in condizioni stazionarie nel punto di funzionamento di massima efficienza non essendo più costretto ad eseguire transitori, quali accelerazioni e decelerazioni, operazioni che invece vengono assolte dalla motorizzazione elettrica. Questa condizione di lavoro permette di ridurre i consumi specifici e conseguentemente l'impatto ambientale, oltre a permettere una variazione continua di velocità.

Lo schema con quattro motoruote permette di ottenere un'elevata versatilità d'uso che deriva dalla propulsione elettrica, ottenendo macchine operatrici agricole con manovrabilità e prestazioni attualmente non ottenibili con i tradizionali sistemi di propulsione a trasmissione meccanica.

Svincolare la trazione dalla componente meccanica del motore endotermico e adottare motori elettrici alle ruote (motoruote) permette di pensare al controllo ed alla gestione della velocità di rotazione delle singole ruote lavorando sull'elettronica che governa i motori elettrici. In termini pratici, la differenza di velocità di rotazione tra le ruote dello stesso asse, ed in particolar modo per quello posteriore, ridurrebbe il raggio di volta della trattoria agevolando le

manovre di volta a fine campo, in specifico nelle lavorazioni tra i filari. Inoltre, si ridurrebbe l'impiego dei freni come aiuto alla sterzata, evitando il fastidioso fenomeno di bloccaggio della ruota interna alla curva con il conseguente danneggiamento del manto erboso (ad esempio nelle manovre di uscita/rientro nei filari in capezzagna, condizione particolarmente sentita per i trattori specialistici).

Oltre ciò, per merito del nuovo schema costruttivo, si può prevedere l'adozione delle ruote sterzanti anche all'asse posteriore non essendo più presente il vincolo derivante dagli ingombri dettati dalla scatola cambio degli attuali trattori; anche tale applicazione garantirebbe un'ulteriore riduzione del raggio di sterzo agevolando notevolmente le manovre, in particolar modo quello con rimorchi al seguito.

Occorre anche osservare che poter disporre della trazione elettrica sulla sala anteriore potrà evitare l'utilizzo di giunti omocineticici ai mozzi ruota anteriori con un ulteriore e considerevolmente incremento delle prestazioni in sterzata, ad oggi fortemente vincolata, in termini di angolo massimo di sterzo, da tale componente meccanico.

Ricordando che, nell'impiego nel vigneto e/o frutteto, la produttività del trattore specialistico si traduce anche nella possibilità di eseguire ridottissimi raggi di sterzata, in modo di passare – al limite – da un filare al successivo senza manovra, le soluzioni proposte appaiono concretamente realizzabili e applicabili su tali classi di macchine (Fig. 23.17).



Fig. 23.17 - Trattore con rimorchio impegnata in manovre a fine campo

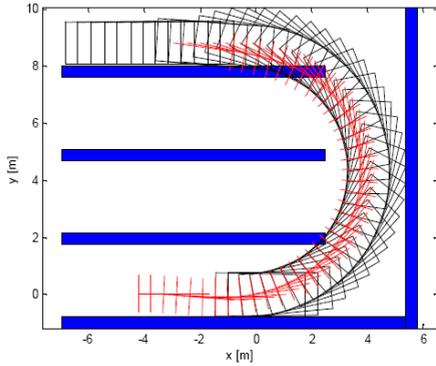


Fig. 23.18.a

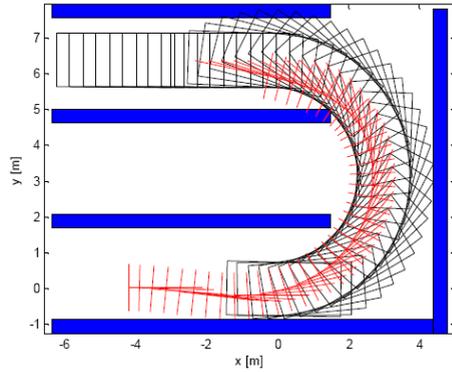


Fig. 23.18.b

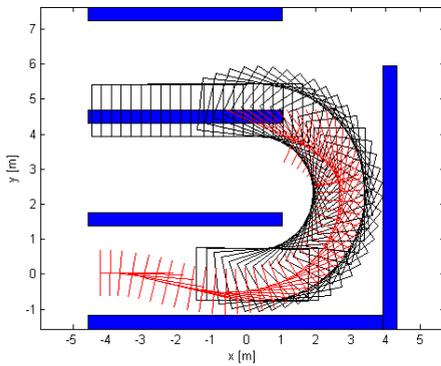


Fig. 23.18.c

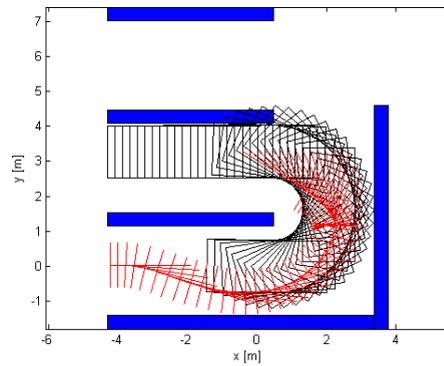


Fig. 23.18.d

La schematizzazione di tali vantaggi in termini di raggio di volta è riportata in Fig. 23.18 dove si confrontano le traiettorie e gli ingombri in fase di manovra tra i filari di una trattrice tradizionale con rimorchio al traino (Fig. 23.18.a) con le innumerevoli soluzioni ottenibili con la trattrice in configurazione ibrida: dapprima con tre macchine elettriche e sala anteriore tradizionale (Fig. 23.18.b), successivamente con quattro motoruote e sterzata del solo asse anteriore (Fig. 23.18.c) ed infine con sterzata integrale sulle quattro ruote (Fig. 23.18.d).

L'adozione delle motoruote permette inoltre l'eliminazione del gruppo bloccaggio differenziale e della DT (doppia trazione). Nel primo caso lo slittamento di una ruota rispetto alle altre può essere controllato mediante incremento/decremento della coppia trasmessa alle ruote dai motori elettrici tramite la gestione elettronica degli stessi. Per quanto riguarda la DT, vengono utili i motori alle ruote anteriori sia per l'inserimento/disinserimento automatico della trazione integrale, sia per il controllo dell'anticipo; sarà dunque possibile regolare la differenza di velocità tra ruote anteriori e ruote posteriori in funzione del tipo di lavorazione in corso (ad esempio incrementando la velocità delle

ruote anteriori rispetto alle posteriori in lavorazioni in cui è richiesta particolare direzionalità e trattività dell'asse anteriore come possono essere l'aratura e l'erpicoltura).

Altro vantaggio dell'utilizzo di un motore elettrico per ogni ruota è poter sfruttare il recupero di energia in fase di frenata servendosi delle macchine elettriche come generatori, andando così a ricaricare le batterie; inoltre, sviluppando in modo adeguato le strategie di controllo inerenti il sistema di frenatura elettrica, è possibile ottenere un sistema ABS che controlli ed eviti l'eventuale bloccaggio delle ruote in frenata, fenomeno particolarmente pericoloso ad alte velocità con rimorchi al seguito.

Di contro, l'adozione dello schema serie presenta il problema della gestione della PTO; quest'ultima, infatti, viene utilizzata sia in attività in cui è richiesta un'elevata potenza (fresatura, erpicatura con erpici rotanti ecc.), sia in attività in cui la potenza richiesta è minima (soffiatori, atomizzatori, voltafieno ecc.).

Conseguentemente, predisporre un motore elettrico dedicato solo all'azionamento della presa di forza, richiede un dimensionamento dello stesso sulla potenza massima richiesta ma con ovvi problemi di dimensioni della macchina elettrica e dalla richiesta di un'elevata capacità del pacco batterie per un possibile funzionamento in solo elettrico. Il vantaggio di una PTO elettrica può essere però quello di avere la variazione continua della velocità di rotazione e quindi di adattarsi alle differenti necessità delle attrezzature ed alle differenti condizioni di lavoro, variabili funzione della velocità di avanzamento della trattrice o del carico richiesto. Una valida alternativa può venire dal collegamento meccanico diretto tra motore endotermico e PTO, come avviene sugli attuali trattori, eliminando il motore elettrico supplementare dedicato ma con la perdita dei vantaggi derivanti dalla variazione continua di velocità.

23.4 Schema parallelo

L'adozione della propulsione ibrida parallelo risulta essere uno schema altamente efficace dal punto di vista dei rendimenti ma poco invasivo dal punto di vista del layout macchina, che viene mantenuto il più vicino possibile all'attuale, permettendo di affiancare al tradizionale schema "motore endotermico-trasmissione-ruote" lo schema "motore elettrico-trasmissione-ruote" (Fig. 23.19). In particolare, il layout parallelo, permette di trasmettere coppia alle ruote proveniente sia dalle macchine elettriche che dal propulsore endotermico.

In generale, nelle trasmissioni ibride parallelo, il bilanciamento tra motore elettrico e termico, in termini di potenza erogata, è a vantaggio del motore endotermico; il motore endotermico risulta essere la parte dominante del sistema fornendo gran parte della potenza necessaria mentre la macchina elettrica ha il solo scopo di fornire potenza supplementare nei momenti di necessità.

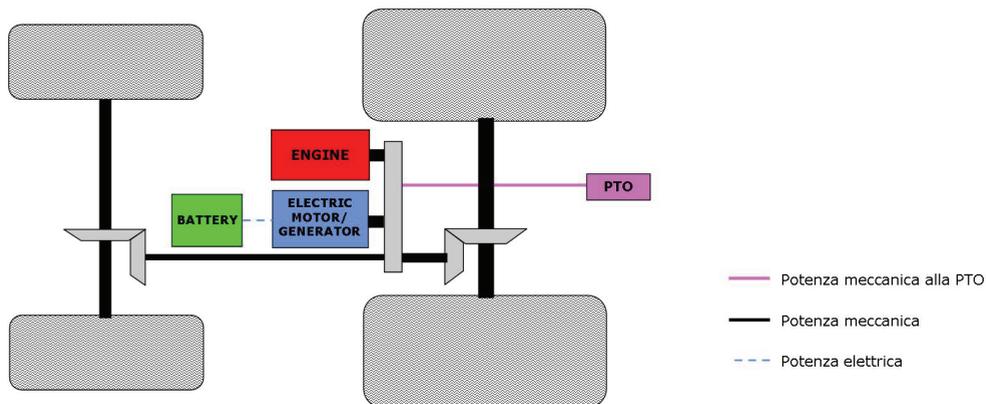


Fig. 23.19 - Schema logico trasmissione ibrida parallelo

Da sottolineare che, anche in questa configurazione, è possibile il funzionamento in modalità solo elettrico, per impieghi a bassa potenza, permettendo l'utilizzo del trattore in ambienti chiusi, come ad esempio stalle e serre.

Uno schema del genere ha il vantaggio di permettere un *downsizing* del motore in quanto, come già accennato, si adoperano le macchine elettriche per sopprimere alle richieste di coppia/potenza supplementare che si possono incontrare nel normale utilizzo in campo e in strada (boost elettrico). Il *downsizing* del motore endotermico, determinato dalla riduzione di coppia massima e potenza massima richieste al propulsore, porta dunque alla conseguente riduzione delle dimensioni dello stesso a tutto vantaggio dei consumi, delle emissioni, con abbattimento della rumorosità, aumentando di conseguenza il comfort per il conducente. Questi obiettivi sono ulteriormente migliorabili mantenendo il motore endotermico ad un regime di giri costante e ridotto, ovvero nelle condizioni di ottimo funzionamento, in quanto le variazioni di velocità richieste sono fronteggiate dalle macchine elettriche.

Dal grafico riportato in Fig. 23.20 è possibile notare il principio di funzionamento appena descritto; in particolare, la curva di potenza totale disponibile si compone sia della curva di potenza fornita dal motore endotermico che dal supplemento di potenza fornito dal motore elettrico con il "boost elettrico".

Ancor più interessante è l'analisi delle curve di coppia (Fig. 23.21); in questo caso, oltre ad un incremento del valore di coppia massima, si nota che la coppia è resa disponibile su tutto l'arco di funzionamento del veicolo. In particolare, per RPM bassi, la coppia è fornita per la quasi totalità dal motore elettrico (peculiarità dei motori elettrici di fornire alta coppia ad un basso numero di giri) mentre, all'aumentare del numero di giri, cresce la coppia messa a disposizione dal motore endotermico mentre diminuisce quella fornita dal motore elettrico.

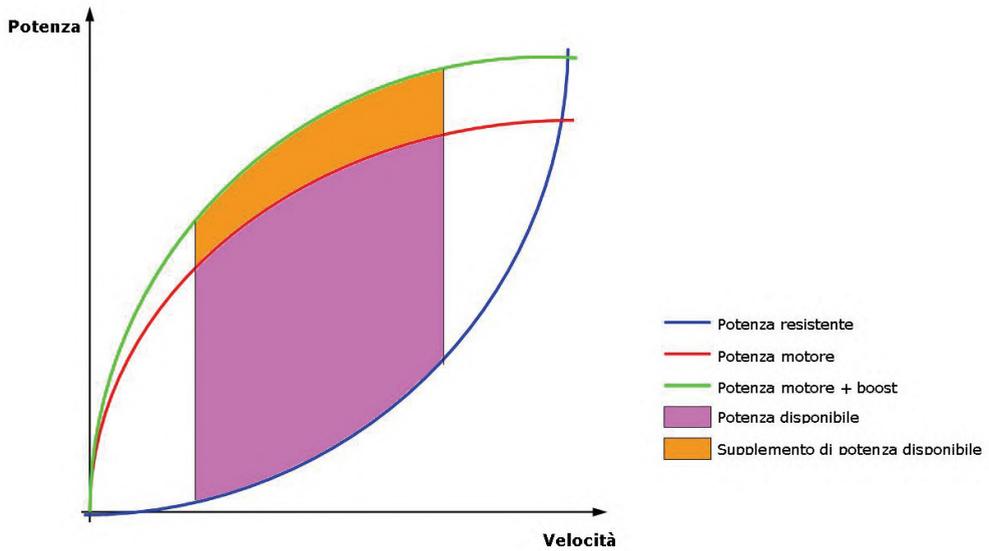


Fig. 23.20 - Curve di potenza disponibile e potenza resistente

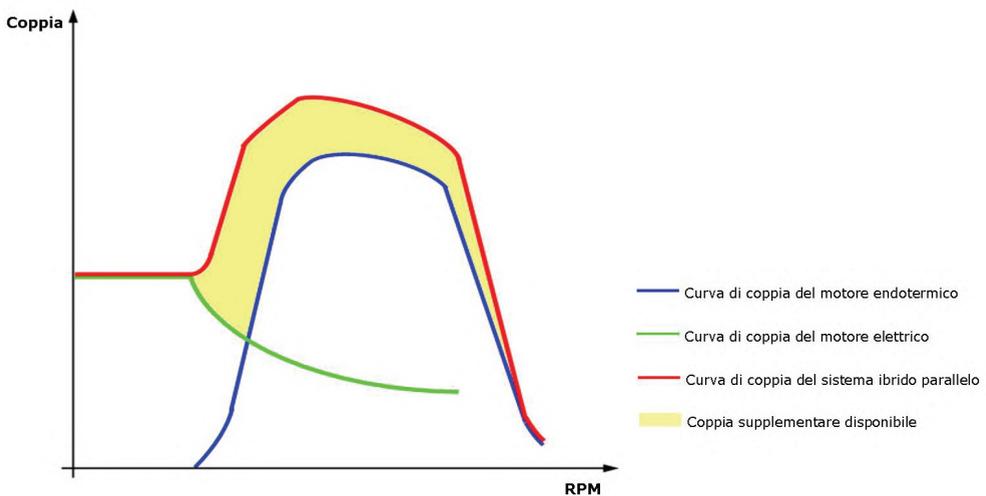


Fig. 23.21 - Curve di coppia

Lo schema parallelo permette anche di ridurre il numero di marce all'interno della trasmissione, mantenendo eventualmente solo la distinzione tra gamme di lavoro e gamme di trasporto.

L'assenza della variazione di velocità offerta dal cambio marcia è fronteggiata, come già accennato, dall'estrema elasticità dei motori elettrici e dall'ampio range di utilizzo di cui tali motori dispongono.

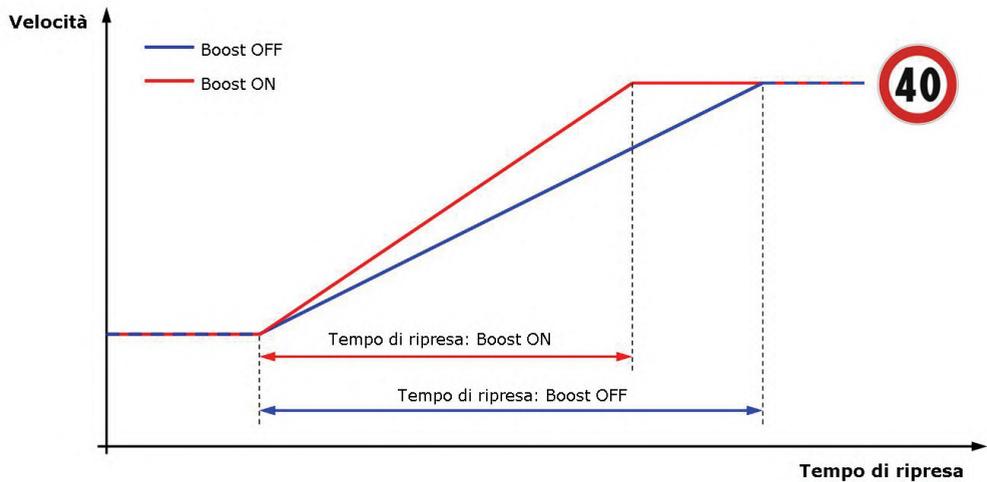


Fig. 23.22 - Confronto tempi di ripresa boost ON – boost OFF

Si può ulteriormente pensare di allungare i rapporti di trasmissione nelle marce da trasporto (rapporti ECO), superando alle problematiche legate alla fase di ripresa, riducendo il tempo della stessa per raggiungere la velocità massima mediante l'utilizzo del "boost elettrico" e sfruttando le già citate caratteristiche dei motori elettrici di fornire potenza supplementare pari al doppio rispetto alle condizioni nominali, seppur per breve tempo (Fig. 23.22).

Un ulteriore affinamento dell'ibrido parallelo risulta essere l'accoppiamento della trasmissione idraulica (tipo CVT) con la trasmissione elettrica (Fig. 23.23).

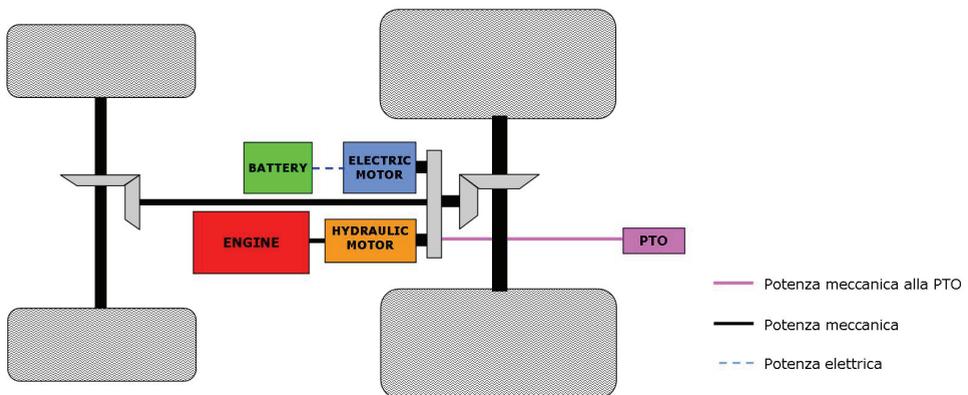


Fig. 23.23 - Trasmissione ibrida/idraulica parallelo

La soluzione ha come obiettivo di mantenere il più costante e ridotto possibile il regime di giri del motore endotermico e sfruttare il “boost elettrico” per i picchi di potenza in transitori brevi, in particolare per quelle operazioni di movimentazione di materiali all’interno dell’azienda in cui sono richiesti alti picchi di potenza ma per tratti relativamente brevi, come ad esempio l’utilizzo del caricatore frontale o le manovre di inversione di marcia.

L’applicazione sopra descritta permetterebbe un miglioramento globale dei rendimenti della propulsione idraulica. In dettaglio, la logica di funzionamento delle trasmissioni CVT è basata su una funzione in grado di eseguire un’ottimizzazione congiunta dei rendimenti di motore endotermico e motore idraulico cercando di raggiungere, per le differenti condizioni di lavoro, quella condizione di ottimo funzionamento che minimizzi le perdite globali del sistema (e quindi i consumi) massimizzando i rendimenti; va sottolineato che tale punto, non obbligatoriamente, coincide con i punti di ottimo rendimento dei componenti presi singolarmente.

Tale logica risulta però avere delle limitazioni nei transitori, ovvero nelle fasi di variazione di carico a cui il trattore è sottoposto; in questi casi si ha variazione del punto di funzionamento ottimo e conseguentemente il sistema cerca di raggiungere il nuovo punto di funzionamento ottimizzando ed accordando tra loro le prestazioni dei singoli componenti.

L’accoppiamento della trasmissione CVT con la propulsione elettrica permetterebbe, dal lato idraulico, di mantenere fisso il punto di funzionamento e coincidente con il punto di ottimo rendimento e massima efficienza, mentre sarebbe demandata alla parte elettrica la fase di gestione dei transitori.

CAPITOLO 24

SCOOTER IBRIDO PARALLELO “HYSCOOTER - HYS”

Luca Carmignani *, Massimo Ceraolo **

* *Piaggio & Co SpA*, ** *Università degli Studi di Pisa*

24.1 Acronimi

Nel presente capitolo si è cercato di limitare l'uso degli acronimi, che sono stati comunque definiti ad ogni utilizzo.

Gli acronimi introdotti sono stati ricavati dalla terminologia corrispondente in lingua italiana; quelli che hanno anche una certa diffusione internazionale, per contro, sono stati mantenuti nella loro versione derivante dall'espressione estesa in inglese.

Per una maggiore chiarezza se ne riporta qui un elenco completo, contenente anche l'espressione inglese da cui essi sono derivati.

CVT (Continuously Variable Transmission): trasmissione a variazione continua

CC (Centrifugal clutch): frizione centrifuga

EMC (Electromechanical Converter); convertitore elettromeccanico

EMS (Energy Management System): sistema di gestione energetica

EPR (Electronic Power Contitioner): Convertitore elettronico (invertitore bidirezionale).

ICE (Internal Combustion Engine): Motore a Combustione Interna

ZED (Zero Emission Drive) Marcia in modalità “puramente elettrica”, quindi con motore a combustione interna spento e emissioni nulle

24.2 Introduzione

Un'importante esperienza nel campo dei veicoli ibridi in Italia si è svolta in Toscana, frutto di una collaborazione proficua fra l'Università di Pisa e la Piaggio & Co SpA.

L'esperienza è originata da uno studio preliminare svolto in una tesi di laurea seguita congiuntamente da relatori dell'Università di Pisa e della Piaggio, cui è seguita la creazione di un primo ed un secondo prototipo (denominati “Hyscooter”), che hanno dimostrato la validità dell'idea e le potenzialità di realizzazione industriale.

Successivamente a questa attività congiunta su motorizzazioni 50 cc, la Piaggio ha deciso di proseguire con lo sviluppo industriale di un motoveicolo ibrido di media cilindrata da immettere sul mercato, sviluppo che porterà nel 2009 all'introduzione sul mercato del primo scooter ibrido al mondo (MP3 125ie Hybrid).

Questo capitolo traccia le principali tappe dell'attività di ricerca congiunta e descrive taluni aspetti tecnici dei prototipi realizzati, sulla base dei quali sono state successivamente sviluppate le caratteristiche definitive dei veicoli da Piaggio.

24.3 L'idea iniziale

L'idea inizialmente sviluppata per la realizzazione dello scooter ibrido era quella di valutare se fosse possibile ottenere un efficace veicolo ibrido con interventi ridotti sullo schema propulsivo in uso sugli scooter esistenti.

Il veicolo ibrido avrebbe dovuto avere le seguenti caratteristiche di base:

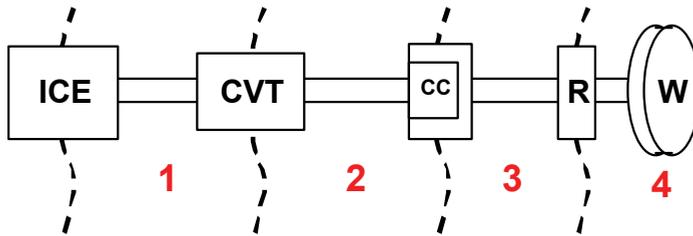
1. incremento sensibile di potenza e coppia per migliorare le prestazioni dinamiche
2. consumi di combustibile inferiori a quelli di partenza
3. costi di esercizio e di gestione inferiori a quelli di partenza
4. possibilità di funzionare in "modalità puramente elettrica" (ZED), con motore a combustione interna spento e quindi con emissioni gassose nulle e grande silenziosità
5. possibilità di ricaricare le batterie anche da una normale presa di corrente elettrica a 230 V.

Naturalmente questa iniziale indicazione imponeva in maniera pressoché automatica che il veicolo fosse un ibrido di tipo "parallelo", in quanto questo tipo di veicoli ibridi, a basso grado di ibridazione, possono essere immaginati (e realizzati) come un'evoluzione dei veicoli tradizionali, con la sola aggiunta della propulsione elettrica, la cui coppia si va a sommare a quella meccanica, al sistema di partenza.

I possibili interventi che si sono inizialmente prospettati possono essere discussi con riferimento alla Fig. 24.1.

La Fig. 24.1 mostra, in forma molto semplificata ma sufficienti agli scopi che qui si prefiggono, uno schema del power train originario.

La conversione in veicoli ibrido parallelo di un power train di questo genere può essere in principio effettuata connettendo il rotore di una macchina elettrica in un punto qualunque della linea d'asse che dal motore a combustione interna va fino alle ruote.



| | |
|-------------|---|
| ICE | motore a combustione interna (Internal combustion engine) |
| CVT: | Trasmissione a variazione continua (Continuously variable transmission) |
| CC: | Frizione centrifuga (Centrifugal clutch) |
| R: | Riduttore |
| W: | Ruota (Wheel) |

Fig. 24.1 - Schema semplificato del power train dello scooter originario

In particolare si possono effettuare le seguenti considerazioni funzionali:

- l'installazione nella zona 1, fra l'ICE e il cambio a variazione continua dal punto di vista funzionale comporta il dimensionamento della stessa per le velocità di funzionamento dell'ICE, e consente un agevole avviamento elettrico dell'ICE stesso; non consente però la marcia come veicolo solo elettrico, in quanto in tal caso sarebbe necessario trascinare con la macchina elettrica l'ICE, il che è inammissibile. Questa installazione non consente quindi il soddisfacimento della caratteristica richiesta sopra elencata al n. 4;
- l'installazione nella zona 2 ha a comune con quella nella zona 1 l'impossibilità di soddisfare la specifica n. 4, con in più un campo di operativo di velocità tale da comportare pesi e dimensioni della macchina elettrica superiori quella del precedente caso;
- l'installazione nella zona 4 comporta l'uso di una macchina elettrica particolarmente lenta, quindi pesante e ingombrante.

In conseguenza di queste considerazioni l'unica soluzione perseguibile è risultata quella dell'installazione nella zona 3.

Occorre però notare che l'installazione in zona 3 non consente la commutazione del funzionamento del veicolo dalla modalità di funzionamento ibrida alla modalità ZED durante la marcia, se non a velocità particolarmente basse, in quanto la frizione di disconnessione fra la zona 2 e 3 è di tipo centrifugo e non pilotato. Questa limitazione può comunque essere agevolmente superata, anche in un successivo sviluppo, sostituendo questa frizione con una frizione pilotabile, ad esempio elettromagneticamente.

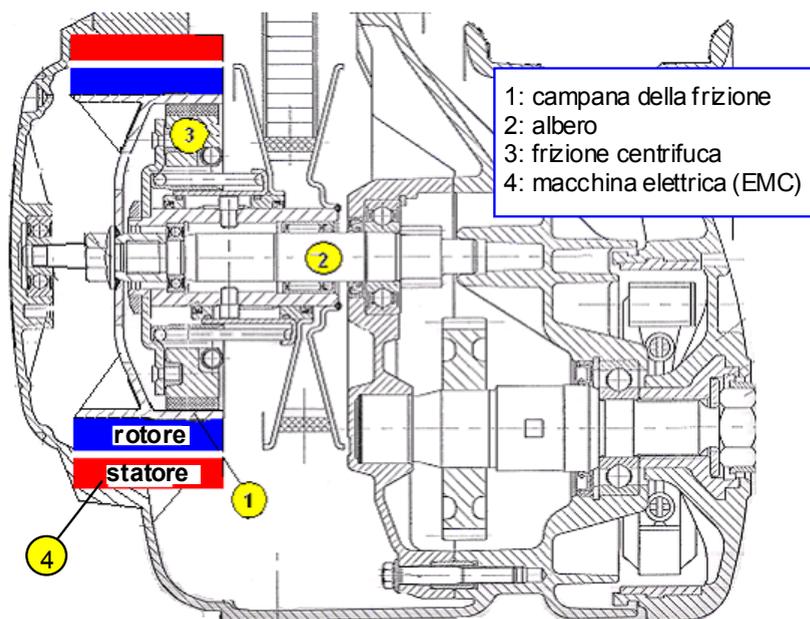


Fig. 24.2 - Possibile sistemazione meccanica della macchina elettrica

All'interno delle possibili installazioni nella zona 3, la localizzazione della macchina elettrica sulla campana della frizione centrifuga è apparsa ben compatibile meccanicamente con la struttura meccanica degli scooter esistenti, come mostrato in Fig. 24.2 (da [1]).

La soluzione costruttiva indicata in Fig. 24.2 presenta la difficoltà di dover abbinare la frizione centrifuga 3, che durante lo slittamento può raggiungere temperature elevate, con una macchina elettrica che, anche in funzione di come viene realizzata, tipicamente non accetta temperature così elevate. Se a ciò si aggiunge anche l'elevato regime di rotazione dell'asse puleggia su cui è calettata la macchina elettrica, ne deriva la ragione per la quale lo schema successivo prevede una nuova disposizione meccanica rispetto a quella originariamente ipotizzata, con spostamento assiale della macchina elettrica verso l'esterno del gruppo motore.

24.4 Logica dell'ibridizzazione introdotta

A partire dalle considerazioni riassunte nel precedente paragrafo, è stata considerata una nuova struttura del power train, che può essere rappresentata come riportato in Fig. 24.3, nella quale con tratto nero sono indicate le parti esistenti del power train, già discusse nella Fig. 24.1, in blu le parti di potenza introdotte per ottenere l'ibridizzazione, in rosso la parte di controllo e gestione energetica.

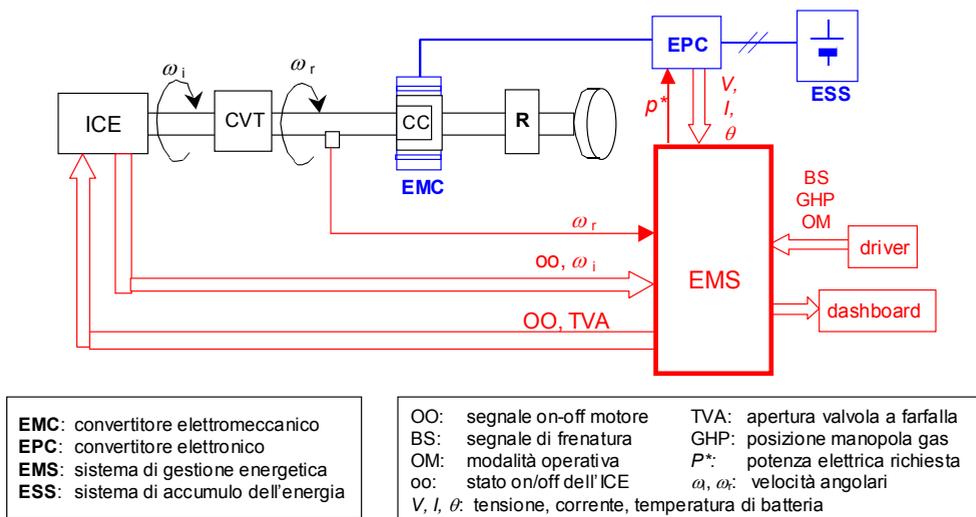


Fig. 24.3 - Schema del power train ibrido con evidenziazione delle parti modificate

Come si vede dalla figura, l'ibridizzazione comporta la possibilità di aggiungere alla coppia che esce dal CVT e che entra nel riduttore finale una coppia, positiva o negativa attraverso la macchina elettrica.

Il valore della coppia trasferita dalla macchina elettrica è determinato dal controllo del convertitore elettronico EPC, il quale a sua volta riceve il set-point di potenza P^* dal sistema di gestione energetica EMS e conosce la velocità angolare del primario del riduttore in quanto coincide con la velocità del rotore della macchina elettrica, a sua volta determinata dall'APC stesso.

Un ruolo fondamentale lo riveste in tutti i veicoli ibridi in generale, ed in questo in particolare, il sistema di gestione energetica EMS. Esso riceve dal pilota le informazioni su come la guida deve procedere, ed in base ad esse determina il pilotaggio del convertitore EPC e, attraverso di esso, dell'intero sistema propulsivo del veicolo ibrido, secondo i principi descritti nel Capitolo 10 "Strategie di gestione energetica dei veicoli ibridi" del presente volume.

Una discussione dettagliata dell'interpretazione e del significato dei comandi a disposizione del pilota è svolta nel successivo par. 24.6.

24.5 Scelta dell'azionamento elettrico

La scelta dell'azionamento elettrico utilizzato per la motorizzazione 50 cc è conseguenza delle specifiche tecniche che sono state poste per esso:

1. coppia erogata a velocità nulla capace di consentire l'avviamento dello scooter, pilota incluso, in strada con salita del 15% e accelerazione di 0,5 m/s²;
2. funzionamento a potenza massima di 1,1 kW pressoché costante fino alla massima velocità legale del veicolo, in Italia pari, per i veicoli a combustio-

- ne interna di 50 cc, a 45 km/h;
3. l'azionamento deve essere in grado di tollerare senza danneggiamento velocità del rotore della macchina fino alla massima velocità possibile dal veicolo in condizioni estreme (70 km/h);
 4. la disponibilità di coppia alle varie velocità deve essere possibile sia in erogazione di potenza (coppie positive) che in assorbimento (coppie negative);
 5. la macchina elettrica deve essere limitata in inerzia e occupazione di spazio, adattarsi agevolmente alla preesistente disposizione meccanica del veicolo, produrre basso rumore e vibrazioni.

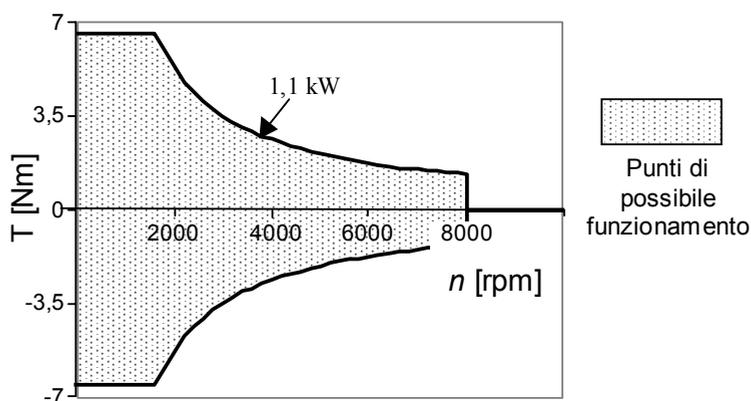


Fig. 24.4 - Caratteristica meccanica ideale dell'azionamento elettrico da realizzare

Il valore prescelto di potenza massima è in grado di fornire un contributo non trascurabile alla propulsione in modalità ibrida, e di consentire un funzionamento soddisfacente del veicolo a velocità massima ridotta (25 km/h) in modalità puramente elettrica.

Le prescrizioni da 1 a 3 implicano le caratteristiche idealizzate coppia-velocità angolare riportate in Fig. 24.4. Come si vede il campo di funzionamento a potenza massima costante, talvolta detta elasticità dell'azionamento, è molto ampio con rapporto fra la velocità massima e minima pari a circa 6.

Per la realizzazione fisica dell'azionamento sono state considerate tre tipologie di macchina elettrica:

- motore a riluttanza commutata;
- macchina asincrona;
- macchina sincrona a magneti permanenti.

La soluzione a riluttanza commutata è interessante in quanto è quella che garantisce i più ampi campi di velocità a potenza costante; è stata però scartata per via dell'elevato livello atteso di rumore e vibrazioni, che in un veicolo che si voleva si distinguesse anche per la sua silenziosità nella marcia puramente elettrica, sarebbe stato molto sconveniente.

La soluzione con la macchina asincrona ha il vantaggio della facilità di controllo e basso costo, ed è stata selezionata solo per il primo prototipo.

Le macchine sincrone a magneti permanenti presentano rispetto alla macchina asincrona il vantaggio di maggior potenza e coppia per unità di massa.

Essa può essere del tipo isotropo o a poli salienti. Quest'ultima realizzazione appare vantaggiosa per il caso in esame in quanto consente maggiori elasticità della caratteristica meccanica, cioè un più ampio tratto a potenza costante.

Pertanto per il secondo prototipo e potenzialmente anche per la soluzione di serie, è stato deciso di scegliere una macchina sincrona a magneti permanenti interni che associa alla coppia di macchina sincrona la coppia di riluttanza dovuta all'anisotropia del rotore indotta dalla presenza dei magneti permanenti.

Con accurata scelta dell'anisotropia della macchina (pari al rapporto fra la reattanza di asse diretto e quella di asse di quadratura), è possibile ottenere caratteristiche meccaniche simili a quelle ideali individuate nella Fig. 24.4, ad es. quelle riportate in Fig. 24.5.

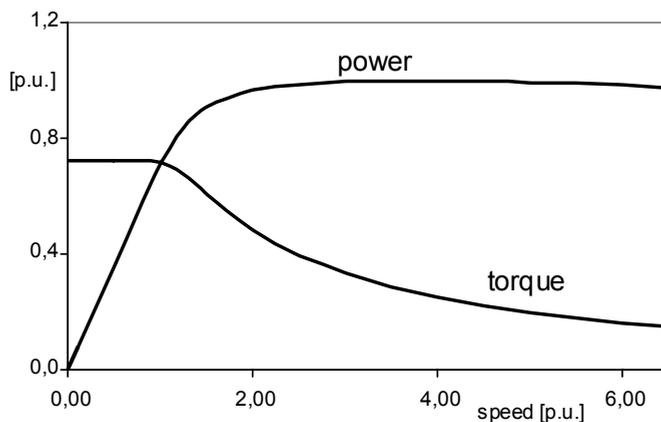


Fig. 24.5 - Caratteristiche meccaniche di una macchina a magneti permanenti a poli salienti tracciate trascurando perdite e saturazione ($I=1$ p.u., $E_0=0,6$ p.u., $X_d=0,5$ p.u., $X_q=1$ p.u.)

24.6 Strategie di controllo

Come in tutti i veicoli ibridi, il principale problema di controllo del power train consiste nel determinare ad ogni istante la ripartizione della potenza necessaria per la propulsione fra le due possibili sorgenti di potenza presenti a bordo. Gli algoritmi di controllo possono essere anche molto complessi, come si è visto nel capitolo su questo argomento del presente volume.

La strategia viene implementata nell'EMS che riceve i comandi del pilota, li interpreta, e da essi deriva i segnali che devono operare le parti meccanica ed elettrica del power train.

Pertanto la descrizione della logica di controllo viene meglio effettuata partendo dalla discussione su come vengono interpretati i comandi del pilota.

24.6.1 Gestione dei comandi del pilota di acceleratore e freno

Come è mostrato chiaramente dalla Fig. 24.3, il sistema di gestione energetica del veicolo riceve i comandi del pilota, li interpreta, e sceglie poi come ripartire la potenza richiesta fra l'azionamento elettrico e il motore a combustione interna.

In questo paragrafo si discutono i possibili modi di interpretare i comandi del pilota.

Per poter valutare come interpretare questi comandi, occorre considerare la disponibilità di coppia delle due fonti presenti a bordo. Per la coppia disponibile attraverso la macchina elettrica si può fare riferimento alla Fig. 24.5, mentre per quella costituita dall'assieme motore a combustione interna-cambio a variazione continua vale una curva avente forma simile, come dal diagramma di Fig. 24.6, tratto da [3].

La caratteristica globale delle due curve di coppia, ottenibile dalla combinazione di quelle relative ai rami meccanico elettrico del power train, tenuto anche conto che la coppia dell'azionamento elettrico può essere positiva o negativa, può essere rappresentata in maniera idealizzata come riportato in Fig. 24.7, nella quale sono indicate anche zone di funzionamento relative a possibili logiche interpretative dei comandi del pilota.

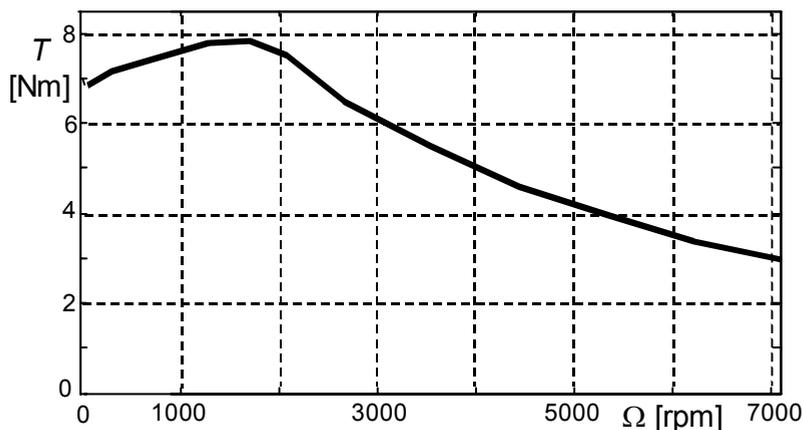


Fig. 24.6 - Andamento della coppia dell'assieme ICE-CVT

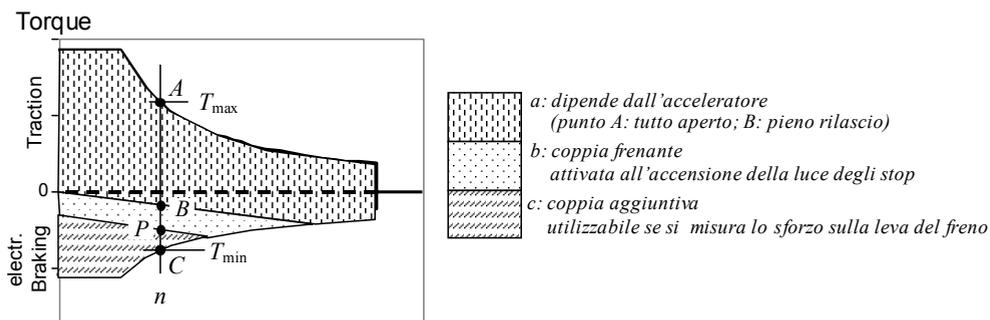


Fig. 24.7 - Coppia richiesta all'azionamento elettrico in funzione dei comandi del pilota

L'area racchiusa dalle due curve della coppia disponibile positiva e negativa sono divise nelle seguenti zone:

- la zona a), durante la quale si sfrutta l'indicazione delle intenzioni del pilota ricavabile dalla manopola dell'acceleratore. Evidentemente, più la manopola è ruotata, maggiore sarà la coppia propulsiva attivata. È interessante notare come si può avere una certa coppia negativa anche senza che il pilota azioni il freno; questo è dovuto all'azione del freno motore, eventualmente potenziato da una lieve frenatura a recupero implementata dall'azionamento elettrico;
- le zone b) e c) sono relative alla frenatura.

La distinzione delle zone di frenatura in due parti discende da considerazioni relative al bilanciamento dell'azione frenante fra l'azionamento elettrico e la propulsione meccanica.

In effetti una ripartizione efficace della coppia di frenatura fra quella meccanica e quella elettrica può essere realizzata misurando la forza di trazione meccanica esercitata dal pilota sulla leva del freno, stimare da essa la forza resistente realizzata autonomamente dal freno meccanico, e aggiungere ad essa una forza frenante aggiuntiva di tipo elettrico che realizzi la frenatura elettrica, possibilmente a recupero dell'energia di frenatura in batteria.

In tal modo si può cercare di bilanciare le due azioni per fare in modo che inizialmente sia attuata solo la frenatura elettrica, progressivamente crescente; l'intervento della frenatura meccanica dovrebbe avvenire solo quando si è al limite della frenatura elettrica, normalmente per raggiunto limite di coppia della macchina elettrica o, in casi particolari a causa di mancanza di recettività di energia da parte dell'accumulatore elettrochimico.

Se si vuole evitare di installare un sensore della forza che il pilota esercita sulle leve dei freni si può attuare una versione semplificata di bilanciamento di frenatura elettrica-meccanica: si valuta l'accensione della luce di stop ed ad essa si associa una quota di frenatura prefissata, che non può essere elevata per

evitare uno sgradevole gradino di coppia ai passeggeri; ciononostante questo consente significativi recuperi energetici, soprattutto alle più alte velocità. In tal caso solo la zona *b* della Fig. 24.7 è implementata mediante frenatura elettrica.

A conclusione di queste note si osserva che le considerazioni appena svolte con riferimento alla caratteristica meccanica del veicolo riportata in Fig. 24.7, relativa all'assieme dei due apparati propulsivi e valide quindi per il funzionamento del veicolo in modalità ibrida, sono utilizzabili, *mutatis mutandis*, anche per la propulsione puramente elettrica, ovviamente con diagramma della coppia che questa volta è simmetrico rispetto all'asse orizzontale, o prossimo alla simmetria.

24.6.2 Ripartizione della coppia fra motore a combustione interna e macchina elettrica

Come ampiamente discusso nel Capitolo 10, una volta che i comandi del pilota sono interpretati in termini di coppia, il principale problema del controllo consiste nel determinare la ripartizione di questa coppia fra le due fonti propulsive, quindi l'ICE e l'EMC.

Senza richiamare quindi qui considerazioni generali, vengono riportate alcune indicazioni di come si è operato nello sviluppo di HyScooter.

Per prima cosa occorre valutare l'andamento dell'efficienza del power train in funzione dei diversi punti di lavoro.

I grafici della Fig. 24.11, riportati in appendice, e tratte da [3], mostrano i consumi specifici dell'assieme motore a combustione interna-CVT in funzione della velocità dell'albero di uscita (il primario del riduttore R in Fig. 24.3) e di coppia e potenza erogata.

Una schematizzazione di larga massima dei risultati mostrati in queste figure è che il consumo specifico è funzione decrescente (e l'efficienza di conversione η funzione crescente) della potenza erogata e, a parità di potenza può essere assunto in prima approssimazione indipendente dalla velocità di uscita.

Se a questa osservazione si aggiunge l'ipotesi, entro certi limiti accettabile, che l'efficienza dell'azionamento elettrico sia sostanzialmente costante in ampie zone del piano potenza-velocità angolare, si giunge alla seguente importante conclusione.

Considerando efficienza costante del sistema elettromeccanico EMC-EPC-B ed efficienza del sistema meccanico ICE-CVT-CC indipendente dalla velocità del veicolo e funzione crescente della potenza erogata, si sceglie di dare priorità nelle richieste propulsive del pilota all'erogazione di potenza attraverso l'ICE.¹

¹ Ovviamente questa scelta di fondo è grandemente semplificativa ed è stata pensata per la gestione energetica dei soli prototipi; per versioni pre-industriali ed industriali è ovviamente necessario ricorrere a logiche di gestione più sofisticate.

In conseguenza di questo risultato, il sistema propulsivo in modalità ibrida può essere gestito utilizzando semplici regole che si illustrano più agevolmente facendo riferimento a tre modalità funzionali: incremento di potenza, frenatura rigenerativa, bilanciamento di carica.

24.6.2.1 Modalità funzionale “potenziamento”

Questa modalità funzionale è utilizzata quando, ad una data velocità, la coppia richiesta dal pilota supera quella massima erogabile dall'ICE: in questo caso l'ICE eroga la massima coppia disponibile a quella data velocità e la parte rimanente è fornita dalla EMC.

24.6.2.2 Modalità funzionale “frenatura rigenerativa”

Come osservato nel paragrafo iniziale, si entra in questa modalità ogni qual volta viene rilasciata la manopola dell'acceleratore o quanto è premuta una delle due leve di frenatura. È evidente che se sussiste capacità recettiva in batteria, il recupero, seppur parziale, dell'energia cinetica del veicolo in batteria è prioritario, e viene perseguito.

24.6.2.3 Modalità funzionale “bilanciamento”

Questa modalità viene attuata ogni qual volta non si è in una delle due precedenti. In questa modalità funzionale la potenza è fornita principalmente dall'ICE, ma sussiste anche un certo transito di potenza attraverso l'EPC con l'obiettivo di riportare il livello energetico presente nel sistema di accumulo il più prossimo possibile ad un predefinito livello di riferimento L_{ref} . Questo livello non dovrà essere troppo alto, per far sì che permanga comunque spazio disponibile per frenature a recupero che dovessero capitare, né troppo basso, per lasciare una sufficiente quantità di energia in batteria in modo da consentire, qualora se ne presentasse la necessità eventuali azioni di *incremento di potenza*, e anche per non creare riduzioni della vita utile dell'accumulo connesse con scariche profonde.

Se è noto che l'utente ha intenzione a breve di usare il veicolo in propulsione puramente elettrica L_{ref} è elevato, mentre se egli ha intenzione di utilizzare a breve la possibilità di ricarica da rete, L_{ref} è abbassato. La gestione del colloquio con il pilota per la comunicazione di queste intenzioni è discussa nel prossimo paragrafo.

24.6.3 Gestione delle diverse modalità operative

È importante che il pilota di un veicolo avanzato come quello qui discusso si senta a proprio agio con i comandi a disposizione per la guida. Peraltro si può ritenere il guidatore di un veicolo ibrido, oggi, abbia una speciale sensibilità per l'ambiente e la tecnica, e pertanto possa accettare di buon grado un'interfaccia uomo-macchina leggermente più articolata di quella usuale, ma che gli

consenta da un lato di gestire meglio il veicolo, dall'altro di comprendere meglio gli effetti energetici e ambientali del suo stile di guida.

In particolare il veicolo studiato viene di base gestito come un normale scooter da 50 cc, ma in più possiede un *selettore di modalità operativa* che consente all'utente di scegliere fra le seguenti opzioni:

- guida in propulsione ibrida;
- guida in propulsione puramente elettrica.

Nella guida in propulsione ibrida il veicolo è percepito dal pilota esattamente come un veicolo tradizionale, dalle prestazioni però superiori al veicolo da cui si parte per l'ibridizzazione.

Nell'ambito del funzionamento in modalità ibrida l'utente ha a disposizione una ulteriore scelta: marcia in "ibrido standard", in cui pensa a tutto il sistema di gestione energetica, ottimizzando il funzionamento del veicolo per condizioni generiche di utilizzo, e marcia in *alta* e *bassa* carica.

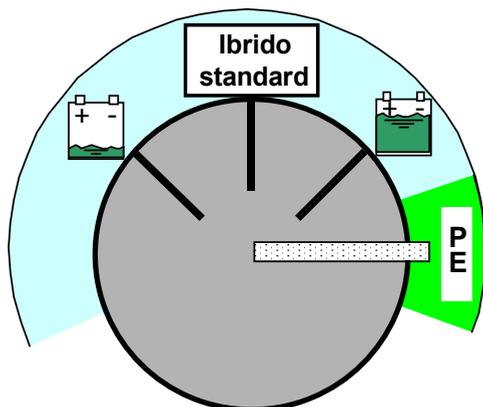


Fig. 24.8 - Una possibile realizzazione di principio del selettore di modalità operativa

Se l'utente seleziona l'opzione *alta carica*, il sistema di controllo gradualmente eleva l'energia immagazzinata nel sistema di accumulo. Questo è utile quando è previsto che a breve si dovrà effettuare una marcia in modalità puramente elettrica e si vorrà avere a disposizione la più ampia autonomia in questo tipo di marcia.

Se invece l'utente seleziona l'opzione *bassa carica*, il sistema di controllo gradualmente riduce l'energia immagazzinata nel sistema di accumulo. Questo è utile quando è previsto che a breve si dovrà effettuare una ricarica dalla rete elettrica e si vorrà avere a disposizione un ampio flusso di energia dalla rete verso l'accumulo, essendo questa modalità di trasferimento di energia al veicolo molto più conveniente dell'introduzione di benzina, dal punto di vista del costo per l'utente e dell'impatto ambientale.

Una possibile realizzazione del commutatore di modalità operativa è riportata nella Fig. 24.8.

Sono evidenti la zona per la marcia puramente elettrica (PE), evidenziata in verde, e la marcia ibrida, evidenziata in blu; la marcia ibrida a sua volta è differenziata fra modalità standard, alta carica e bassa carica.

24.7 Simulazioni e prestazioni

25.7.1 Cicli di prova

Il power train proposto ed il relativo sistema di controllo sono stati testati utilizzando un programma di simulazione sviluppato per l'occorrenza nell'ambiente di calcolo MATLAB/ SIMULINK™.

Parecchie simulazioni sono state effettuate utilizzando i seguenti cicli di prova:

- il ciclo standard ECE 47 per la valutazione dello scooter 50 cc funzionante in modalità ibrida
- una versione modificata del ciclo ECE 47 per la valutazione delle prestazioni in modalità puramente elettrica. La modifica del ciclo ECE 47 è consistita nel moltiplicare le velocità di tutte le parti del ciclo per un fattore costante, tale da realizzare la condizione di velocità massima pari a 25 km/h.
- il ciclo ECE 40; questo ciclo di prova è normalmente utilizzato per veicoli di cilindrata superiore a quello considerato, ma il potenziamento introdotto al veicolo con l'ibridizzazione ne ha aumentato le prestazioni e lo ha reso capace di superare anche questo ciclo, che è stato quindi incluso nell'analisi.

Per ulteriore chiarezza in Fig. 24.9 sono riportati due dei cicli considerati (l'ECE 47 modificato, come detto, è immediatamente ricavabile dall'ECE 47).

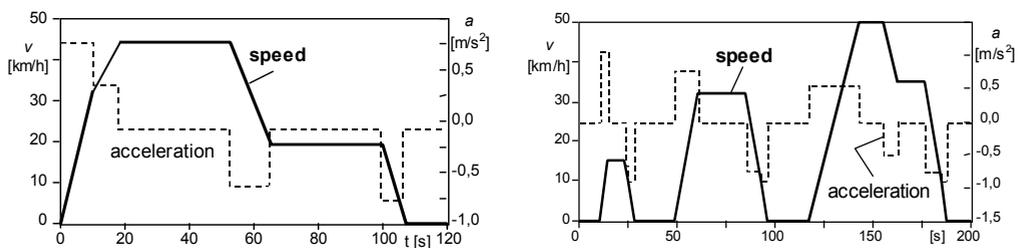


Fig. 24.9 - Cicli standard ECE 47 (a sinistra) ed ECE 40 (a destra)

24.7.2 Risultati numerici

Un quadro sinottico dei risultati delle simulazioni, come pubblicati in [3], è riportato in Tabella 24.1.

Si possono fare le seguenti osservazioni.

Il ciclo ECE 47 modificato implica peggiori efficienze del corrispondente ciclo standard, nonostante le velocità inferiori. Questo è dovuto al fatto che l'assieme ICE-CVT ha un'efficienza notevolmente inferiore alle basse potenze rispetto a quella alle potenze più elevate (Fig. 24.10).

Questo fatto sovracompensa la riduzione di potenza media richiesta dal veicolo per la propulsione. Un altro elemento che va in questa direzione è costituito dal fatto che nella versione originale e modificata del ciclo vi sono gli stessi tempi in cui il veicolo è fermo e il motore è acceso; i conseguenti consumi, uguali nei due casi, hanno un maggior impatto per chilometro sul ciclo modificato, di minor lunghezza.

Il ciclo ECE 47 modificato può anche essere percorso in modalità ZED, con grossi vantaggi in termini sia di emissioni globali che di costi per l'utente. L'autonomia in questi casi è limitata, ma può essere sufficiente in molti casi (ad esempio percorso casa-lavoro in città piccole e medie, o attraversamento di centri storici in città di maggiori dimensioni). Il costo per km percorso che l'utente deve sopportare per la ricarica è di un ordine di grandezza inferiore del costo chilometrico del veicolo di partenza.

L'efficienza del ciclo ECE 40 è riportata solo per il caso del veicolo ibrido, in quanto, come già osservato, il veicolo di partenza dotato del solo motore a combustione interna non è capace di percorrerlo.

Al fine di fornire un'idea più accurata del funzionamento del veicolo proposto, alcune grandezze significative sono riportate in Fig. 24.10.

Tab. 24.1 - Principali risultati delle simulazioni

| Veicolo | Parametro | Ciclo | | |
|-------------------------|---|-------|----------------------|-------|
| | | ECE47 | ECE47 Modif. | ECE40 |
| Ibrido | Efficienza in modalità ibrida [km/l] | 42,9 | 34,2 | 37,2 |
| | Autonomia in modalità ZED [km] | - | 20,5 (*) 14,5 (°) | - |
| | Costo elettricità in modalità ZED [c€/km] | - | 0,41 (*) 0,29 (°) | - |
| Tradizionale (solo ICE) | Efficienza [km/l] | 43,5 | 35,4 | - |
| | Costo combustibile [c€/km] | - | 3,25 | - |

(*) Alla velocità costante di 25 km/h

(°) in ciclo urbano con massima velocità di 25 km/h

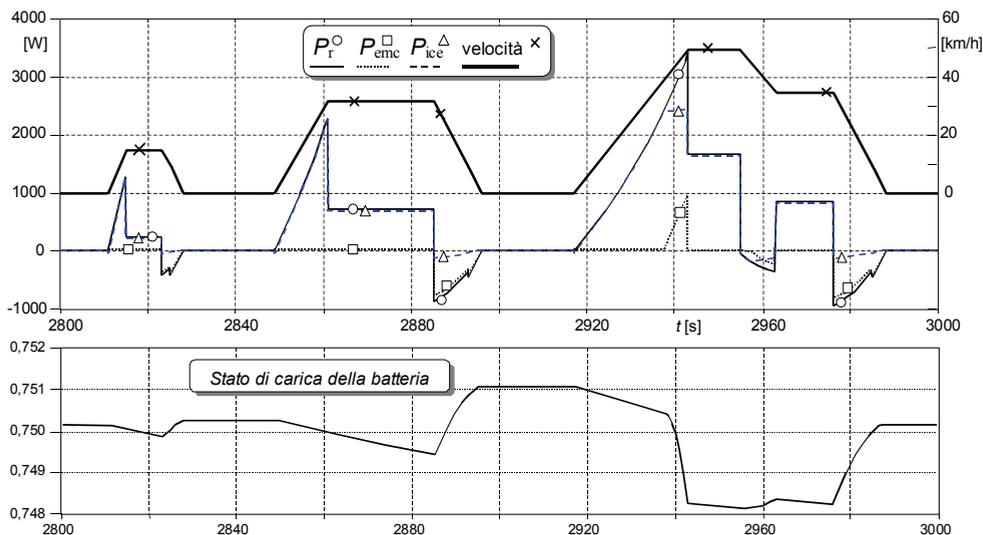


Fig. 24.10 - Andamenti di grandezze significative riguardanti il veicolo Hyscooter percorrente in modalità ibrida un ciclo ECE 40

La frenatura rigenerativa è evidente intorno ai 2825s, 2890s, 2980s, mentre è pure evidente il potenziamento intorno ai 2940s. Quando la velocità del veicolo è nulla, ovviamente, anche velocità e quindi potenza della EMC sono nulle. In tutti gli altri intervalli il funzionamento è in “bilanciamento”.

24.8 I prototipi realizzati congiuntamente fra l’Università di Pisa e la Piaggio

L’attività di ricerca congiunta tra Piaggio e l’Università di Pisa, grazie anche ad un finanziamento della Fondazione della Cassa di Risparmio di Pisa, ha consentito nel periodo 2003-2005 la realizzazione di due motoveicoli ibridi prototipali, derivati da motorizzazioni 50 cc 4T con alimentazione a carburatore, uno su base Zip, l’altro su base Vespa, entrambi con batterie al piombo e con l’opzione plug-in non ancora implementata. Lo schema ibrido parallelo, che contraddistingue i suddetti prototipi, ha richiesto anche lo sviluppo di un sistema di controllo motore di tipo Ride By Wire, che consentisse all’EMS di gestire la richiesta di coppia del pilota in ottica ottimizzazione emissioni e consumi.

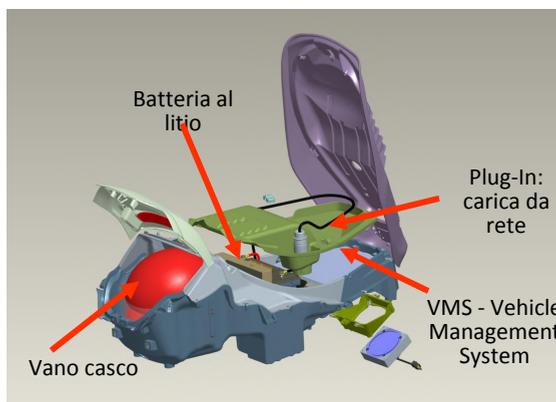
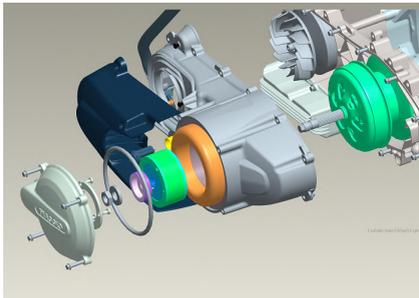
24.9 Successivi sviluppi autonomi da parte di Piaggio

Dal 2006 l’attività di ricerca di Piaggio è proseguita autonomamente nell’ottica di sviluppare soluzioni tecniche che fossero potenzialmente applicabili su motorizzazioni di produzione.

In una prima fase si è ulteriormente sviluppata la definizione tecnica (sia da un punto di vista meccanico, che elettronico e di controllo) della motorizzazione ibrida, realizzando anche un azionamento elettrico applicabile su medie cilindrate, che ha consentito di realizzare una piccola flotta di motoveicoli, alcuni dei quali sono stati consegnati a qualche Pubblica Amministrazione per una serie di test sul campo che si sono estesi per circa due anni.

Parallelamente l'Azienda, oltre a ingegnerizzare la soluzione prototipale del suddetto azionamento, ha avviato attività di ricerca e sviluppo volte alla realizzazione di un sistema di controllo motore integrato ad iniezione elettronica di tipo Ride By Wire, all'introduzione dell'opzione plug-in (carica da rete) e delle batterie agli ioni di litio, al fine di massimizzare i vantaggi della motorizzazione ibrida di tipo PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle).

Al fine di proporre una risposta ai problemi di mobilità sostenibile, Piaggio ha pertanto deciso di applicare in prima istanza il motore ibrido all'innovativo motoveicolo MP3, per combinare gli aspetti tipici di dinamicità d'uso di un due ruote, alla sicurezza delle tre ruote ed alla eco-compatibilità del motore ibrido plug-in.



24.10 Conclusioni

I risultati descritti nel presente capitolo sono il frutto di una stabile piattaforma di collaborazione tra Piaggio e l'Università di Pisa, tra ricerca pubblica e privata, tra ricerca di base e ricerca industriale, il tutto finalizzato a fornire una risposta concreta per una mobilità sostenibile nel breve e medio periodo. È indubbio che le attività di ricerca congiunte continueranno per sviluppare ed ottimizzare sempre più soluzioni tecniche innovative ad alto valore aggiunto.

Bibliografia

- [1] M. Ceraolo, A. Caleo, P. Capozzella, M. Marcacci, L. Carmignani: "Operation and Performance of a Small Scooter with a Parallel-hybrid Drive-train", *SAE Transactions - Journal of Engines*, Vol. 113 (2004) pp. 1943-1949, paper N. 2004-32-0077.
- [2] M. Ceraolo, P. Capozzella, F. Baronti: "CAN LabView based Development Platform for fine-tuning Hybrid Vehicle Management Systems", *IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference VPPC'05*, Chicago (USA), 7-9 September 2005, pp. 433-438, paper 10039.pdf.
- [3] M. Ceraolo, A. Caleo, P. Capozzella, M. Marcacci, L. Carmignani, A. Pallottini: "A Parallel-Hybrid Drive-Train for Propulsion of a Small Scooter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 21, N. 3, May 2006, pp768-778.

Appendice - Consumi dell'assieme ICE-CVT

La valutazione dei consumi dovuti alla combustione nell'ICE fa normalmente riferimento alle mappe di consumo del motore stesso nei vari punti di lavoro.

Nel veicolo considerato in questo studio, peraltro, la potenza proveniente dall'ICE che va a combinarsi con la potenza proveniente dalla batteria attraverso l'EMC attraversa preventivamente il CVT, che cambia il punto di lavoro. Per la valutazione delle strategie di gestione da adottare, quindi, appare più conveniente ricavare le mappe di consumi dell'assieme ICE-CVT.

Questo tipo di mappe sono state ricavate sperimentalmente nei laboratori dell'Università di Pisa sull'esemplare da cui si è partito per l'ibridazione, e i risultati sono riportati in Fig. 24.11, ricavate da [3].

I diagrammi riportati in queste figure mostrano chiaramente che l'assieme ICE-CVT ha i più bassi valori di consumo specifico alle più alte potenze erogate e, semplificando al massimo le cose, si può dire che l'efficienza dell'assieme, fortemente dipendente dalla potenza erogata, ha una dipendenza dalla velocità rotazionale dell'albero di uscita trascurabile.

Questo risultato differisce fortemente dai tipici andamenti normalmente ottenuti quando si misurano esclusivamente degli ICE, per i quali le regioni a più alta efficienza sono normalmente confinate in zone a più bassa velocità angolare. La differenza è chiaramente dovuta all'intervento del CVT che adatta la velocità angolare del suo albero di ingresso alle caratteristiche dell'ICE.

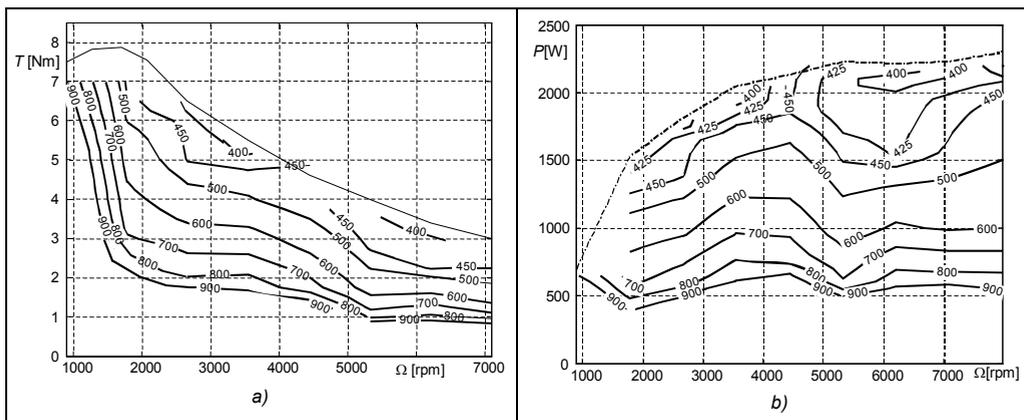


Fig. 24.11 - Consumi specifici dell'assieme ICE-CVT [g/kWh]:
a) nel piano coppia-velocità angolare, b) nel piano potenza-velocità angolare

CAPITOLO 25

LE AUTO ELETTRICHE PIÙ VELOCI AL MONDO

Giorgio Rizzoni

Center for Automotive Research, Columbus, Ohio (USA)

Le automobili elettriche spesso sono considerate lente e poco performanti, quasi "un male necessario". Per fortuna c'è chi si è fatto carico di demolire anche questo luogo comune, realizzando veicoli a propulsione elettrica che hanno superato i 500 km/h. Si tratta del team dell'Ohio State University, guidato dal prof. Giorgio Rizzoni, con i suoi Buckeye Bullet 1 e 2, il primo equipaggiato con batterie a nichel-idruri, il secondo con celle a combustibile, alimentato a idrogeno. Di seguito la storia, raccontata dal professor Rizzoni, di questi prototipi da record.

25.1 Il Bullet 1

Dopo aver partecipato per diversi anni alle gare della Formula Lightning (ed averne vinto quasi la metà), nel maggio 2000 il nostro team si pose il problema di mettere a frutto l'esperienza maturata nel settore delle vetture da corsa a trazione elettrica. Dopo averne discusso tra di noi e con i nostri sponsor, decidemmo di alzare il livello della competizione, proponendoci di battere il record mondiale di velocità per veicoli elettrici, allora di 248 miglia orarie (399 km/h, detenuto da Pat Rummerfield e conseguito con il White Lightning).

Nei due anni successivi (2000-2002) il nostro gruppo di studenti progettò e realizzò la macchina a ciò destinata, cui attribuiamo il nome beneaugurante di Buckeye Bullet, il soprannome di Jesse Owens (velocista dell'Ohio e vincitore di quattro medaglie d'oro alle Olimpiadi di Berlino del 1936). Queste le sue caratteristiche:

- Motore trifase ad induzione, con potenza di oltre 500 HP
- inverter DC-AC, derivato da macchine di serie
- batterie nichel-metal idruri, massa totale: 900 kg
- peso totale del veicolo: 1800 kg
- cambio a 5 marce, manuale
- telaio in tubi d'acciaio saldati
- carrozzeria in fibra di carbonio
- sospensioni indipendenti sulle 4 ruote
- 2 paracadute + freni a disco.

Il Buckeye Bullet debuttò in pista a Bonneville, sul Grande Lago Salato, nell'ottobre del 2002, mancando il record per poche miglia orarie. Dopo due anni di prove e modifiche, tra la pista a Bonneville e l'officina a Columbus, rag-

giungemmo il nostro obiettivo: nell'ottobre 2004, il Bullet toccò la velocità massima di 321 miglia orarie (517 km/h). I record omologati furono quello nazionale USA a 314,958 miglia orarie (506 km/h), e quello internazionale a 271,273 miglia orarie (457 km/h). La ragione di questa differenza risiede nelle diverse regole di gara per i due casi.

Dopo aver raggiunto questi risultati, la macchina fu ritirata, ma detiene ancora i due record, nazionale e internazionale, per la classe EIII.

Il veicolo è il risultato dello sforzo collettivo di un gruppo di studenti universitari, che sono stati responsabili di quasi tutti gli aspetti di progettazione, fabbricazione, sensibilizzazione e raccolta fondi per lo sviluppo di un veicolo unico nel suo genere.

25.1.1 La progettazione di un veicolo elettrico per il record di velocità terrestre

Progettare un veicolo destinato a stabilire un record di velocità richiede accurati studi del sistema di trazione, dell'aerodinamica e del telaio per ottenere le massime prestazioni tenendo nella corretta considerazione la sicurezza del conducente e prevedendo idonei sistemi di controllo.

Per la progettazione, si è partito dalla modellazione del veicolo, simulandone il comportamento per stabilire il fabbisogno di energia elettrica e la dipendenza dalla massa del veicolo e dalla resistenza aerodinamica.

Gli studi aerodinamici sono stati condotti utilizzando il software CFD Fluent; gli studenti si sono avvalsi dell'assistenza degli ingegneri della ricerca e sviluppo della Honda per definire le caratteristiche del veicolo e progettare la sua forma di base.

Per la validazione dei modelli CFD, la determinazione sperimentale del centro di pressione del veicolo ed il disegno della pinna di stabilizzazione dorsale si è condotto un test presso la galleria del vento dell'Automotive Research Center (ARC) di Mooresville, North Carolina. La riduzione della resistenza aerodinamica è stata una questione critica, ma altrettanto importante è stato far sì che la portanza fosse neutra o perfino negativa (per evitare il sollevamento del veicolo dal suolo ad alte velocità), e garantire che il centro di pressione delle superfici laterali fosse sotto il baricentro del veicolo, per garantire la stabilità in presenza di vento trasversale.

La stabilità di un veicolo così lungo e stretto è stata poi motivo di grande preoccupazione. Il problema è stato affrontato mediante simulazioni dinamiche del veicolo condotte col software ADAMS e con strumenti di analisi combinata, basati su modelli preliminari del veicolo. Questo lavoro è stato condotto in parallelo con gli studi di progettazione aerodinamica.

Queste analisi preliminari hanno consentito di progettare il layout del telaio di base.

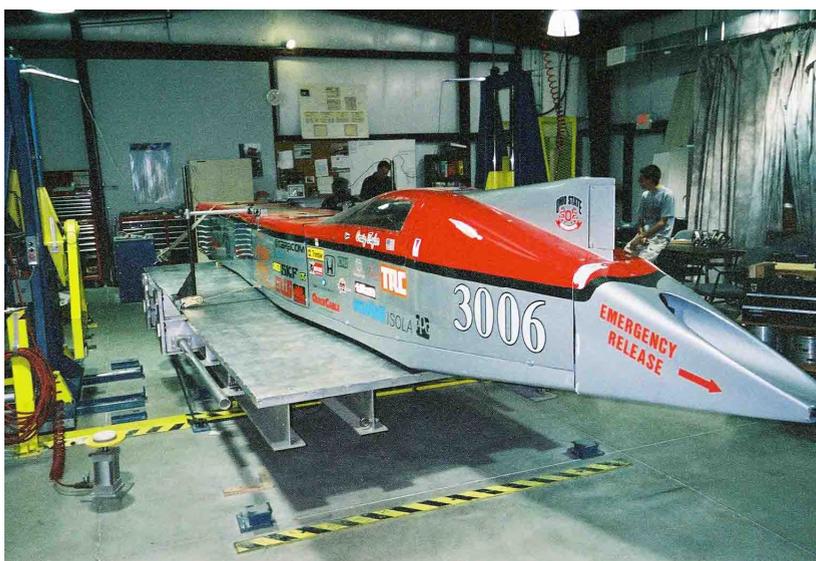


Fig. 25.1 - Allestimento del telaio

L'abitacolo per il pilota è a sbalzo dietro l'asse posteriore, mentre il sistema di stoccaggio dell'energia elettrica ed il sistema di trazione sono sistemati tra la sospensione anteriore e quella posteriore, entrambe indipendenti. La struttura di base del telaio è stata realizzata in tubi d'acciaio saldati, ed è in effetti una struttura reticolare lunga 10 metri.

Modelli agli elementi finiti, realizzati con SolidWorks COSMOS, e test torsionali sono stati utilizzati per determinare la rigidità del telaio.

Il design delle sospensioni ha presentato alcune sfide, per la volontà di avere una sospensione a quattro ruote indipendenti in un veicolo molto stretto, con poco spazio a disposizione per i cinematismi tradizionali. I componenti della sospensione posteriore sono stati progettati per una larghezza di 36 pollici (91 cm) mentre la sospensione anteriore si adatta ad una larghezza di 24 pollici (61 cm). Nella parte posteriore, i componenti della sospensione sono stati realizzati ad hoc per consentire l'uso di articolazioni omocinetiche posizionate all'interno dei cuscinetti delle ruote. Nella parte anteriore, per provvedere un sufficiente spazio di sterzata per le ruote è stata utilizzata una sospensione a bilanciere (push-rod).

Sterzare un veicolo di questa lunghezza è una sfida notevole, considerando che il conducente siede a più di 5 metri dall'avantreno. A questo scopo è stata sistemata attraverso la macchina, sotto il motore e le batterie, una tiranteria di trasmissione collegata ad un telaio in grado di convertire il movimento avanti e indietro in un movimento di sterzo.

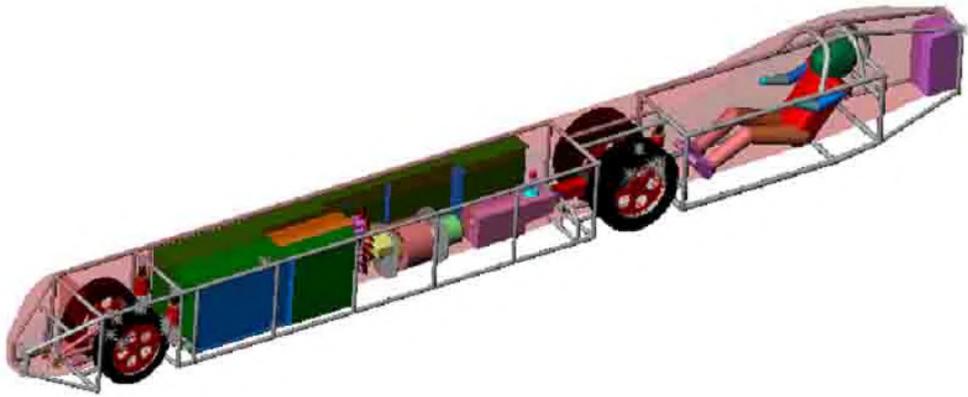


Fig. 25.2 - Modellazione al computer del design del veicolo

La carrozzeria in fibra di carbonio è stata realizzata con il sostegno e l'assistenza di Ashland Chemicals; vernici speciali in grado di affrontare il difficile ambiente del Lago Salato sono state fornite da PPG.

Il sistema di trazione è stato progettato intorno ad uno speciale motore ad induzione progettato da Nigel McQuinn e fabbricato da Shoemaker Industrial Solutions. Lo statore del motore è avvolto utilizzando filo magnetico ad alte prestazioni, fornito da Phelps Dodge, ed è alimentato da un inverter Saminco personalizzato in grado di fornire 400 kW.



Fig. 25.3 - Il Bullet 1

Il motore trasmette la potenza ad una trasmissione con cambio sequenziale Jerico e ad un differenziale posteriore Quaife attraverso una frizione da competizione carbonio-carbonio donata da Tilton Engineering.

Il sistema di accumulo elettrico consiste di un pacco di batterie al nichel-metal idruri da 900-V assemblato dagli studenti. La frenatura è ottenuta attraverso l'uso di due paracadute per alta velocità e freni a disco su tutte e quattro le ruote. Un sistema di soppressione incendi ad halon è previsto nel caso di incendi dell'impianto elettrico.

25.2 Il Bullet 2

Dopo essere ritornato dal Lago Salato nel 2004, il team del Bullet analizzò i dati raccolti e discusse il futuro del programma. Fu deciso di andare avanti, costruendo un veicolo possibilmente ancora più veloce, con una cella a combustibile al posto delle batterie.

Una cella a combustibile offre infatti diversi vantaggi, in questo genere di competizioni, rispetto alle batterie. Il vantaggio maggiore è che le celle garantiscono le stesse prestazioni per tutta la durata della prova, a differenza delle batterie che, scaricandosi, perdono di potenza proprio alla fine, quando la richiesta è massima. Anche per il rifornimento della macchina le cose sarebbero migliorate di molto, perché rifornire il serbatoio idrogeno richiede un decimo del tempo necessario per ricaricare le batterie.

Il primo passo per dar vita al Bullet 2 era coinvolgere nell'impresa un leader mondiale nel settore delle celle a combustibile. Preparammo quindi una proposta e la mandammo a Ballard. A nostra insaputa, alcuni loro specialisti di celle a combustibile avevano maturato l'idea di montare sul Bullet uno dei loro sistemi. Avevano saputo del nostro progetto fin dalle sue fasi iniziali attraverso la Saminco, fornitore dell'inverter per i loro autobus a idrogeno, ma anche per il Bullet. La nostra proposta, passando d'ufficio in ufficio, arrivò proprio a questi colleghi, i quali decisero di donarci un po' del loro tempo libero, lavorando la sera e durante i week-end per il nostro programma.

Nello stesso tempo stipulammo un accordo con la Ford. Mujeeb Ijaz, un dirigente del programma "Mobilità sostenibile" della Ford, aveva infatti il nostro stesso sogno, battere un record terrestre di velocità. Ijaz voleva che fosse la Ford la prima industria automobilistica a superare il limite delle 200 miglia orarie (320 km/h) con una vettura con celle a combustibile rappresentativa della sua produzione. Quando lo sapemmo, decidemmo insieme che la Ohio State University, Ford e Ballard avrebbero costruito le due più veloci macchine del mondo spinte da una cella a combustibile.

Il Buckeye Bullet 2 è stato progettato tenendo ben fermo quanto imparato nell'esperienza precedente. È leggermente più largo del Bullet 1, per ospitare le celle della Ballard, ma il coefficiente di resistenza aerodinamica è migliore,

grazie all'assenza di rivettature sporgenti, e questo compensa la maggiore sezione frontale.

La potenza delle celle (130 kW netti ciascuna) è raddoppiabile per brevi istanti, portando la potenza totale ad oltre 500 kW per la breve durata della prova.

La progettazione ha preso avvio dal disegno della nuova carrozzeria, la cui forma è stata affinata con programmi di simulazione fluidodinamica disponibili al centro di calcolo dell'OSU.

Per validare i calcoli teorici, un modello in scala ridotta della carrozzeria fu provato nella galleria del vento del Penske Technology Group (PTG), in Mooresville, North Carolina; questo ha consentito di dimensionare correttamente la parte posteriore della macchina al fine di allontanare il centro di pressione aerodinamico dal baricentro per conseguire una migliore stabilità.

Nel dicembre del 2006, completato il disegno dello chassis e della carrozzeria, iniziò la costruzione del Bullet 2. Il telaio in tubi d'acciaio saldati fu costruito dagli studenti in sole due settimane, durante le feste natalizie, mentre la carrozzeria in fibra di carbonio veniva realizzata in uno stabilimento del gruppo Rush.

Allo scopo di migliorare la sicurezza del mezzo, la macchina è equipaggiata con freni meccanici in grado di intervenire anche in caso di malfunzionamento dei paracadute di frenatura e quindi alla velocità massima di progetto di 350 miglia orarie (563 km/h). Dopo aver preso contatto con la Goodrich Aerospace di Troy, Ohio, arrivammo alla conclusione che potevano andar bene gli stessi freni a disco del Lear Jet, quattro gruppi di cinque dischi ciascuno.



Fig. 25.4 - Il bel profilo aerodinamico del Bullet 2 sul sito di prova

L'esperienza del primo prototipo ci ha portato a scegliere nuovamente sospensioni indipendenti sulle quattro ruote, ma questa volta la progettazione è stata più complicata, perché l'impianto frenante è stato maggiorato e bisognava trovare un posto per tutto. A differenza che nel Bullet 1, la trazione è anteriore, complicando ulteriormente le cose, naturalmente per la necessità di evitare l'insorgere di coppie sterzanti sull'avantreno (impossibili da contrastare a quelle velocità). La soluzione è una sospensione progettata con l'ausilio di accurate simulazioni del comportamento dinamico del veicolo, e realizzata con largo uso di componenti in fibra di carbonio per ridurne la massa.

Le caratteristiche del sistema di trazione, che utilizza per la generazione a bordo 2 moduli della Ballard, sono riportate di seguito:

- cerchi in alluminio lavorato di macchina e pneumatici Bonneville da competizione
- motore trifase ad induzione da oltre 700 HP
- inverter DC-AC, derivato da macchine di serie
- cambio Hewland NLT transaxle a 6 marce.



Fig. 25.5 - Il motore di trazione ed il complesso cambio/differenziale

L'ossigeno necessario per le reazioni chimiche all'interno di una cella a combustibile proviene normalmente dall'aria circostante, la cui pressione è aumentata con un compressore elettrico. Per risparmiare peso e ridurre le perdite di funzionamento, nel Bullet 2 non c'è un compressore: le celle sono invece alimentate con un ossidante in bombole ad alta pressione, soluzione resa possibile dalla ridotta durata della prova.

Idealmente, usando ossigeno puro si ottengono le massime prestazioni col minimo peso e ingombro; ma maneggiare l'ossigeno puro è forse più pericoloso che lavorare con l'idrogeno. Per questo motivo abbiamo deciso di utilizzare una miscela di ossigeno e gas inerte, più ricca di ossigeno dell'aria (40% anziché 21%), utilizzando l'elio come inerte per ridurre il peso del serbatoio e la portata in massa della linea, riducendo le perdite: infatti, la massa della miscela ossigeno/elio (heliox) sufficiente ad ossidare un chilogrammo di idrogeno è circa il 25% della corrispondente massa d'aria. Ogni prova richiede circa 1 kg di idrogeno; per ossidarlo sono necessari 15 kg di heliox, o 57 kg di aria. Due serbatoi da 88 litri alla pressione di 180 kg/cm² sono usati per contenere i 15 kg di heliox, che vanno riforniti al termine di ogni prova, mentre l'idrogeno è contenuto in una bombola Dynetek da 43 litri, del tipo superleggero, con liner metallico e avvolgimento completo in fibra di carbonio. L'alimentazione di heliox alle celle è controllata da due regolatori/misuratori di portata, mentre il sistema della Ballard (iniezione e ricircolo) controlla il flusso di idrogeno.

Il raffreddamento delle celle è stato invece davvero una sfida, perché il peso e l'ingombro aerodinamico di radiatori capaci di smaltire i 300 kW dissipati da ogni cella nel liquido di raffreddamento avrebbero compromesso la possibilità di battere il record. Il modo più semplice e affidabile di dissipare tanto calore è sfruttare l'elevato calore latente di fusione dell'acqua, cioè usare il liquido di raffreddamento per sciogliere una massa di ghiaccio (181 kg, tanti ne sono necessari per i 90 secondi della prova).



Fig. 25.6 - Il primo rifornimento di idrogeno in pista

Poiché però il liquido refrigerante non può in nessun modo correre il rischio di essere contaminato dal sale di cui è fatto il fondo del lago asciutto, la nostra pista naturale, e questo potrebbe succedere ogni volta che riforniamo di nuovo ghiaccio il serbatoio, il circuito di raffreddamento è in due sezioni, un primario, che raffredda la cella, ed un secondario, che scioglie il ghiaccio, collegate da uno scambiatore liquido/liquido. Gli ingegneri della Modine ci hanno aiutato nel dimensionare il sistema e l'azienda ha contribuito al progetto con il dono di due scambiatori costruiti su misura.

Il motore elettrico è lo stesso del Bullet 1, disegnato da Nigel McQuin e costruito da Shoemaker Industrial nel 2001. Le prove del Bullet 1 avevano dimostrato come fosse possibile spremere parecchio di più dal motore; decidemmo quindi di provarlo al banco nel laboratorio Electro-Mec's, nell'Indiana, dove il motore fu completamente rimappato, portandone la potenza a 700 HP (dai 500 originali). I dati ottenuti, insieme alle nuove curve di polarizzazione, furono usati per decidere i rapporti di trasmissione migliori del cambio a 6 marce. Il 18 luglio del 2007, il Bullet 2 si mosse per la prima volta con i suoi mezzi, al Transportation Research Center (TRC) di Marysville (Ohio), e durante tutto il mese fu oggetto di continue prove. Poi, ad agosto, fu portato sul Gran Lago Salato.



**Fig. 25.7 - In primo piano Il Bullet 2 (si notino le dimensioni ridotte).
Sullo sfondo, la Ford 999**

Alla prima uscita della macchina fu battuto il record per veicoli terrestri ad idrogeno (fino ad allora detenuto dalla BMW), raggiungendo la velocità di 150 miglia orarie (240 km/h).

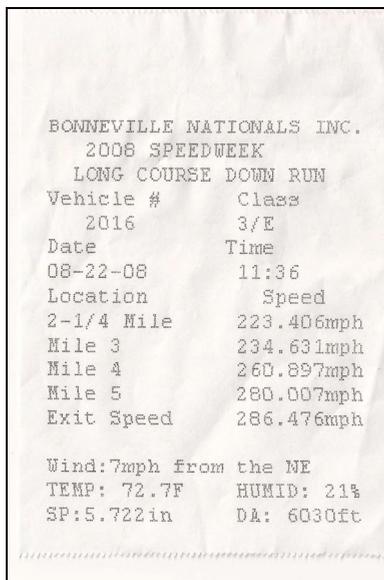
La potenza sviluppata dalle celle fu inizialmente mantenuta al 60% del valore massimo, ma nelle settimane successive sfruttammo al meglio le sue possibilità. Scoprimmo pure che il circuito di alimentazione presentava un collo di bottiglia ma, lavorando tutta la notte in un hangar preso in affitto dalla Ford all'aeroporto di Wendover, rimediammo installando un secondo regolatore di pressione sulla linea dell'idrogeno.

Il giorno dopo ci fu un guasto all'impianto elettrico, che ci procurammo rimorchiando il veicolo in pista, ma l'ultimo giorno della sessione di prove raggiungemmo la velocità di 323 km/h (201,636 miglia/h) nel primo miglio ufficialmente misurato.

In quei giorni, la Ford Fusion 999 stabilì il record di 333 km/h (207,297 miglia/h).

Nei 40 giorni successivi il nostro team revisionò l'impianto elettrico ed effettuò altre corse di prova al Transportation Research Center.

In ottobre il Bullet raggiunse la velocità massima di 360 km/h, diventando il veicolo a celle a combustibile più veloce del mondo, ma il record non fu omologato perché la gara fu poi sospesa per ragioni meteorologiche.



```
BONNEVILLE NATIONALS INC.  
2008 SPEEDWEEK  
LONG COURSE DOWN RUN  
Vehicle #      Class  
2016          3/E  
Date          Time  
08-22-08     11:36  
Location      Speed  
2-1/4 Mile   223.406mph  
Mile 3       234.631mph  
Mile 4       260.897mph  
Mile 5       280.007mph  
Exit Speed   286.476mph  
  
Wind: 7mph from the NE  
TEMP: 72.7F    HUMID: 21%  
SP: 5.722in   DA: 6030ft
```

Fig. 25.8 - Il tagliando del record di velocità

La macchina ebbe poi una serie di problemi, tra cui una fuga di idrogeno che faceva scattare i sistemi di sicurezza, problema risolto solo ventilando la carrozzeria, e poi, più grave, la rottura di uno dei due controllori/misuratori di flusso dell'ossidante. Nonostante questo, l'estate successiva il Bullet riprese le prove raggiungendo, il 22 agosto 2008, la velocità record di 286 miglia orarie (460 km/h), la più alta mai ottenuta con un veicolo con celle a combustibile.

I 500 km/h di progetto sono vicinissimi, e il team dell'OSU è ben determinato a raggiungerli!

Si riporta di seguito qualche dettaglio tecnico:

1. Tempo di corsa: 90 s
2. Potenza di picco: 550 kW (740 hp)
3. Temperatura dello stack: 70 °C
4. Consumo: 0,8 kg di idrogeno e 15 kg di heliox



Fig. 25.9 - Il Bullet II alla partenza. Si noti lo scarico del vapore!

Edito dall'ENEA
Unità Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 – 00196 Roma
www.enea.it

Edizione del volume a cura di Giuliano Ghisu
Copertina: Cristina Lanari, Bruno Giovannetti

Stampa: Primaprint, azienda certificata UNI EN ISO 9001:2000 ed UNI EN ISO 14001:2004

e-mail: info@primaprint.it

Finito di stampare nel mese di novembre 2009