

Uso razionale dell'energia nei trasporti

L'utilizzo dei combustibili gassosi quali metano, GPL e idrogeno «carbon free» in sistemi di propulsione avanzati, permetterà la riduzione dei consumi e il contenimento delle emissioni inquinanti

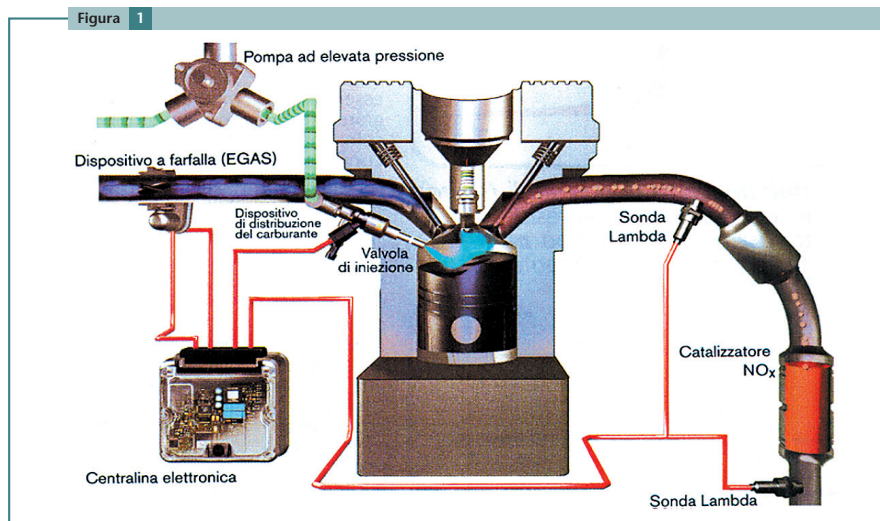
Felice Esposito Corcione

I sistemi di propulsione per il trasporto sono classificabili in: motori a combustione interna ad accensione comandata, diesel e a gas; elettrici, ibridi elettrici «fuel cell» e ibridi termico-elettrico. I primi (motori a c.i.) fanno uso di combustibili fossili e gli elettrici-fuel cell dell'idrogeno.

Motore ad accensione comandata

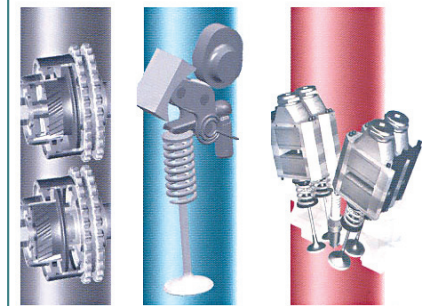
Nei motori ad accensione comandata le emissioni allo scarico sono fondamentalmente controllate dalle strategie di controllo implementate nella centralina di bordo che gestisce in modo integrato i parametri motoristici come la dosatura, l'anticipo di accensione, la fasatura della distribuzione e i parametri allo scarico per il buon funzionamento del sistema catalitico.

Nei prossimi anni è prevista una sempre maggiore diffusione dei motori a iniezione diretta (GDI) in quanto quest'ultimi offrono una maggior possibilità di ridurre consumi e inquinanti rispetto agli attuali motori ad iniezione elettronica nel collettore di aspirazione (MPI). L'iniezione diretta di benzina (figura 1) tuttavia apre nuove problematiche che sono legate principalmente alla eterogeneità della miscela e alla evaporazione del combustibile deposto sulla parete della camera di combustione, infatti una non adeguata formazione della miscela può condurre alla formazione di particolato, mentre una mancata evaporazione del combustibile deposto su parete può portare ad un incongruo aumento degli HC. Al momento, la mancanza della tecnologia catalitica di riduzione degli NO_x in eccesso di ossigeno, chiamata DENOX ,



Schema del sistema di alimentazione e scarico a controllo elettronico di un motore ad accensione comandata *common rail* ad iniezione diretta

Figura 2



Sistemi di attuazione delle valvole (a sinistra: meccanico; al centro: elettro-idraulico; a destra: elettromagnetico). [fonte CRF e FEV]

da utilizzare allo scarico di motori GDI non stechiometrici ha spinto i costruttori a immettere sul mercato propulsori i.d. stechiometrici caratterizzati da un sistema di iniezione ad alta pressione (100 bar) con l'iniettore posizionato al posto di una delle due candele del convenzionale motore «twin spark».

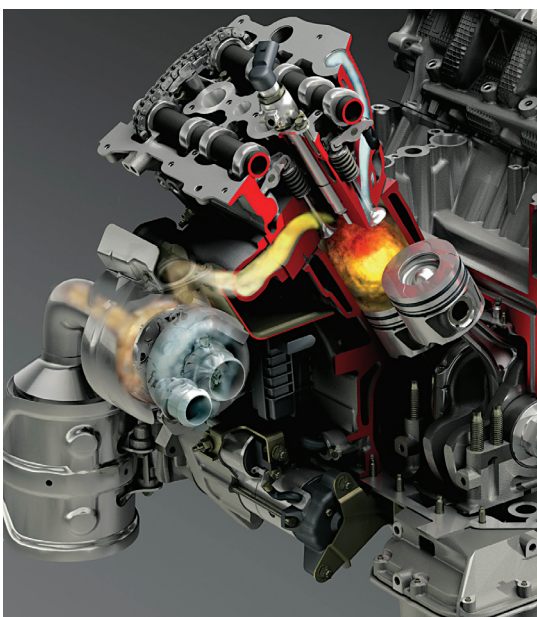
Ulteriori possibilità di miglioramento dei consumi e di minimizzazione delle emissioni sono offerti dai sistemi innovativi di attuazione delle valvole di aspirazione e di scarico che sono in fase avanzata di sviluppo. Infatti, la gestione elettronica delle valvole, che ottimizza il meccanismo di scambio termico, unita a quella del sistema di iniezione consentirà di implementare strategie di controllo che integrino gli effetti positivi di entrambe le tecnologie.

Il primo tentativo di attuazione delle valvole (figura 2) fu basato su un variatore meccanico, a controllo elettronico, della posizione relativa camma-valvola per mezzo di un attuatore a controllo elettronico che consente una riduzione complessiva dei consumi valutabili in circa il 4% con simultanea riduzione delle emissioni e un aumento della pressione media effettiva (pme). Un secondo sistema, proposto da Fiat, utilizza un attuatore elettro-idraulico a controllo elettronico che consente una riduzione dei consumi fino al 10% e un contemporaneo aumento delle prestazioni del motore. Infine, il sistema più sofisticato e più innovativo è quello nel quale l'attuazione delle valvole è completamente elettromagnetica, non facendo così uso dell'albero a camme. Questo sistema, ancora in fase di sviluppo, consentirà riduzioni dei consumi valutabili in circa il 20% in quanto sarà possibile, nei motori pluricilindrici, anche la disattivazione parziale di qualche cilindro.

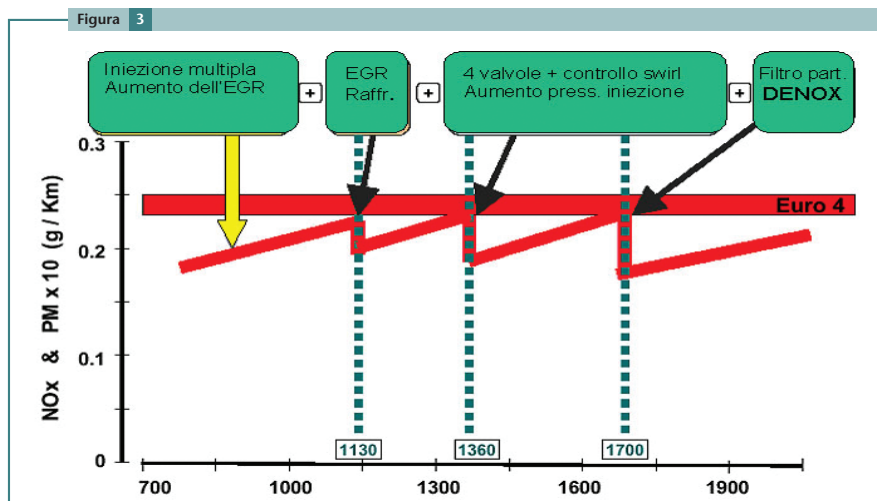
Motore diesel

Con l'applicazione del sistema di iniezione ad alta pressione «common rail» a controllo elettronico, avvenuta negli anni Novanta, il motore diesel ad iniezione diretta, grazie ai suoi bassi consumi di combustibile e alle alte potenze specifiche nella versione sovralimentata, ha quasi del tutto soppiantato il vecchio motore a precamera ma, per soddisfare i limiti imposti dalla normativa futura, sono necessari ulteriori approfondimenti di ricerca come la modulazione dell'iniezione nel ciclo motore in termini di anticipo e numero di iniezioni e l'applicazione di strategie innovative di controllo del ricircolo dei gas di scarico.

La figura 3 mostra come in dipendenza del peso del veicolo e quindi della potenza del motore, al fine di soddisfare la normativa Euro 4, in applicazione nel 2005, siano necessari interventi riguardanti il sistema di aspirazione e scarico e il sistema di iniezione. In particolare per motori piccoli sono necessari l'iniezione multipla con 2-4 iniezioni consecutive nel ciclo e un opportuno aumento di EGR per contenere le emissioni di NO_x. Per i motori montati su veicoli sopra 1.130 kg bisogna aggiungere un ricircolo dei gas di



Nelle foto, i propulsori realizzati dal gruppo PSA Peugeot Citroën, leader mondiale nella produzione di motorizzazioni a gasolio. Al centro: trasparenza del 2,2 l HDi a iniezione diretta *common rail* a controllo elettronico della Citroën C5; sopra: il nuovo 2,7 l V6 diesel bi-turbo adottato dalla Jaguar S-Type



Strategia da attuare sui moderni motori diesel per soddisfare la normativa Euro 4. [fonte Fiat]

scarico (EGR) raffreddato e per i veicoli sopra i 1.360 kg, sono necessari anche un aumento di pressione di iniezione, per aumentare la potenza massima, e un aumento della portata d'aria con controllo del *swirl* per ottimizzare la formazione della miscela aria-combustibile in camera di combustione. Da quanto sopra esposto si nota che la gestione del sistema di iniezione gioca un ruolo importante sia nel processo di ottimizzazione delle prestazioni che in quello di minimizzazione delle emissioni gassose e di particolato. Gli studi sul processo di combustione sono ancora in atto perché alcuni problemi, legati al controllo delle emissioni allo scarico di particolato e di NO_x, sono ancora irrisolti. Per approfondire queste tematiche si stanno utilizzando tecniche diagnostiche ad alta risoluzione temporale e spaziale basate sull'interazione luce-materia che consentono di studiare sia i processi termofluidodinamici interni al cilindro motore che le prime fasi di formazione delle specie inquinanti.

Sulla base delle conoscenze già acquisite, o in corso di acquisizione sul processo di combustione, si può affermare che i propulsori diesel offrono indubbi vantaggi in termini energetici vincendo la sfida con i più avanzati sistemi di conversione dell'energia come le *fuel cell*. Tuttavia, la loro affermazione sul mercato mondiale

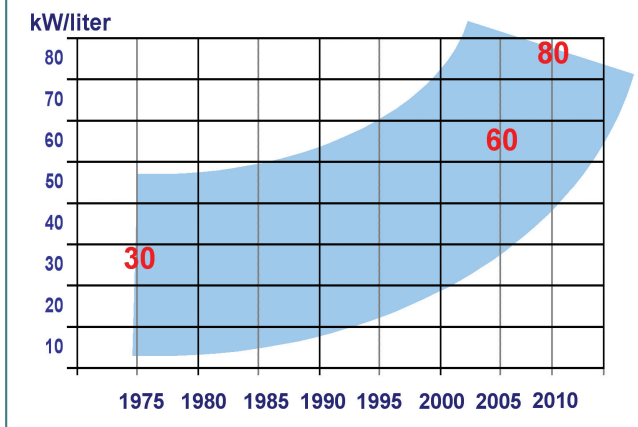
è condizionata dalla soluzione del problema che lega il particolato alle emissioni di NO_x in modo inversamente proporzionale. La simulazione multidimensionale della termofluidodinamica interna al cilindro motore ha evidenziato come la combustione e la formazione delle specie inquinanti siano fortemente condizionate sia dalla modulazione dell'iniezione del combustibile nel campo turbolento generato dal sistema di aspirazione sia dalla geometria della camera di combustione.

L'applicazione delle tecniche numeriche e sperimentali evidenziano come:

- la riduzione del tempo di pausa tra due consecutive iniezioni, da 1.800 μs a valori inferiori a 100 μs, comporti un notevole abbattimento del rumore di combustione e una simultanea lieve riduzione sia del particolato che del consumo specifico;
- tre iniezioni consecutive (una pre-ravvicinata alla principale, una principale piena e una post-iniezione ravvicinata) comportino una sostanziale simultanea riduzione del rumore, del particolato e del consumo;
- tre iniezioni distribuite tra una pre-ravvicinata e due principali consecutive (50 + 50 %) consentano di ridurre di circa il 30% le emissioni di ossido di azoto;
- una iniezione *post* molto ritardata possa contribuire a mantenere alta la temperatura dello scarico con benefici effetti su un eventuale filtro di particolato e/o un catalizzatore di NO_x.

Figura 4

Evoluzione della potenza specifica dei motori diesel al 2010



Road map del motore diesel per EU 5

Per l'ulteriore riduzione delle emissioni gassose e di particolato nel rispetto della normativa EU 5 (figura 4), sarà necessario l'adozione di un sistema di conversione catalitica degli ossidi di azoto e di un sistema di filtrazione delle particelle ultrasottili.

Mentre la tecnologia di filtrazione delle particelle ultrasottili è già disponibile, quella di conversione degli ossidi di azoto è ancora in fase di sviluppo ed è in corso la sperimentazione con un sistema di conversione catalitica basato sull'aggiunta di urea nello scarico (figura 5).

Motori a gas

I combustibili gassosi come i gas di petrolio liquefatto (GPL) e il gas naturale compresso (GNC) offrono le maggiori potenzialità per ridurre drasticamente le emissioni gassose e quelle di particolato nei centri urbani. Tuttavia, le difficoltà di rifornimento e stoccaggio a bordo del veicolo, soprattutto con riferimento al GNC, ne limitano la diffusione su larga scala. D'altra parte, proprio il GNC, per le sue caratteristiche fisico-chimiche, può fornire i migliori risultati in termini di abbattimento della tossicità dello scarico di un motore. Il gas naturale, infatti, non contiene composti aromatici come il benzene e gli IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici) e può consentire, a parità di rendimento, riduzione di CO₂ del 25% rispetto agli attuali motori ad accensione comandata e lieve riduzione anche rispetto ai moderni diesel i.d. È inoltre utile notare che il GNC è un

combustibile realmente alternativo al petrolio in quanto ha tra le altre cose una migliore distribuzione geopolitica, con riserve accertate significativamente maggiori e con una rete di approvvigionamento e di distribuzione estremamente diffusa a livello europeo. Il GNC può essere considerato come il combustibile «traghetto» dalla tecnologia attuale a basse emissioni a quella del futuro a «zero emissioni» come l'idrogeno. Tuttavia, il motore a idrogeno produrrebbe comunque gli NO_x che non potranno ancora essere abbattuti cataliticamente per la mancanza di un'appropriata tecnologia di trattamento catalitico dello scarico di tale tipologia di motori.

Il propulsore elettrico-fuel cell

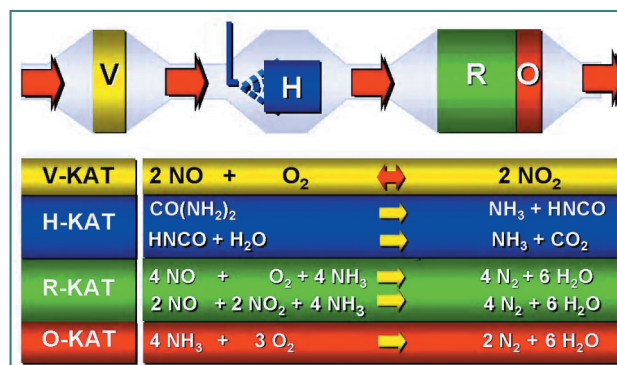
Nonostante il considerevole sforzo di ricerca dello scorso decennio, il propulsore elettrico è stato una valida soluzione solo per veicoli di nicchia per la notevole limitazione di autonomia connessa con la ridotta capacità di accumulo dell'energia nelle batterie di bordo.

Una valida soluzione è il propulsore elettrico-fuel cell che può ritenersi veramente a zero emissioni nel luogo di utilizzo. La Seicento Elettra H₂ Fuel Cell (presentata ufficialmente il 19 febbraio 2001 a Roma), nata dalla collaborazione integrata del Centro Ri-

cerche Fiat, dell'Istituto Motori (CNR), dell'Istituto per le Tecnologie Avanzate per l'Energia «Nicola Giordano» di Messina del CNR e dell'Enea, con il finanziamento del Ministero dell'Ambiente e di Fiat Auto, è il primo veicolo a «zero emissioni» sviluppato in Italia che utilizza l'idrogeno compresso trasportato a bordo per produrre l'energia elettrica per la trazione: sei bombole di idrogeno a 200 bar per complessivi 54 litri (0,8 kg), lo stack di 81 fuel cell, prodotto dalla Nuvera, per convertire l'idrogeno in energia elettrica, il pacco batterie, l'azionamento elettrico con un motore asincrono di 25 kW e l'insieme dei servizi per l'alimentazione dell'acqua e dell'aria allo stack.

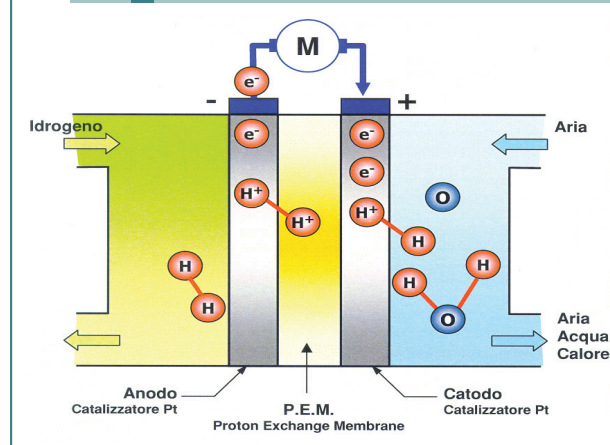
L'elemento innovativo del sistema di conversione di energia a «zero emissioni» è la pila a combustibile (fuel cell). Il principio di funzionamento è illustrato nella figura 6. La tabella 1 invece mostra il confronto delle prestazioni tra le Fiat Seicento, con motore termico ad accen-

Figura 5

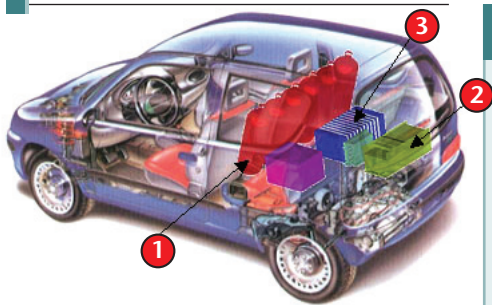


Sistema di conversione catalitica degli ossidi di azoto basato sull'uso dell'urea per i motori diesel del futuro

Figura 6



Principio di funzionamento della pila a combustibile (Fuel Cell). [fonte Nuvera]



Trasparenza della Fiat Seicento Elettra H₂ Fuel Cell:
1. Idrogeno compresso 2. Inverter 3. Fuel Cell Stack

sione comandata, Seicento Elettra, puramente elettrica con batterie al piombo, e Seicento Elettra H₂ Fuel Cell. Si nota che la Seicento «termica» emette gli inquinanti gassosi nei limiti Euro 3 e produce 150 g/km di CO₂ contro i 100 g/km della Seicento Fuel Cell alimentata a idrogeno prodotto da metano. La Seicento «termica» ha a suo vantaggio la maggiore autonomia. Nel confronto tra la Seicento Elettra e quella a Fuel Cell si nota l'aumento di autonomia e il tempo ridotto di rifornimento di quest'ultima. Una variante più complessa del sistema di propulsione a *fuel cell*, ancora oggetto di studio, è quella della figura 7 che mostra i principali componenti del sistema stesso. Esso comprende un «reformer» catalitico per la produzione a bordo dell'idrogeno e i sottosistemi di gestione dell'acqua e dell'aria per l'ottimizzazione delle prestazioni dello *stack* di *fuel cell*.

Propulsore ibrido termico-elettrico

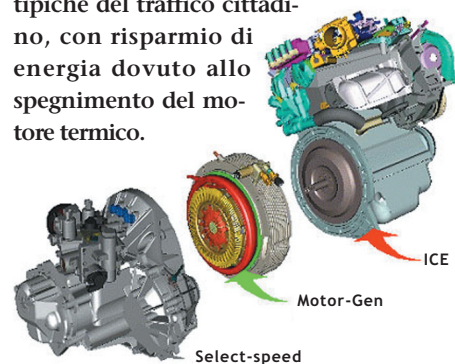
I propulsori per veicoli ibridi «termico-elettrico» possono essere considerati come sistemi di transizione verso quelli a *fuel cell*. Gli ibridi rappresentano un'evolu-

Confronto delle prestazioni			
Modello Vettura	FIAT Seicento	FIAT Seicento Elettra	FIAT Seicento Elettra H ₂ Fuel Cell
Peso Vettura (kg)	735	1.240	1.220
Abitabilità (persone)	5	4	2
Peso Batterie al piombo (kg)	14	500	250
Potenza Stack FuelCell (kW)	-	-	7
Potenza Motore elettrico a induzione/coppia	-	15/30 kW, 123 Nm	15/30 kW, 123 Nm
Capacità serbatoi idrogeno gassoso	-	-	54 l @ 200 bar
Accelerazione 0-50 km/h (s)	6	8	8
Velocità massima (km/h)	150	100	100
Pendenza massima a pieno carico (%)	35	20	20
Tempo ricarica /rifornimento (min)	1	240 - 480	< 10
Autonomia ciclo ECE (km)	500	83	140
Emissioni gassose HC, CO, NO _x	Euro 3 con catalizzatore 3 vie	-	-
Anidride Carbonica CO ₂ (g/km equivalenti)	150	-	100 (idrogeno da metano)

(Fonte CNR-IM) Tabella 1

zione del propulsore puramente termico. Lo scopo di tali soluzioni è quello di contenere il più possibile i transitori del propulsore termico, permettendo nel contempo allo stesso di lavorare in zone del piano coppia-giri ottimali per le emissioni e i consumi. Il sistema ibrido termico-elettrico, in fase di sviluppo avanzato presso il CRF con il nome di «Ecodriver», monta un generatore-motore elettrico, disposto tra il motore termico e un cambio automatico (*select-speed*), e un sistema di frizione elettronica per realizzare una strategia serie-parallela. In questa configurazione il motore elettrico può contribuire alle fasi di accelerazione, decelerazione e di recupero di energia in frenata. Può inoltre avviare il motore termico gestendo così le fasi di *stop and go*,

tipiche del traffico cittadino, con risparmio di energia dovuto allo spegnimento del motore termico.



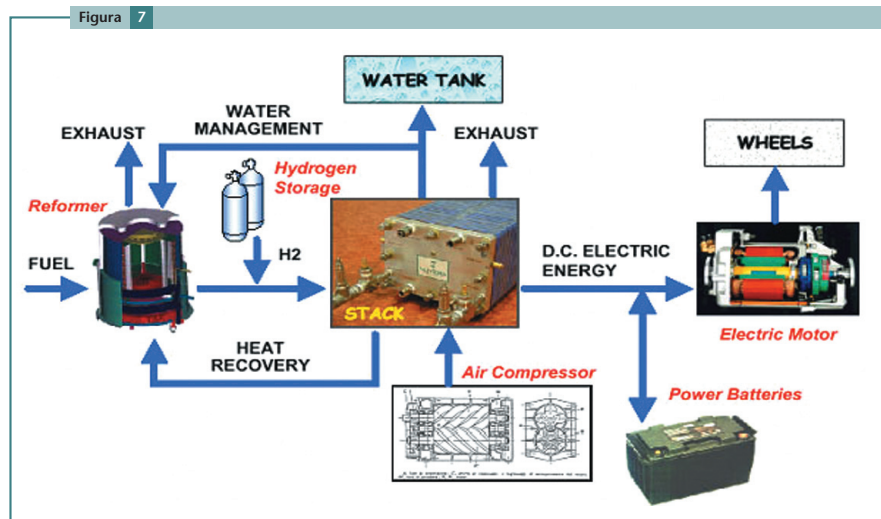
Il motore termico può essere un diesel avanzato a basso consumo di combustibile o un motore ad accensione comandata a benzina o a metano. [fonte CRF]

Ibrido benzina-elettrico

Nella versione a benzina, l'ibrido termico-elettrico con gestione integrata del *powertrain*, per il recupero in frenata e l'attuazione dello «stop and go», consente di abbassare i consumi energetici di circa il 30% e le emissioni del motore termico di circa il 50%.

Ibrido metano-elettrico

Notevoli potenzialità sono offerte dall'ibrido metano-elettrico, con gestione integrata del *powertrain*, che consente di soddisfare i severi limiti previsti dalla normativa americana per HC ed NO_x dei veicoli SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicles).



Sistema di propulsione elettrico-fuel cell con produzione di idrogeno a bordo del veicolo per mezzo di un «reformer» catalitico di combustibile liquido. [fonte CRF, CNR-IM]

Felice Esposito Corcione
Istituto Motori - CNR, Napoli
Si ringraziano G. Rovera del Centro Ricerche Fiat (CRF) e i ricercatori dell'Istituto Motori