I sistemi di propulsione per veicoli a basse emissioni

di Felice E. Corcione

In futuro è prevedibile che il motore a combustione interna dovrà competere con i nascenti sistemi di propulsione ibrida termico-elettrico ed elettrico-fuel cell a idrogeno sia in termini di efficienza energetica sia di emissioni inquinanti. L'applicazione di tecniche ottiche, basate sull'interazione luce-materia, e della simulazione numerica, con codici fluidodinamici multidimensionali, hanno consentito di analizzare in dettaglio i meccanismi di formazione delle specie inquinanti in camera di combustione.

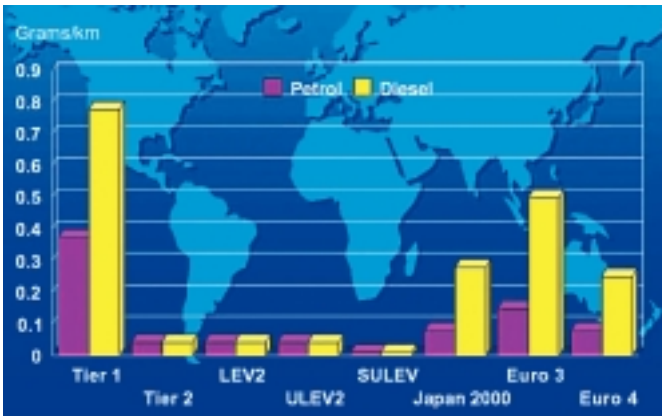

Figura 1 - Confronto tra i limiti degli NO_x imposti dalla normativa internazionale dal 1998 al 2010: Tier 1-Usa, Tier 2-Usa 2004, Lev2 (low emission vehicles), Ulev2 (ultra low emission vehicles), Sulev (super ultra low emission vehicles) e Euro 4-2005 (Fonte: Iea)

Nei prossimi venticinque anni la ricerca auto-motoristica sarà protagonista della formidabile sfida tecnologica che coinvolgerà aziende e laboratori di ricerca per migliorare la compatibilità ambientale del settore trasporti.
Nella sola Europa, la totale domanda di mobilità, crescerà del 2% all'anno per i passeggeri e del 3% all'anno per le merci. Il trasporto automobilistico (79% del totale), in passeggeri-chilometro, è circa 10 volte più elevato di quello effettuato con ciascun altro mezzo di locomozione (8% autobus, 7% aereo e 6% ferroviario). In termini ambientali, il contributo del traffico automobilistico all'inquinamento delle città è ancora abbastanza alto: circa il 26% di CO_2 e il 63% di NOx. La sfida tecnologica riguarderà la domanda di ricerca e sviluppo per far fronte alle significative riduzioni delle emissioni previste dalla Unione Europea. Infatti, i limiti delle emissioni di ossido di carbonio (CO), di ossido di azoto (NOx), di idrocarburi (HC) e di particolato carbonioso, espresse in g/km, prevedono, per il 2005 (step Euro 4), una riduzione di circa il 50% sia per i veicoli con motori ad accensione comandata sia per quelli con motori diesel e, per il 2010 (step Euro 5), un'ulteriore diminuzione del 50% rispetto al 2005. La Figura 1 riporta lo scenario dei limiti attuali e futuri degli NOx in g/km relativi a Europa, Giappone e Usa. Si nota che, a differenza degli Usa, sia in Europa sia in Giappone, i veicoli con motori diesel sono stati meno penalizzati rispetto a quelli con motori a benzina. Negli Usa, i limiti Sulev (super ultra low emission vehicle) in preparazione del Tier 3 in applicazione nel 2007 sono più bassi rispetto a Europa e Giappone di più del 50%. I limiti 2010 sono, pertanto, un riferimento fondamentale per la sfida tecnologica in atto.

F.E. Corcione, Direttore dell'Istituto Motori - Cnr - Via G. Marconi, 8 - 80125 Napoli. f.corcione@im.na.cnr.it

I sistemi di propulsione

I sistemi di propulsione attualmente in uso sono classificabili in: motori a combustione interna ad accensione comandata, diesel e a gas; elettrici, ibridi elettrici-"fuel cell" a idrogeno e ibridi termico-elettrico.

I motori a combustione interna
Il 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 questi 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 tuttavia apre nuove problematiche, principalmente legate all'eterogeneità della miscela e all'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. Si rendono quindi necessari ulteriori approfondimenti sulle seguenti tematiche:
- miglioramento degli strumenti di calcolo attraverso il confronto con opportuni esperimenti condotti all'interno e all'esterno del motore;
- sviluppo di diverse metodologie di formazione della miscela

(scelta della posizione e del tipo di getti in relazione al moto d'aria) con l'uso di modelli 3D;
- verifica delle soluzioni più promettenti su prototipi eventualmente definiti in collaborazione con l'industria motoristica;
- scelta delle strategie di controllo dell'iniezione, dell'accensione, del ricircolo dei gas di scarico (Egr) e, se possibile, dell'accoppiamento swirl-tumble;
- sistemi catalitici e metodologie di abbattimento degli HC nelle fasi di warm-up;
- sistemi per il controllo dell'apertura delle valvole pilotabili dall'unità di controllo motore (Ecu) come i sistemi a fasatura variabile elettromeccanici ed elettromagnetici.

Al momento, la mancanza della tecnologia catalitica di riduzione degli NOx, in eccesso di ossigeno, chiamata DeNOx, da utilizzare allo scarico di motori Gdi non stechiometrici ha spinto i costruttori a immettere sul mercato propulsori i.d. stechiometrici come il 2 litri dell'Alfa Romeo 156.

Il motore, utilizza 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" come si può osservare nella Figura 2. Nella stessa figura sono mostrati due fotogrammi consecutivi del getto di combustibile rilevato su banco stazionario con un sistema di visualizzazione a 10.000 fotogrammi/s.

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 fu basato su un variatore meccanico, a controllo elettronico, della posizione relativa camma-valvola per mezzo di un attuatore a controllo elettronico, come mostrato a sinistra della Figura 3. Questo sistema, già adottato da qualche costruttore, 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 e mostrato al centro della Figura 3, 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 mostrato a destra della Figura 3 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. Tuttavia, 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.

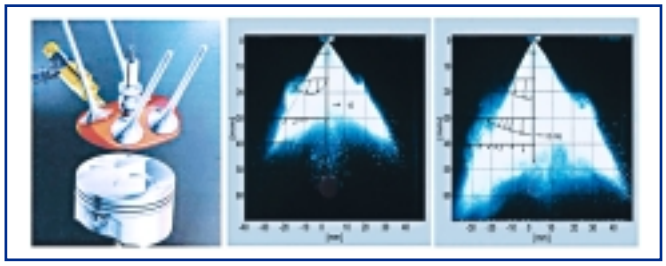

Figura 2 - Posizionamento dell'iniettore nel motore iniezione diretta "2.0 JTS Selespeed" prodotto dall'Alfa Romeo (Fonte: Alfa Romeo e IM)

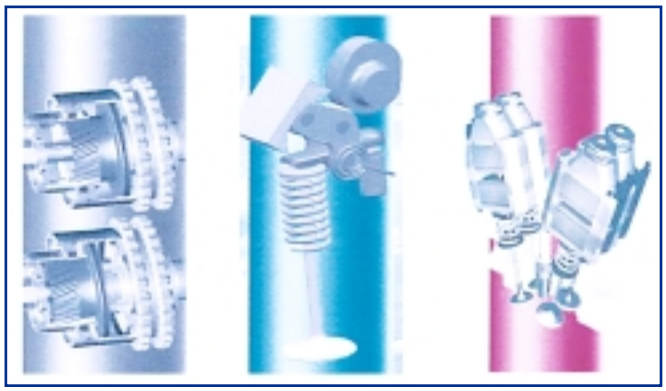

Figura 3 - Sistemi di attuazione delle valvole (sinistra: meccanico, centro: elettro-idraulico, destra: elettromagnetico) (Fonte: Crf e Fev)

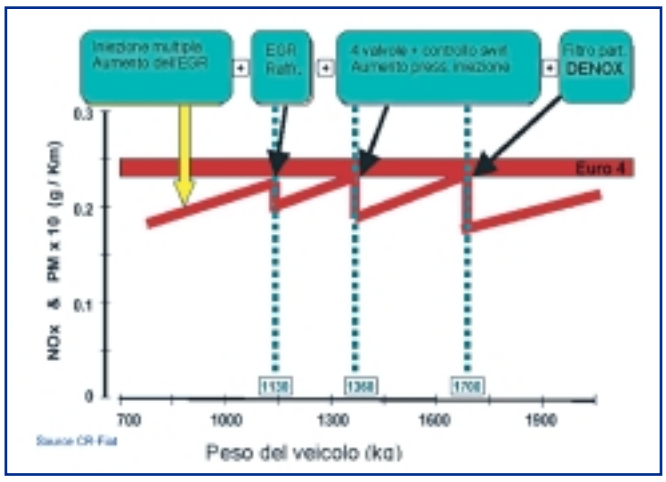

Figura 4 - Strategie da attuare sui moderni motori diesel per soddisfare la normativa Euro 4 (Fonte: Fiat)

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

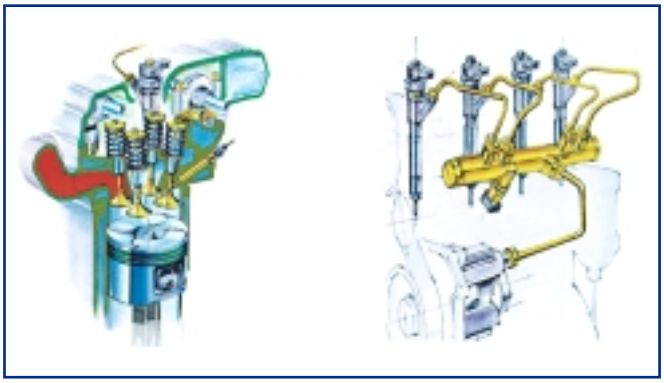

Figura 5 - Sistema di combustione del motore Fiat 2.4 Jtd (sinistra); sistema di iniezione common rail ad alta pressione della Bosch (destra) (Fonte: Fiat e Bosch)

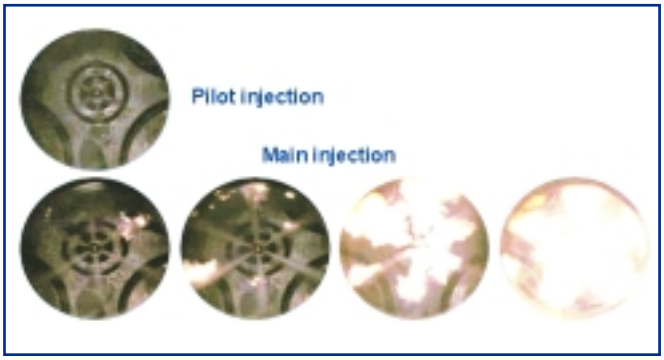

Figura 6 - Sequenza fotografica dell'iniezione (10.000 ft/s) e della combustione relativa al motore Fiat 1.9

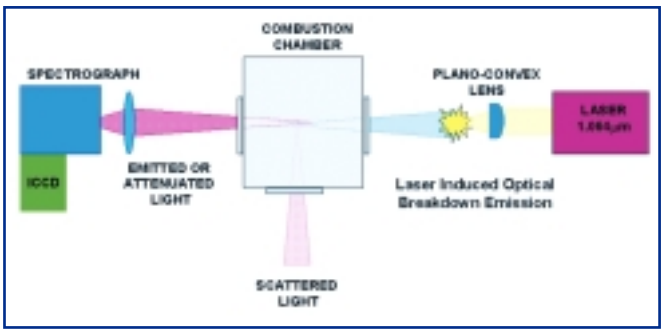

Figura 7 - Schema di principio della tecnica ottica utilizzata per seguire la formazione delle specie inquinanti in camera di combustione di un motore trasparente al banco (Fonte: Cnr-IM)

ra di combustione. Per i veicoli di classe superiore come l'Alfa Romeo 166 che monta il motore Fiat 2.4 Jtd sono necessari o un filtro di particolato o un catalizzatore DeNOx, entrambi ancora non disponibili. La Figura 5, a sinistra, mostra uno spaccato del sistema di combustione dello stesso motore in versione 4 valvole di prossima produzione ove sono evidenti le difficoltà di posizionamento dell'elettroiniettore e della candeletta di preriscaldo per la partenza a freddo. Sulla destra della stessa Figura 5 è mostrato il circuito idraulico del common rail prodotto dalla Bosch che può realizzare, per mezzo di una pompa a tre pistoni radiali, una pressione nel rail fino a 1.600 bar.
Da quanto sopra esposto si nota che la gestione del sistema di iniezione gioca un ruolo importante sia nel processo di ottimizzazione delle prestazioni sia in quello di minimizzazione delle emissioni gassose e di particolato. Nei passati vent'anni, il sistema di iniezione ha subito un notevole sviluppo tecnologico soprattutto con l'aumento consistente della pressione di iniezione, passando da circa 300 bar dei primi motori a iniezione diretta degli anni Ottanta ai 1.300 bar degli attuali motori "common rail".
Gli studi sul processo di combustione sono ancora in atto perché alcuni problemi, legati al controllo delle emissioni allo scarico di particolato e di NOx, sono ancora irrisolti. Per approfondire queste tematiche, si stanno utilizzando tecniche diagnostiche ad alta risoluzione temporale e spaziali basate sull'interazione luce-materia che consentono di studiare sia i processi termofluidodinamici interni al cilindro motore sia le prime fasi di formazione delle specie inquinanti.
La Figura 6 mostra la sequenza fotografica dell'iniezione e della combustione del motore Fiat 1.9 Jtd. Si nota che l'iniezione pilota (fotogramma in alto) influenza la fase di autoaccensione riducendo il tempo di ritardo all'accensione con conseguente vantaggi sulla produzione del rumore del motore.
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 NOx in modo inversamente proporzionale. Le recenti indagini numeriche e sperimentali condotte con tecniche diagnostiche molto sofisticate, quali la simulazione multidimensionale dei processi e la spettroscopia dell'autoaacensione e della combustione, hanno consentito di comprendere più chiaramente i meccanismi che sono alla base di tale legame. In particolare, la simulazione multidimensionale della termofluidodinamica interna al cilindro motore ha evidenziato che la combustione e la formazione delle specie inquinanti sono fortemente condizionati dalla modulazione dell'iniezione del combustibile nel campo turbolento generato dal sistema di aspirazione e condizionato dalla geometria della camera di combustione.
Dal punto di vista sperimentale, le attuali tecniche diagnostiche, messe a punto in Istituto Motori, basate sull'interazione luce-materia, consentono di seguire nel tempo e nello spazio, con elevata risoluzione, le fasi di formazione dei primi prodotti dell'autoaccensione (radicali OH, CH e HCO) e della combustione (NO e particolato) sin dall'inizio dell'iniezione. La tecnica di estinzione e diffusione (scattering), illustrata nella Figura 7, consente di seguire la formazione degli NO e del particolato in camera di combustione.
La tecnica si bassa sull'interazione tra la luce, generata dalla scarica in aria provocata dall'impulso ad alta energia del laser pulsato a 1.064 μm, e i prodotti di combustione presenti nel volume di misura. Il tutto è possibile perché la luce generata dalla scarica in aria, nel campo ultravioletto-visibile (200-600 nm), viene focalizzata nel volume di misura. La luce trasmessa e diffusa dai prodotti presenti nel volume di misura viene raccolta ed analizzata da una telecamera intensificata che ne fornisce gli spettri di assorbimento e scattering.
La Figura 8 riporta un esempio della potenzialità di una variante della tecnica prima descritta, denominata tecnica di chemiluminescenza o emissività nel campo Uv-visibile, impiegata per la determinazione temporale e spaziale dei primi prodotti di formazione dell'autoaccensione (OH, HCO e CH) di un motore diesel con accessi ottici operante in due condizioni di carico. Relativamente alla emissione di particelle ultrasottili dagli

scarichi del motore diesel, l'Istituto Motori ha messo a punto una variante della tecnica ottica "non intrusiva" che ha consentito di determinare simultaneamente dimensioni e concentrazione delle particelle nel campo 10-100 nm. In particolare, l'applicazione della tecnica allo scarico del motore diesel 1.9 Jtd common rail ha evidenziato la presenza di un picco intorno ai 10 nm.

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, riduzioni di CO_2 del 25% rispetto agli attuali motori ad accensione comandata e lievi riduzione anche rispetto ai moderni diesel i.d.. Pertanto esso può essere con profitto utilizzato in parchi veicolari "chiusi" (trasporto pubblico urbano, distribuzione merci, raccolta dei rifiuti solidi urbani), per i quali i sopra citati problemi di rifornimento e stoccaggio sono notevolmente ridimensionati.

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" della tecnologia attuale a bassa emissioni a quella del futuro a zero emissioni come l'idrogeno. Tuttavia, il motore a idrogeno produrrebbe comunque gli NOx 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 ed 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 delle 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, nata dalla collaborazione integrata del Centro Ricerche Fiat, dell'Istituto Motori, dell'Istituto per le Tecnologie Avanzate per l'Energia "Nicola Giordano" di Messina e dell'Enea, con il finanziamento del Ministero dell'Ambiente e di Fiat Auto, presentata ufficialmente il 19 febbraio 2001 a Roma, è il primo veicolo a zero emissioni circolante in Italia che utilizza l'idrogeno, trasportato a bordo, per produrre l'energia elettrica per la trazione.

Il sistema, mostrato in Figura 9, comprende: sei bombole di idrogeno a 200 bar per complessivi 54 litri (0,8 kg), lo stack di 81 fuel cells, 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 10. L'idrogeno, immagazzinato in bombole ad alta pressione in forma gassosa, viene inviato a pressione costante all'anodo della pila, ove in presenza di un catalizzatore al platino si ionizza positivamente (protone) rilasciando due elettroni, il protone passa, quindi, attraverso una membrana selettiva "protonica", chiamata Proton Exchange Membrane (PEM) per incontrare l'ossigeno, inviato sul catodo per mezzo di un compressore a portata variabile, producendo vapore acqueo.

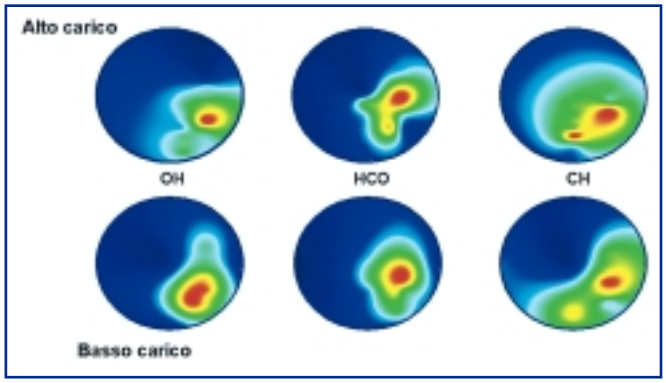

Figura 8 - Distribuzione spaziale di OH, HCO e CH determinata utilizzando la tecnica di chemiluminescenza (Fonte: Cnr-IM)

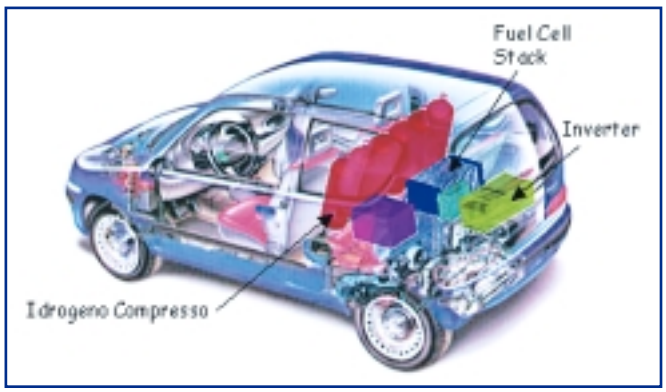

Figura 9 - Fiat Seicento Electra H2

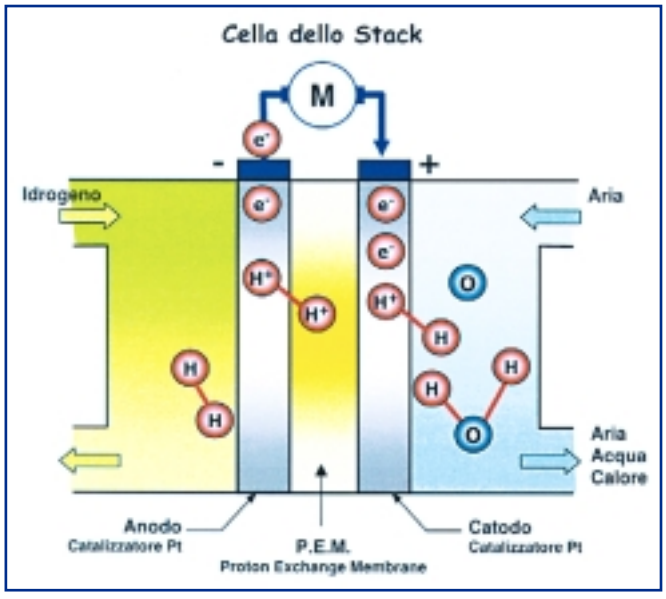

Figura 10 - Principio di funzionamento della pila a combustibile (fuel cell) (Fonte: Nuvera)