



Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

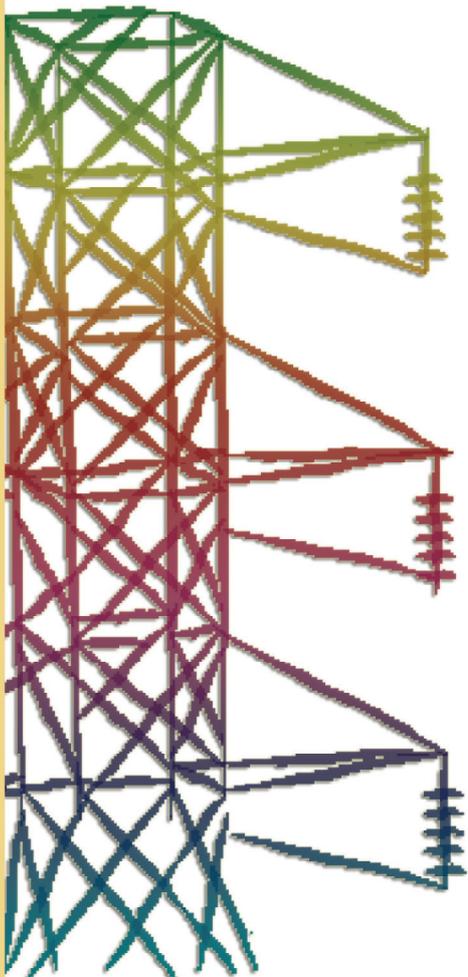
## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

### **Celle a combustibile**

### **Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia**

**Marina Ronchetti**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Celle a combustibile  
Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia

*Marina Ronchetti*

CELLE A COMBUSTIBILE  
STATO DI SVILUPPO E PROSPETTIVE DELLA TECNOLOGIA

Marina Ronchetti (ENEA)

Gennaio 2008

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Celle a combustibile per applicazioni stazionarie cogenerative

Responsabile Tema: Angelo Moreno, ENEA

## **PREMESSA**

*Le celle a combustibile sono fra i sistemi più promettenti per la produzione di energia elettrica, sia per le loro positive caratteristiche energetiche ed ambientali che per l'ampiezza delle possibili applicazioni. La tecnologia trova impiego in settori, che vanno dalla generazione distribuita per le aziende elettriche, alla cogenerazione residenziale e industriale, alla generazione portatile e alla trazione.*

*Le celle a combustibile stanno ricevendo notevole attenzione in quanto costituiscono, per la loro capacità di utilizzare in maniera ottimale l'idrogeno, la tecnologia chiave per lo sviluppo di questo vettore energetico.*

*Il rapporto, a carattere divulgativo e redatto in modo da costituire il punto di partenza per maggiori approfondimenti, presenta lo stato di sviluppo delle diverse tecnologie di cella ed una rassegna dei risultati ottenuti dalle principali industrie ed organizzazioni che operano nel settore.*

*Si desidera ringraziare per il gentile contributo fornito:*

*Ansaldo Fuel Cells SpA*

*Exergy Fuel Cells*

*Centro Ricerche FIAT*

*Cesi Ricerca*

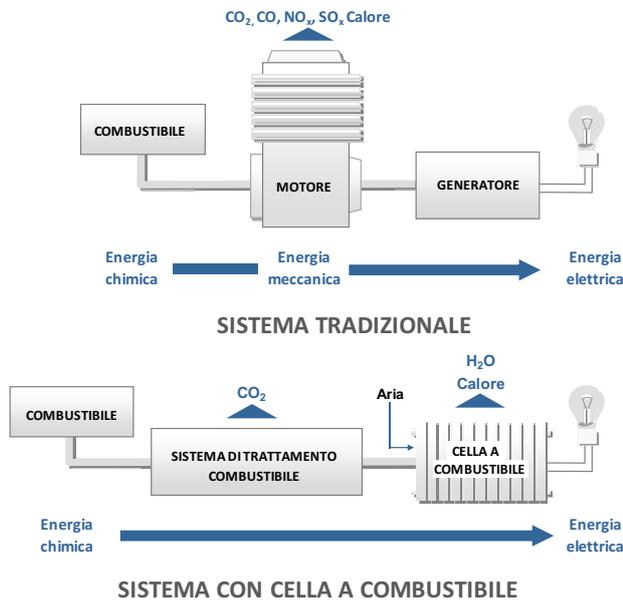
*FN Tecnologie e Servizi Energetici Avanzati*

*Istituto CNR-TAE*

# INDICE

<b>LA TECNOLOGIA</b>	<b>7</b>
Le caratteristiche	9
Tipi di celle ed applicazioni	10
Aree di applicazione	10
<i>Generazione di potenza stazionaria</i>	11
<i>Trasporto</i>	12
<i>Generazione portatile</i>	18
Possibile utilizzo delle celle a combustibile in campo militare	17
<b>I PROGRAMMI DI RICERCA, SVILUPPO E DIMOSTRAZIONE</b>	<b>19</b>
Stati Uniti	19
Giappone	21
Sud Corea	23
Canada	23
Europa	24
<b>ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO DI SISTEMI PER APPLICAZIONI MILITARI</b>	<b>26</b>
Nord America (Stati Uniti e Canada)	26
Europa	28
Asia e Resto del Mondo	29
<b>TERMODINAMICA DELLA CELLA, RENDIMENTI</b>	<b>30</b>
<b>CELLE AD ELETTROLITA POLIMERICO</b>	<b>33</b>
Componenti di cella	34
Applicazioni stazionare e generazione portatile	36
Applicazioni nel trasporto	51
<i>I programmi internazionali</i>	51
<i>I programmi dei costruttori automobilistici</i>	55
<i>Autobus a celle a combustibile</i>	66
<i>Prospettive di mercato dei veicoli con celle a combustibile</i>	77
<i>La scelta del combustibile</i>	78
<i>Accumulo e distribuzione dell' idrogeno</i>	80
<i>Altre applicazioni nel trasporto</i>	90
Le attività di ricerca e sviluppo in Italia	92
<b>CELLE AD ACIDO FOSFORICO</b>	<b>101</b>
Programmi di ricerca, sviluppo e dimostrazione	102
<i>Stati Uniti</i>	102
<i>Giappone</i>	104
Esperienze dimostrative condotte in Italia	106
<b>CELLE A CARBONATI FUSI</b>	<b>109</b>
Programmi di ricerca, sviluppo e dimostrazione	110
<i>Stati Uniti</i>	110
<i>Giappone</i>	113
<i>Europa</i>	114
Le attività di ricerca e sviluppo in Italia	116

<b>CELLE A OSSIDI SOLIDI</b>	<b>123</b>
Programmi di ricerca, sviluppo e dimostrazione	126
Le attività di ricerca e sviluppo in Italia	136
<b>CELLE ALCALINE</b>	<b>138</b>
<b>CELLE A METANOLO DIRETTO</b>	<b>140</b>
Attività di ricerca e sviluppo	141
<b>Appendice A. Stazioni di rifornimento idrogeno</b>	<b>145</b>
<b>Appendice B. Produzione di idrogeno</b>	<b>149</b>
<b>Acronimi e abbreviazioni, simboli</b>	<b>157</b>
<b>Riferimenti</b>	<b>160</b>
<b>Siti web</b>	<b>161</b>



Conversione di energia - Confronto tra celle a combustibile e sistemi tradizionali

Le celle a combustibile sono sistemi elettrochimici capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile (in genere idrogeno) direttamente in energia elettrica, senza l'intervento intermedio di un ciclo termico, non sono soggette quindi alle limitazioni del ciclo di Carnot e di conseguenza permettono rendimenti di conversione più elevati rispetto a quelli delle macchine termiche convenzionali.

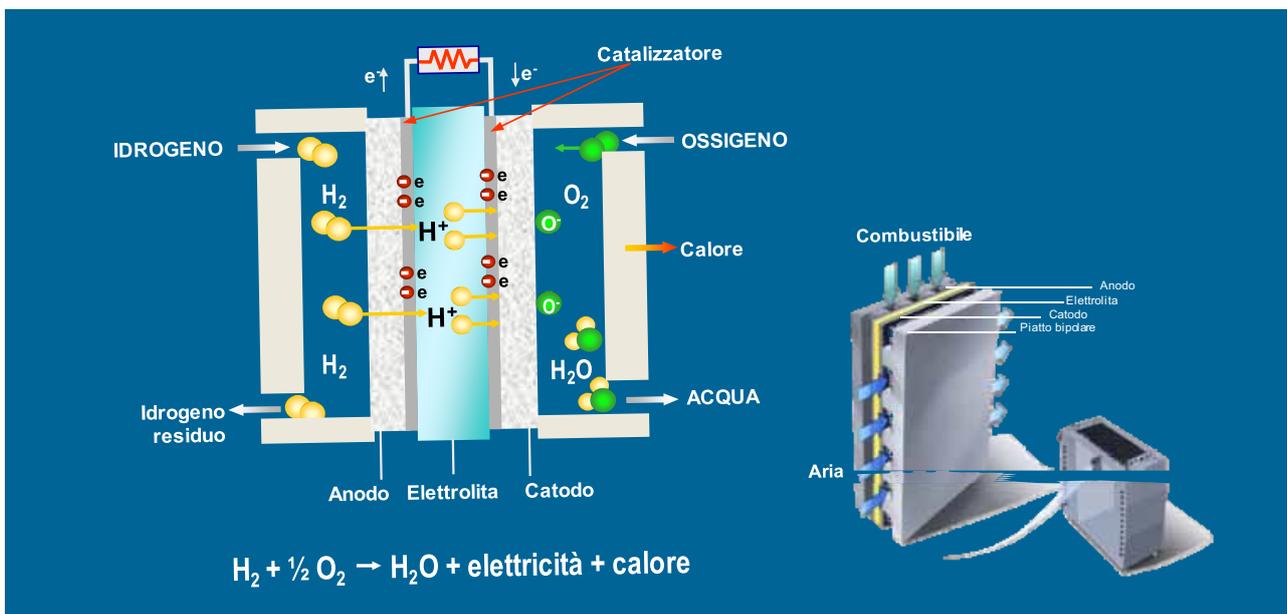
Una cella a combustibile funziona in modo analogo ad una batteria, in quanto produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico, tuttavia a differenza di quest'ultima consuma sostanze provenienti dall'esterno ed è quindi in grado di operare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile (idrogeno) ed ossidante (ossigeno o aria).

Una cella è composta da due elettrodi in materiale poroso, separati da un elettrolita. Gli elettrodi fungono da siti catalitici per le reazioni di cella che consumano fondamentalmente idrogeno ed ossigeno, con produzione di acqua e passaggio di corrente elettrica nel circuito esterno. L'elettrolita ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiudendo il circuito elettrico all'interno della cella. La trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore, che è necessario estrarre per mantenere costante la temperatura di funzionamento della cella.

Una singola cella produce normalmente una tensione di circa 0,6-0,7 V e correnti comprese tra 300 e 800 mA/cm<sup>2</sup>, quindi per ottenere la potenza ed il voltaggio desiderato più celle sono disposte in serie, a mezzo di piatti bipolari, a formare il cosiddetto "stack". Gli stack a loro volta sono assemblati in moduli, per ottenere generatori della potenza richiesta.

Esistono diverse tecnologie di cella, con diverse caratteristiche e diverso grado di sviluppo. Normalmente le celle vengono classificate sulla base dell'elettrolita utilizzato (celle alcaline, ad elettrolita polimerico, ad acido fosforico, a carbonati fusi, ad ossidi solidi) o della temperatura di funzionamento (celle a bassa e ad alta temperatura).

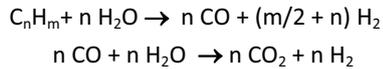
L'elettrolita determina o condiziona fortemente: il campo di temperatura operativo, il tipo di ioni e la direzione in cui diffondono attraverso la cella, la natura dei materiali costruttivi, la composizione dei gas reagenti, le modalità di smaltimento dei prodotti di reazione, le caratteristiche di resistenza meccanica e di utilizzo e per finire la durata della cella.



Un impianto con celle a combustibile è costituito da tre sezioni principali:

- una **sezione di trattamento del combustibile** (gas naturale, metanolo, gas prodotti dalla gassificazione del carbone, biogas), che converte lo stesso in un gas di sintesi contenente idrogeno, purificato secondo le necessità imposte dal tipo di cella.

La produzione di idrogeno viene ottenuta con sistemi che utilizzano processi di steam reforming, ossidazione parziale o reforming autotermico. Il processo normalmente impiegato quando si parte da idrocarburi leggeri è quello di reforming catalitico con vapore, seguito da conversione dell'ossido di carbonio, abbiamo:

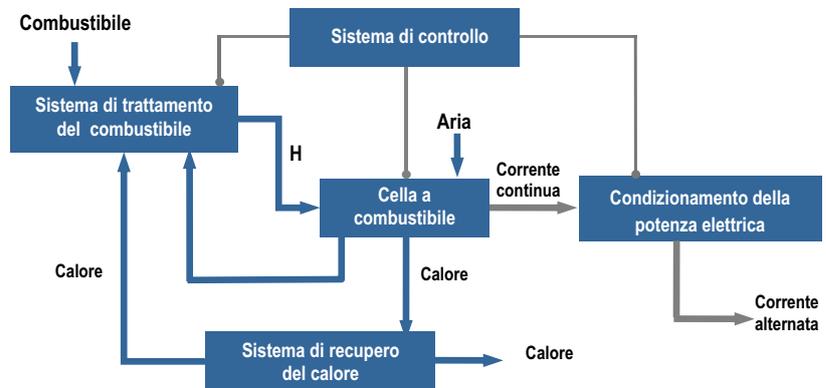


Nel processo occorre adottare condizioni di reazione che prevengano la formazione di composti indesiderati (es. formazione di carbone) che comprometterebbero l'efficienza del processo stesso.

Questa sezione non è necessaria se si utilizza idrogeno, se s'impiegano celle ad alta temperatura (MCFC e SOFC) in cui la riforma del combustibile avviene all'interno della cella stessa o nel caso di celle a metanolo diretto (DMFC);

- una **sezione elettrochimica**, costituita dalle celle che producono energia elettrica per via elettrochimica attraverso una reazione tra l'idrogeno alimentato all'anodo e l'ossigeno alimentato al catodo; la trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore;
- un **sistema di condizionamento della potenza elettrica**, che trasforma l'energia, prodotta sotto forma di corrente elettrica continua, in corrente alternata di opportune caratteristiche.

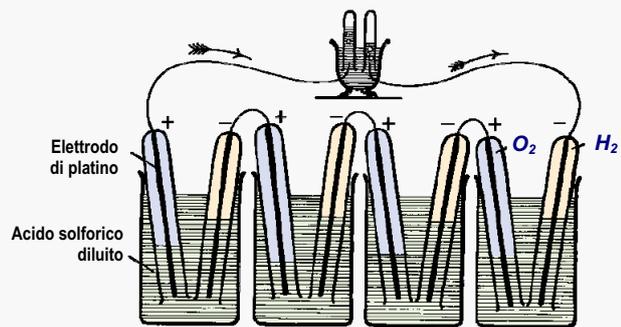
Completano l'impianto un sistema di regolazione e di recupero del calore, che può essere utilizzato sia all'interno dell'impianto (ad es. per il reattore di conversione del combustibile), che per utenze esterne di cogenerazione e un sistema di controllo che assicura il coordinamento delle diverse sezioni dell'impianto.



Schema di un impianto con celle a combustibile

### Qualche cenno storico

La storia delle celle a combustibile inizia con William Robert Grove (1811-1896), giurista e fisico inglese. Come risultato di esperimenti e studi sull'elettrolisi dell'acqua, Grove pensò che fosse possibile invertire il processo e generare elettricità facendo reagire idrogeno ed ossigeno e nel 1839 costruì quella che è considerata la prima cella a combustibile. Nel suo esperimento era riuscito a generare elettricità usando una cella contenente acido solforico, dove erano stati immersi due elettrodi, costituiti da sottili fogli di platino, sui quali arrivavano rispettivamente idrogeno ed ossigeno.



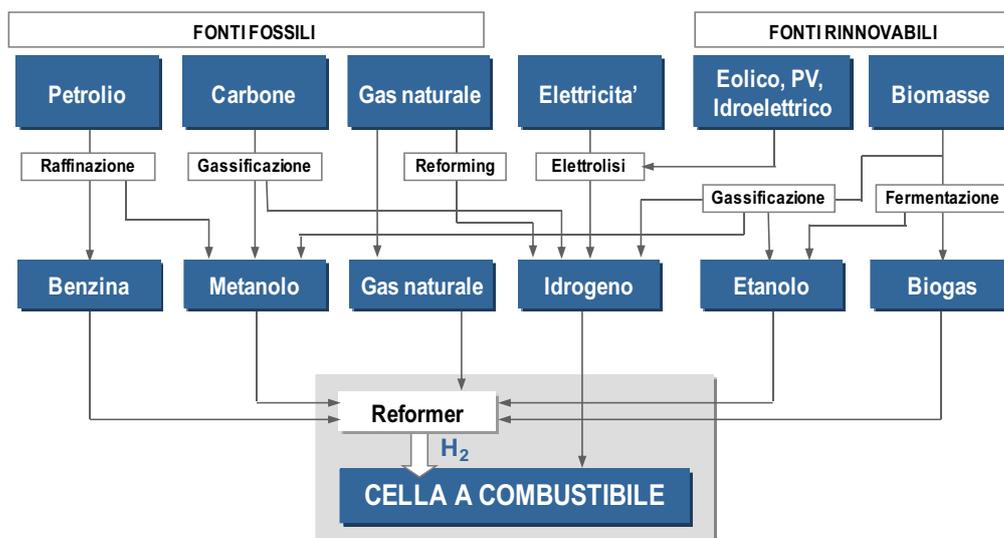
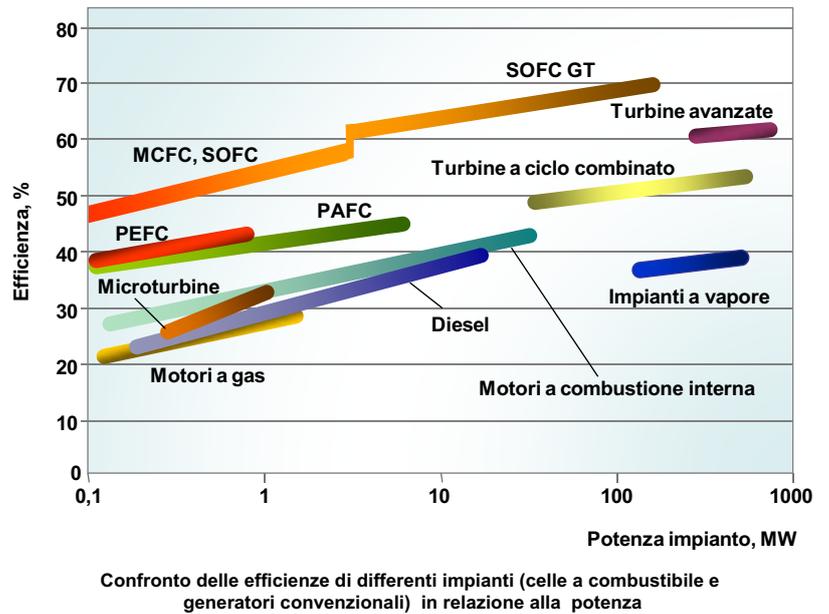
Disegno della cella di Grove (1839)

Successivamente furono realizzate celle a sali fusi (Becquerel, 1855), con elettrolita alcalino (Bacon, 1932) e con elettrolita solido costituito da miscele di ossidi (Baur e Preis, 1937). I primi utilizzi pratici della tecnologia risalgono agli anni '60 del Novecento quando l'Agenzia Spaziale Americana (National Aeronautics and Space Administration) decise di utilizzare le celle a combustibile per generare energia elettrica a bordo dei veicoli spaziali.

Le celle a combustibile rivestono un notevole interesse al fine della produzione di energia elettrica, in quanto presentano caratteristiche energetiche ed ambientali tali da renderne potenzialmente vantaggioso l'impiego.

Possiedono:

- Rendimento elettrico elevato**, con valori che vanno dal 40-48% (riferito al potere calorifico inferiore del combustibile) per gli impianti con celle a bassa temperatura, fino a raggiungere oltre il 60% per quelli con celle ad alta temperatura utilizzate in cicli combinati.
- Possibilità di utilizzo di una ampia gamma di combustibili** come metano, metanolo, gas naturale, gas di sintesi (prodotto da combustibili liquidi, gassificazione del carbone, biomasse).
- Modularità**, che permette di accrescere la potenza installata via via che cresce la domanda di energia elettrica, con notevoli risparmi sul piano economico e con tempi di costruzione che possono risultare notevolmente ridotti.
- Efficienza indipendente dal carico e dalle dimensioni dell'impianto**. Il rendimento delle celle è poco sensibile alle variazioni del carico elettrico, diversamente da quanto si verifica con gli impianti convenzionali. In pratica una cella può operare tra il 30 e il 100% di carico, senza perdite consistenti di efficienza. Il rendimento è inoltre indipendente dalla potenza installata entro un ampio intervallo di potenza, mentre negli impianti tradizionali il rendimento diminuisce al decrescere della taglia dell'impianto.
- Ridotto impatto ambientale**, sia dal punto di vista delle emissioni gassose che di quelle acustiche, il che consente di collocare gli impianti anche in aree residenziali, rendendo il sistema particolarmente adatto alla produzione di energia elettrica distribuita.
- Possibilità di cogenerazione**. Il calore cogenerato può essere disponibile a diversa temperatura, in forma di vapore o acqua calda, ed impiegato per usi sanitari, condizionamento di ambienti, ecc..



Combustibili utilizzabili in una cella a combustibile

## TIPI DI CELLE ED APPLICAZIONI

**CELLE ALCALINE** (AFC, Alkaline Fuel Cell), usano un elettrolita costituito da idrossido di potassio ed operano a temperature tra 60 e 120 °C. Hanno raggiunto un buon grado di maturità tecnologica soprattutto per usi speciali (applicazioni militari e spaziali). Le loro caratteristiche (richiedono gas di alimentazione estremamente puri) ne hanno limitato fortemente la diffusione, tanto che oggi non vi sono programmi di sviluppo in corso.

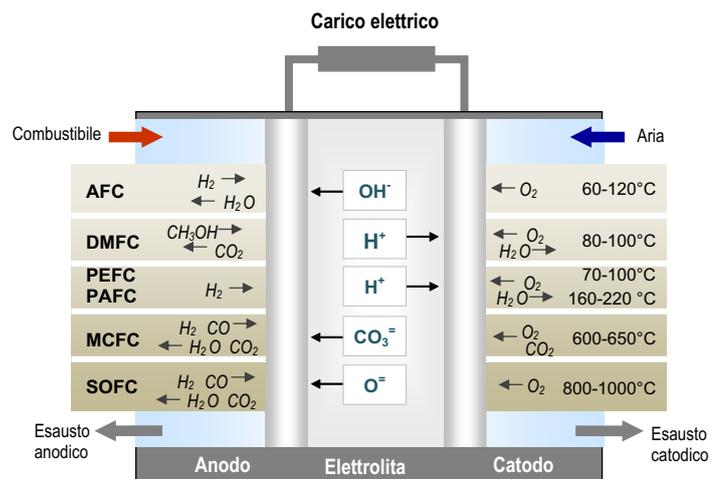
**CELLE AD ELETTROLITA POLIMERICO** (PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell), usano come elettrolita una membrana polimerica ad elevata conducibilità protonica e funzionano a temperature comprese tra 70 e 100 °C; sono sviluppate soprattutto per la trazione e la generazione/cogenerazione di piccola taglia (1-250 kW).

**CELLE AD ACIDO FOSFORICO** (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell), operano a temperature prossime ai 200 °C con un elettrolita costituito da una soluzione concentrata di acido fosforico; rappresentano la tecnologia più matura per gli usi stazionari, con commercializzazione già avviata per le applicazioni di cogenerazione nei settori residenziale e terziario (100-200 kW).

**CELLE A CARBONATI FUSI** (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell), usano come elettrolita una soluzione di carbonati alcalini fusa alla temperatura di funzionamento della cella (650 °C) e contenuta in una matrice ceramica porosa; sono adatte soprattutto per la generazione di energia elettrica e la cogenerazione da qualche centinaio di kW ad alcune decine di MW.

**CELLE AD OSSIDI SOLIDI** (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell), funzionano a temperatura elevata (circa 900-1000 °C) per assicurare una conducibilità sufficiente all'elettrolita, costituito da materiale ceramico (ossido di zirconio drogato con ossido di ittrio); come le celle a carbonati, sono promettenti soprattutto per la generazione di energia elettrica e la cogenerazione da qualche kW ad alcune decine di MW.

**CELLE A METANOLO DIRETTO** (DMFC, Direct Methanol Fuel Cell), operano a temperature tra 80 e 100 °C e come le PEFC utilizzano come elettrolita una membrana polimerica. Si stanno sviluppando per applicazioni portatili.



## AREE DI APPLICAZIONE

Le celle a combustibile presentano proprietà che ne rendono molto interessante l'impiego nel campo della produzione di energia elettrica e del trasporto, in quanto rispondono perfettamente agli obiettivi che si perseguono per garantire uno sviluppo sostenibile del pianeta, e cioè:

- miglioramento dell'efficienza e del risparmio energetico
- diversificazione delle fonti energetiche
- contenimento delle emissioni di inquinanti nell'atmosfera.

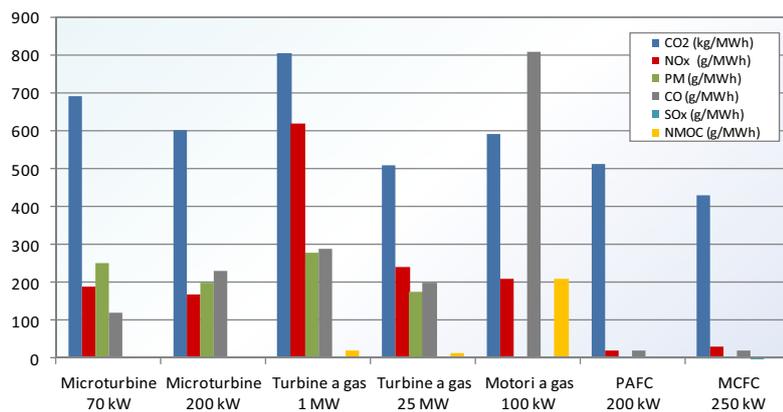


SEGMENTO DI MERCATO	POTENZA	TIPO DI CELLA
Applicazioni isolate	0,5-10 kW	PEFC, SOFC
Potenza residenziale	1-10 kW	PEFC, SOFC
Cogenerazione commerciale e residenziale	50 - 250 kW	PEFC, PAFC
Cogenerazione industriale	200 kW - 2 MW	MCFC, SOFC
Potenza distribuita	2 - 20 MW	PAFC, MCFC, SOFC
Generazione centralizzata	< 50 MW	MCFC, SOFC
Trasporto	5 - 200 kW	PEFC, SOFC
Generazione portatile ed elettronica di consumo	< 100 W	DMFC, PEFC

## GENERAZIONE DI POTENZA STAZIONARIA

La diffusione dei sistemi con celle a combustibile richiede che vengano superate le barriere che ancora limitano lo sviluppo delle varie tecnologie, e che siano messi a punto prodotti in grado di competere, per affidabilità, durata e costi con gli altri sistemi di generazione di potenza disponibili sul mercato, come turbine a gas e a vapore (semplici o a ciclo combinato). Questi negli ultimi anni hanno fatto registrare notevoli miglioramenti dal punto di vista dell'efficienza, ma non hanno tuttavia ancora dimostrato quel livello di accettabilità ambientale che è proprio delle celle a combustibile.

Le celle a combustibile risultano particolarmente adatte alla generazione di potenza distribuita, lo sviluppo del loro mercato dipende pertanto fortemente dall'evoluzione in atto con la liberalizzazione ed apertura del mercato dell'energia. Oggi in tutto il mondo la tendenza è quella di abbassare la taglia media degli impianti di generazione. Negli Stati Uniti si è scesi da una taglia media di 600 MW ai 100 MW del 1992, per arrivare poi agli attuali 20 MW o meno. In Italia, grazie soprattutto agli apporti degli autoproduttori industriali e civili, la taglia media è scesa ad alcune decine di MW. E' quindi prevedibile uno spazio crescente per sistemi di produzione di energia elettrica di piccole-medie dimensioni a limitato impatto ambientale, ed elevata efficienza come le celle a combustibile.



Emissioni di impianti a celle a combustibile e di impianti di generazione di potenza di tipo tradizionale

Air Resources Board (CARB) e sono stati certificati come impianti "ultra-low emissions" presentando un contenuto di NO<sub>x</sub>, CO e composti organici volatili al di sotto degli standard CARB più recenti, considerati tra i più restrittivi al mondo.

Le ridotte emissioni di inquinanti atmosferici locali sono abbinate ad un livello di rumorosità estremamente basso (inferiore ai 60 dBA a 10 metri), non essendo presenti grossi organi in movimento.

Un impianto a celle a combustibile presenta un'efficienza energetica superiore a quella dei sistemi convenzionali, anche nelle loro configurazioni più avanzate. Da ciò deriva una significativa riduzione della quantità di CO<sub>2</sub> emessa, a parità di energia elettrica e calore prodotti. Prendendo come esempio un impianto da 200 kW a gas naturale (emissioni CO<sub>2</sub> pari a circa 190 kg/MWh), si stima che l'utilizzo delle celle a combustibile, per le quali si assume un rendimento del 40%, porti, rispetto ad un motore a gas della stessa taglia (rendimento 30%), ad un risparmio, in termini di emissioni di CO<sub>2</sub>, di circa 1.000 t/anno, considerando un utilizzo medio di 7000 ore/anno.

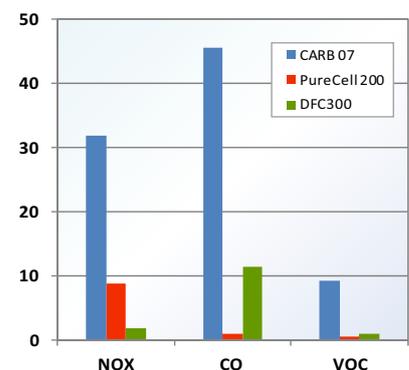
Cresce il consenso da parte di esperti nel settore sul fatto che, nel lungo termine, le celle a combustibile potrebbero trovare largo impiego nel mercato della generazione distribuita. Il passaggio dalla generazione centralizzata alimentata con combustibili fossili, a sistemi con celle a combustibile, inserite in una rete di generazione distribuita, ed alimentate con idrogeno prodotto da rinnovabili potrebbe ridurre notevolmente le emissioni di CO<sub>2</sub>.

Gli impianti con celle a combustibile in funzione delle caratteristiche di modularità, flessibilità, rendimento e compatibilità ambientale possono trovare applicazione sia presso utenti (utenze commerciali ed industriali, residenze private, uffici pubblici), con piccoli impianti di generazione da alcuni kW a qualche MW, che presso aziende elettriche con taglie da qualche MW a qualche decina di MW.

Un recente studio dell'International Energy Agency "Prospects for Hydrogen and Fuel Cells" prevede al 2050 una capacità installata di 200-300 GW, pari al 2-3% della capacità totale.

Il principale ostacolo alla penetrazione nel mercato degli impianti con celle a combustibile è rappresentato dall'alto costo di produzione. Attualmente per impianti con celle a combustibile si riportano costi che oscillano tra 3.000 e 5.000 €/kW (tecnologie allo stadio prototipale), mentre impianti di tipo convenzionale fanno registrare costi nell'intervallo che va dai 300-

Le emissioni degli impianti con celle a combustibile si mantengono infatti al di sotto di quelle di impianti di tipo tradizionale di taglia equivalente. Il contenuto in NO<sub>x</sub> e CO è in pratica trascurabile, originandosi questi inquinanti direttamente dalla fase di combustione. Composti come particolato e SO<sub>x</sub> sono anch'essi trascurabili; ogni impianto con celle a combustibile prevede infatti la conversione e/o l'eliminazione degli SO<sub>x</sub> prima dell'in-gresso in cella. Gli impianti PureCell 200 della UTC Power e le unità DFC300 e DFC1500 della Fuel Cells Energy incontrano i requisiti stabiliti dalla California



Emissioni impianti PureCell 200 e DFC300 confrontate con limiti CARB07 (g/MWh)

500 €/kW delle turbine a gas naturale ai 1.100 €/kW degli impianti a carbone. Il costo di motori a combustione interna e microturbine per generazione distribuita si attestano a metà di quest'intervallo.

Naturalmente il costo della generazione con celle a combustibile diminuirà in proporzione al grado di diffusione di questi sistemi, per effetto delle economie di scala. Per arrivare ad una condizione di concorrenza con le tecnologie tradizionali, sono necessarie riduzioni di costo con fattori che vanno da 3 a 10 volte. Le ipotesi di penetrazione della tecnologia richiedono che i costi degli impianti raggiungano valori compresi tra 1.000 e 1.500 €/kW (con valori maggiori per le piccole taglie) nella fase iniziale della introduzione nel mercato, passando poi a regime a valori di 400-750 €/kW.

L'inserimento nel mercato di una tecnologia innovativa come quella delle celle a combustibile richiede poi che si creino gradualmente le condizioni perché la stessa possa competere alla pari con le tecnologie convenzionali, superando le barriere di carattere "ambientale" (conoscenza della tecnologia, normative specifiche, clausole di manutenzione, ecc.) che possono penalizzarla nella fase iniziale della commercializzazione.

E' chiaro che ci sarà maggiore spazio per le celle a combustibile se gli utenti troveranno semplice e conveniente l'auto-produzione di energia elettrica e calore con impianti di piccola taglia. Questo comporterebbe semplicità nelle procedure per l'installazione ed avviamento degli impianti, nonché facilitazioni dei rapporti con la rete elettrica (cessione di energia alla rete, ecc.).



L'edificio di Times Square in cui sono installate due unità PureCell della UTC Power

L'introduzione delle celle a combustibile richiede, oltre allo sviluppo di un contesto favorevole alla generazione/cogenerazione distribuita, che gli utenti prendano confidenza con la tecnologia, superando le preoccupazioni connesse con la novità della stessa in termini di sicurezza (ad es. presenza di idrogeno), modalità e costi di gestione, affidabilità, manutenzione, ecc., e si sentano garantiti circa la continuità e qualità del servizio reso dall'impianto.

A tal fine rivestono un'importanza fondamentale le numerose iniziative dimostrative avviate a livello mondiale, che si propongono di fornire agli utenti le informazioni necessarie sugli aspetti di convenienza economica, sicurezza, affidabilità e flessibilità d'uso di questi sistemi e di mettere in evidenza la possibilità di una generazione distribuita sul territorio, in prossimità dei centri di utilizzo dell'energia, con un elevato grado di accettabilità ambientale. Significativo a questo riguardo il fatto che due unità ad acido fosforico da 200 kW della UTC Power siano oggi collocate al Conde Nast Building a Times Square nel centro di New York, sito che dal punto di vista delle procedure autorizzative all'esercizio poteva risultare tra i più ostici, ed un 200 kW della stessa società sia utilizzato per la generazione di emergenza nella stazione di polizia di Central Park a Manhattan. In Europa, unità cogenerative da 250 kW a carbonati fusi della CFC Solutions stanno inoltre funzionando senza problemi in molte città tedesche.

## TRASPORTO

I livelli di inquinamento atmosferico stanno assumendo, soprattutto nelle grandi aree urbane, dimensioni preoccupanti, pertanto un forte impegno scientifico, tecnologico e legislativo viene dedicato a questo problema. Pur se negli ultimi anni la tecnologia dei veicoli è notevolmente migliorata con diminuzione dei consumi ed aumento di prestazioni, comfort e sicurezza, ciò non ha portato ad una riduzione globale nel contributo di emissioni e consumi di energia. Nel periodo 1990-2004 i consumi energetici del settore trasporti sono passati dal 28% a circa il 31% del totale nazionale.

In ambito comunitario sono state prese misure di carattere normativo per ridurre le emissioni e migliorare il risparmio di carburante, stabilendo limiti per le concentrazioni dei vari inquinanti ed imponendo vincoli sempre più restrittivi ai veicoli e ai combustibili utilizzati.

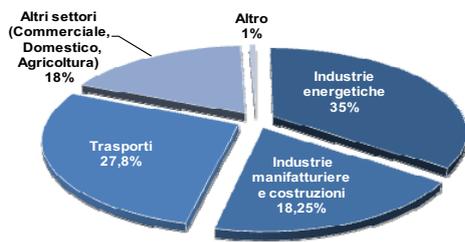
Nell'ultimo decennio grazie un miglioramento del parco autoveicoli, le emissioni di monossido di carbonio e ossidi di azoto sono diminuite rispettivamente del 10% e 28%, rimane tuttavia elevata la concentrazione di materiale particolato (in particolare PM<sub>10</sub>, la frazione di particelle con un diametro di 10 µm o inferiore) derivato principalmente dagli autoveicoli diesel. Con l'introduzione della normativa Euro 5, i limiti di emissione dei gas di scarico saranno ulteriormente inaspriti. Si dovrà registrare una riduzione dell'80% delle emissioni di particolato e del 20% delle emissioni di NO<sub>x</sub> per i veicoli diesel, mentre per i motori a benzina le emissioni di NO<sub>x</sub> e di idrocarburi saranno ridotte del 25%. I valori limite per il monossido di carbonio, invece,

Normativa Europea - Limiti di emissioni in vigore e proposti (Euro 5) per veicoli passeggeri\* (g/km)

Norma	Entrata in vigore	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
<b>Benzina</b>						
Euro 1	10.1994	2,72	-	0,97	-	-
Euro 2	01.1998	2,20	-	0,50	-	-
Euro 3	01.2000	2,34	0,20	-	0,15	-
Euro 4	01.2005	1,00	0,10	-	0,08	-
Euro 5	09.2009	1,00	0,075	-	0,06	-
<b>Diesel</b>						
Euro 1	10.1994	2,72	-	0,97	-	0,14
Euro 2	01.1998	1,00	-	0,90	-	0,10
Euro 3	01.2000	0,64	-	0,56	0,50	0,05
Euro 4	01.2005	0,50	-	0,30	0,25	0,025
Euro 5	09.2009	0,50	-	0,25	0,20	0,005

\* Standard applicabili anche a veicoli commerciali leggeri di massa <1305 kg

resterebbero invariati. Fino a questo momento non sono stati imposti limiti per le emissioni di particolato delle auto a benzina (la maggior parte dei modelli di recente fabbricazione quasi non ne produce), ma i nuovi motori a iniezione diretta lean-burn ("a combustione magra") emettono più particolato dei motori a benzina tradizionali e probabilmente saranno soggetti agli stessi limiti stabiliti per le auto diesel.



Emissioni di CO<sub>2</sub> dal sistema energetico in Italia  
Fonte: ENEA su dati APAT, 2006

Le emissioni di anidride carbonica continuano ad aumentare, in quanto la maggiore efficienza del parco veicolare, conseguente al rinnovo del parco stesso, non è stata sufficiente a bilanciare la sua crescita e l'aumento della cilindrata media delle autovetture e delle percorrenze. Il trasporto su strada è attualmente responsabile di oltre un quinto delle emissioni totali di anidride carbonica prodotta annualmente nell'Unione Europea.

Quest'ultima ha messo a punto una strategia per la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e per migliorare il risparmio di carburante, che si prefigge di raggiungere, entro il 2012, un livello medio di emissioni di CO<sub>2</sub>, per le vetture di nuova immatricolazione, pari a 120 g/km. Uno dei

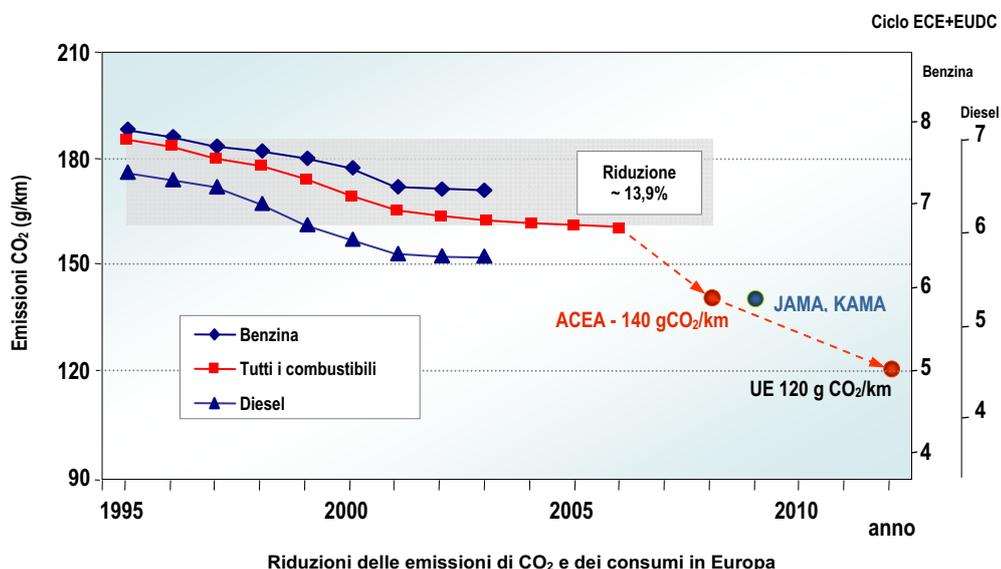
principali elementi della strategia comunitaria è rappresentato dall'accordo con l'industria automobilistica sulla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte dalle autovetture.

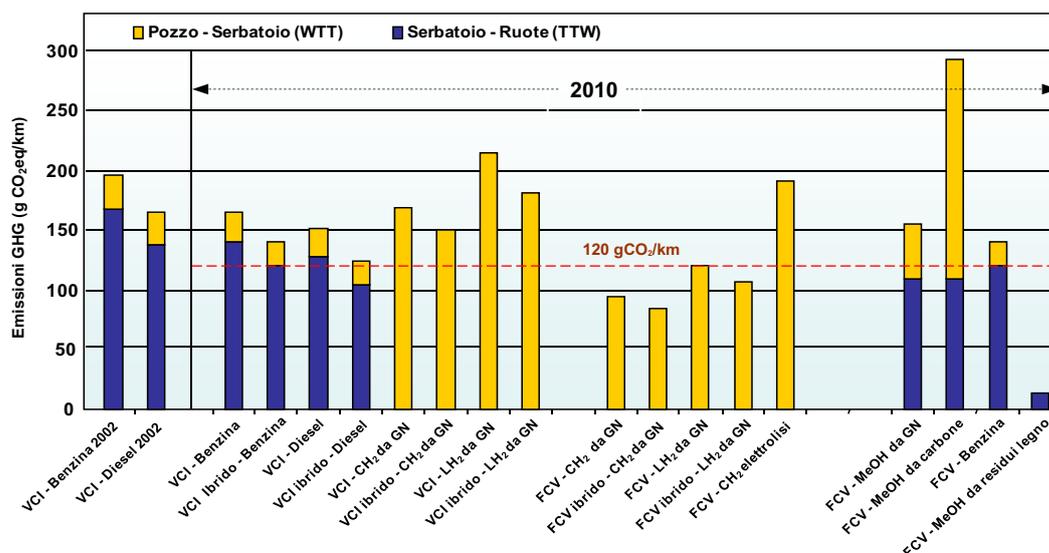
I membri dell'Associazione dei costruttori di autoveicoli europei (ACEA), giapponesi (Japan Automobile Manufacturers Association, JAMA) e coreani (Korea Automobile Manufacturers Association, KAMA) si erano impegnati a ridurre i livelli di emissioni di CO<sub>2</sub> delle auto immesse sul mercato a 140 g /km, limite da raggiungere entro il 2008 per ACEA ed il 2009 per JAMA e KAMA, con l'obiettivo di ottenere 120 g/km nel 2012. In base a tali accordi, il parco dei veicoli leggeri a benzina nuovi immessi sul mercato nel 2008/2009 consumerà in media circa 5,8 litri di benzina per 100 km, quelle a gasolio 5,25 litri per 100 km.

Considerando i dati degli Stati membri dell'UE24 resi noti nel settembre 2007 dalla European Federation for Transport and Environment relativi all'anno 2006, le emissioni specifiche medie delle automobili erano pari a 160 g/km, e cioè il 13,9% in meno rispetto al valore del 1995 (186 g/km) anno preso come riferimento. Nello specifico le emissioni medie di CO<sub>2</sub> sono state di 160 g/km per ACEA, 161 g/km per JAMA e 164 g/km per KAMA. Rispetto al 1995, le emissioni specifiche medie di CO<sub>2</sub> si sono ridotte del 13,9% per ACEA, dell'13,4 % per JAMA e del 11,8% per KAMA. Nonostante i progressi compiuti, negli ultimi anni sarà comunque difficile conseguire l'obiettivo di 120 g/km entro il 2012, confermato dalla Commissione Europea [COM(2007)19 del febbraio 2007]. La Commissione ha proposto perciò di raggiungere 130 g /km per il nuovo parco auto, grazie a miglioramenti tecnologici apportati al motore dei veicoli, e di ottenere un ulteriore abbattimento di 10 g /km, grazie ad altri miglioramenti e ad un maggiore uso dei biocarburanti. Il Parlamento Europeo ha in seguito (ottobre 2007) chiesto di innalzare il livello massimo di CO<sub>2</sub> emessa dai veicoli di nuova fabbricazione a 125 g/km prorogando la sua entrata in vigore al 2015.

Per portare le emissioni di gas serra ai limiti post-Kyoto occorre quindi avviare una serie d'iniziative diversificate, finalizzate non solo a migliorare l'efficienza del parco veicolare esistente, ma a sostenere lo sviluppo di sistemi di trazione innovativi e l'uso di carburanti alternativi. Azioni queste da svolgere in un approccio sistemico di interventi, che abbracciano la gestione e controllo del traffico e la manutenzione degli autoveicoli circolanti, nonché l'adozione di misure fiscali per la promozione dei veicoli a basso consumo.

L'industria automobilista sembra oggi in grado di proporre mezzi dai consumi bassissimi e con un minor impatto ambientale rispetto al passato, ma questa offerta non è ancora in grado di rispondere alla richiesta di "veicoli ad emissioni zero " per un





### Analisi dal "Pozzo alle Ruote" - Emissioni di gas serra

Fonte: Rapporto CONCAWE/EUCAR/JRC. "WTW analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context"

mercato sempre più vincolato ai problemi legati all'inquinamento. A livello internazionale si guarda alla propulsione elettrica come una soluzione ideale. Tra le diverse soluzioni, la più promettente per il medio-lungo termine è quella basata sull'impiego di veicoli a idrogeno che utilizzano la tecnologia delle celle a combustibile.

Le celle a combustibile possono consentire di realizzare veicoli, che uniscono ai vantaggi di silenziosità ed assenza di inquinamento tipici dei veicoli elettrici a batteria, caratteristiche d'uso simili a quelle dei veicoli convenzionali, in termini di autonomia e tempi di rifornimento.

Grazie all'elevata efficienza della cella, i rendimenti previsti per veicoli con celle a combustibile sono superiori a quelli dei motori a combustione interna. Si raggiungono, a seconda del combustibile impiegato, valori compresi tra il 27 ed il 41%, contro rendimenti medi del 16-18% e del 20-24% misurati rispettivamente per i veicoli a benzina e diesel, nel ciclo urbano.

Qualora alimentate ad idrogeno, le celle a combustibile presentano efficienze superiori a quelle degli altri sistemi di

Prestazioni e consumi di veicoli di diversa tipologia - Stime al 2010

Tipologia del veicolo	Consumi combustibile (L/km)	Efficienza motore (%)	Efficienza veicolo (%)	Accelerazione 0-100 km/h (s)	Riduzione consumi (%)
ZAFIRA / Benzina - 2002	8,15	21,0	18,2	11,6	+ 6
ZAFIRA / Benzina 2010 (riferimento)	7,66	22,5	19,4	11,6	0
VCI-ID / Benzina	6,59	25,2	22,6	11,4	- 14
VCI-ID / Diesel	6,16	28,5	25,5	11,8	- 20
VCI / CGN	7,00	25,8	22,8	11,4	- 9
HEV-ID / Benzina	5,19	22,9	30,9	8,8	- 32
HEV-ID / Diesel	5,18	34,8	32,6	9,4	- 32
HEV / CGN	5,42	33,0	31,8	9,1	- 29
VCI / H <sub>2</sub>	6,37	27,7	24,2	11,7	- 17
VCI HEV / H <sub>2</sub>	4,7	37,7	34,9	9,1	- 39
FCV / CH <sub>2</sub>	3,59	56,6	44,3	10,7	- 53
FC HEV / CH <sub>2</sub>	3,31	55,6	48,9	9,5	- 57
FCV / LH <sub>2</sub>	3,51	56,6	44,3	10,4	- 54
FC HEV / LH <sub>2</sub>	3,24	55,6	48,9	9,3	- 58

I consumi sono espressi in litri equivalenti di benzina - Ciclo EDC (European Drive Cycle)  
Fonte: GM European Well-to-Wheel Study, 2002

generazione, per di più costanti con il variare del carico, ed una dinamica rapidissima, paragonabile a quella di un accumulatore tradizionale. Queste efficienze si riducono parzialmente qualora andiamo a considerare l'intera catena energetica, il cosiddetto ciclo "Well-to-Wheels" (dal pozzo alle ruote), che esamina tutti gli stadi dalla produzione del combustibile a partire dalle fonti primarie fino al reale consumo nel veicolo.

Interessanti i risultati di uno studio svolto nel 2002 da General Motors e Opel. L'analisi, riferita all'Europa, era stata effettuata in collaborazione con l'istituto di ricerca Ludwig-Bölkow Systemtechnik (LBST) e con aziende del settore energetico come BP, ExxonMobil, Shell e TotalFinaElf. Nello studio si esaminavano 18 diversi sistemi di propulsione e 44 percorsi per la produzione del combustibile. Come veicolo di riferimento era stata considerata la Opel

Zafira, già allora disponibile nelle varianti a benzina, diesel e metano e, come HydroGen3, anche con celle a combustibile alimentate ad idrogeno.

Per i diversi veicoli era stato tra l'altro stimato, al 2010, il consumo di carburante durante l'uso del veicolo e calcolata la possibile riduzione dei consumi nei diversi casi.

Da notare che efficienze maggiori si traducono, a parità di energia prodotta, in una riduzione della quantità di anidride carbonica emessa, anche con idrogeno prodotto da fonti fossili. Le conclusioni dello studio GM sono sostanzialmente in linea con quanto ottenuto in studi analoghi condotti in Europa, Stati Uniti e Giappone.

Le emissioni di sostanze inquinanti nel punto d'uso di un veicolo con celle a combustibile sono praticamente nulle con idrogeno e si mantengono estremamente basse con altri combustibili riformati a bordo. Come possiamo osservare dai valori riportati in tabella, le emissioni sono in ogni caso molto al di sotto dei limiti imposti dalle normative vigenti in Stati Uniti ed Europa.

Emissioni veicoli passeggeri\* (g/km)

Tipo veicolo	CO	HC	NOx
FCV metanolo (NECAR 3)	0	0,004	0
FCV idrogeno	0	0	0
LEV* (Low Emission Vehicle)	2,60	0,06	0,04
ULEV* (Ultra Low Emission Vehicle)	1,30	0,03	0,04
SULEV* (Super Ultra Low Emission Vehicle)	0,62	0,01	0,01
Standard TIER 2 Bin 5	2,60	0,06	0,04
Veicolo Euro 4 - Benzina	1,00	0,10	0,08

\* Standard veicoli in vigore in California



La Honda FCX a idrogeno è stata la prima auto a ricevere la certificazione dal California Air Resources Board (CARB) come veicolo a zero emissioni, (ZEV - "Zero Emission Vehicle") ed è stata classificata dall'EPA (Agenzia di Protezione Ambientale americana) come Tier 2 Bin1 (ZEV).

I veicoli a celle a combustibile assicurano inoltre un elevato livello di silenziosità, dal momento che la sola sorgente di rumore è quella costituita dall'unità di compressione dell'aria di alimentazione dello stack.

## CONFIGURAZIONE DEI VEICOLI A CELLE A COMBUSTIBILE

In un veicolo a celle a combustibile l'energia prodotta dallo stack fa muovere un motore elettrico, il quale fornisce la propulsione necessaria agli organi di trasmissione del veicolo.

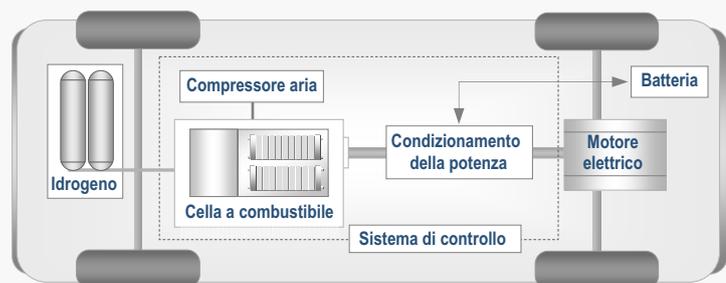
Per generare energia, l'unità costituita dalle celle a combustibile deve essere integrata in un sistema completo che comprende una sezione di alimentazione del combustibile e dell'aria, un sistema di condizionamento della potenza elettrica, un sistema di recupero del calore sviluppato ed infine una sezione di regolazione e controllo.

Per il sistema di generazione da installare a bordo si possono considerare diverse alternative, a seconda delle scelte effettuate riguardo al combustibile utilizzato (idrogeno, metanolo o benzina) ed alla configurazione del sistema di propulsione.

Abbiamo sistemi in cui la potenza elettrica è fornita esclusivamente dalla cella e sistemi ibridi, in cui la trazione è affidata ad un motore azionato dalla cella ed un sistema di accumulo di energia (batteria o supercondensatore) fornisce il complemento di energia necessario in caso di forti accelerazioni e consente il recupero di energia di frenata.

Se la cella copre meno del 25% della potenza si parla di configurazione "range extender", in questo caso la cella funge da sorgente ausiliare di potenza (APU, Auxiliary Power Unit) e viene usata per aumentare l'autonomia del veicolo e per la ricarica delle batterie.

In linea di principio per beneficiare al massimo dei vantaggi energetici ed ambientali delle celle a combustibile rispetto ai motori convenzionali la quota di potenza coperta dalla cella dovrebbe essere in genere la più alta possibile.



Schema di veicolo ibrido a celle a combustibile

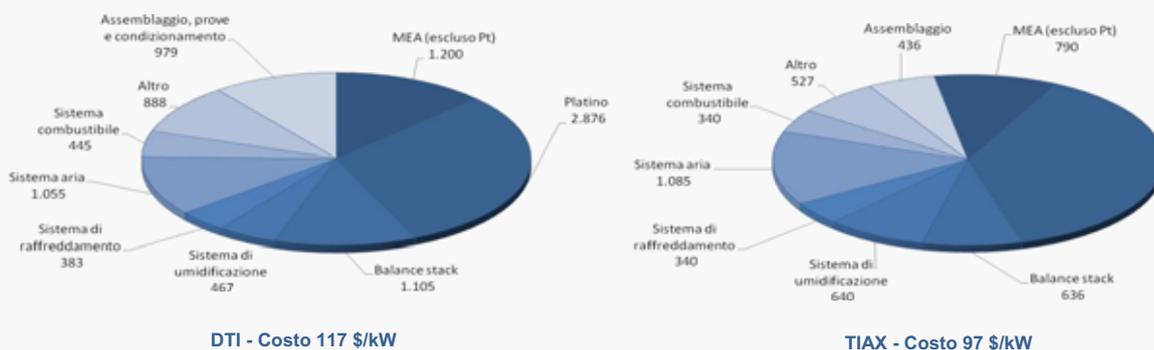
Dopo i primi prototipi realizzati con tecnologie diverse (celle ad acido fosforico ed alcaline), il tipo di cella su cui si sono orientati tutti i costruttori di veicoli è quello ad elettrolita polimerico, che meglio soddisfa i requisiti specifici dell'uso sui veicoli stradali. La tecnologia è infatti caratterizzata da bassa temperatura di funzionamento (~70 °C), elevata potenza specifica e densità di energia, ridotti tempi di avviamento e relativa semplicità costruttiva. Le celle ad ossidi solidi sono invece ritenute interessanti soprattutto come sorgenti di potenza ausiliaria su veicoli pesanti.

La tecnologia PEFC è oggetto di notevole attenzione da parte dell'industria automobilistica che ha impegnato notevoli risorse nella realizzazione di prototipi dimostrativi per diverse tipologie di veicoli. A fronte di questo interesse, e valutati i notevoli progressi registrati negli ultimi anni, per lo sviluppo commerciale della tecnologia è necessario risolvere ancora una serie di problemi. E' importante che gli sforzi di ricerca siano diretti non solo al miglioramento delle prestazioni e ad un'ottimizzazione dei pesi e degli ingombri del sistema nel suo complesso, ma soprattutto ad una riduzione dei costi, ancora troppo elevati per le notevoli diseconomie di scala. La riduzione dei costi viene perseguita intervenendo sia sui materiali costituenti lo stack, sia sui processi di fabbricazione.

Oggi per stack di celle polimeriche, ancora a livello prototipale, si riportano costi intorno ai 2.000-4.000 \$/kW; comunque alla luce delle iniziative di industrializzazione già avviate o di prevista attuazione, molti esperti prevedono che tali costi siano destinati a ridursi in maniera apprezzabile, pur restando sensibilmente superiori a quelli dei motori tradizionali. I maggiori gruppi industriali impegnati nella realizzazione di prototipi dimostrativi, concordano nel prevedere valori intorno a 250-300 \$/kW, quando saranno prodotti ancora un numero limitato di veicoli, e che si potrà scendere a valori competitivi con quelli dei motori a combustione interna (50-100 \$/kW) con l'avvio della produzione di serie.

Analisi di costi eseguite nel 2006 dalla Direct Technologies (DTI) e dalla TIAX nel quadro del Programma DoE, per un sistema con celle ad elettrolita polimerico di potenza 80 kW alimentato a idrogeno, per alti volumi di produzione (500.000 unità/anno), stimano costi rispettivamente di 9.398 \$ e 7.750 \$ pari a 117 \$/kW e 97 \$/kW. A differenza di TIAX, DTI fra i costi include anche quelli relativi alla prova e condizionamento stack. Lo stack rappresenta circa il 46% del costo totale.

Sistema PEFC da 80 kW a idrogeno / Produzione 500.000 unità/anno (Fonte DoE, 2007)



## GENERAZIONE PORTATILE

Le caratteristiche delle celle a combustibile ne fanno una tecnologia particolarmente interessante soprattutto quando le potenze del sistema sono basse, in quanto è proprio in questo settore che le tecnologie convenzionali soffrono i maggiori problemi di efficienza e prestazioni.

Infatti le caratteristiche di modularità e di alto rendimento ai carichi parziali, proprie delle celle a combustibile, sono maggiormente sfruttate per basse potenze, e quindi le applicazioni "portatili" (da pochi Watt a qualche kW) sono quelle dove tale vantaggio è maggiormente avvertibile.

Per quanto riguarda i generatori portatili le caratteristiche di silenziosità e di basse (o nulle) emissioni ne fanno la tecnologia ideale per tutte quelle applicazioni dove il "comfort" di utilizzo è uno dei requisiti richiesti dall'utente finale.

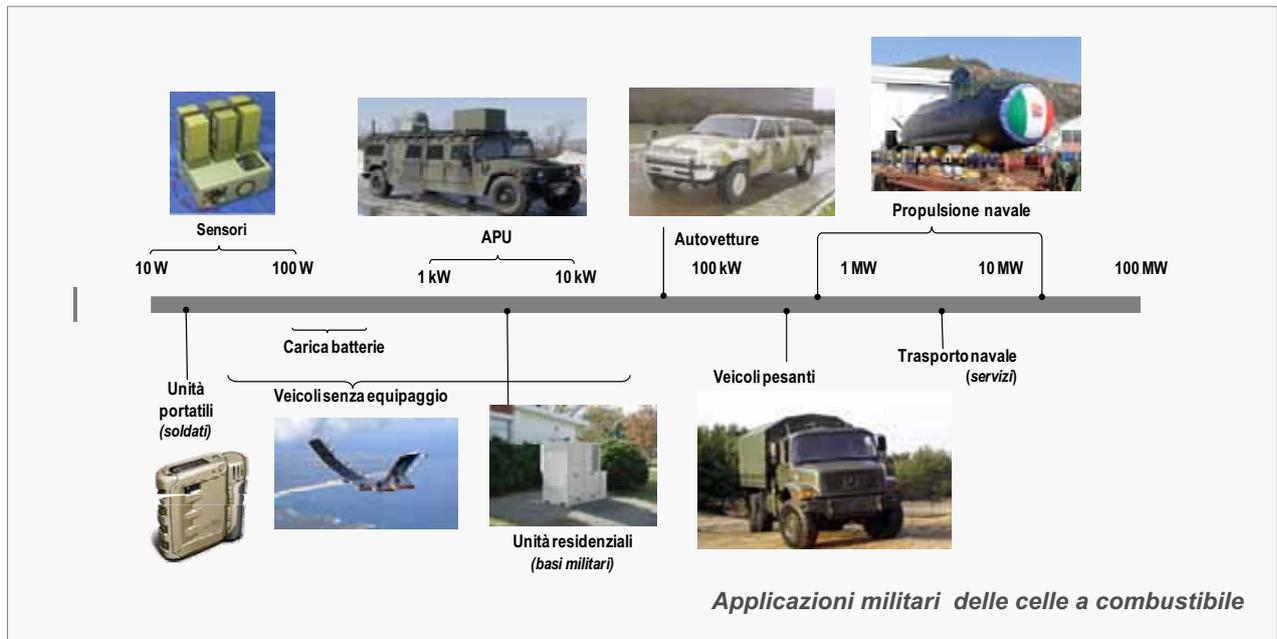
Le cosiddette "applicazioni portatili" sono riconducibili alle seguenti aree:

- generatori portatili e APU (Auxiliary Power Units) per applicazioni civili e ricreative (camper, barche, ecc...);
- applicazioni per elettronica di consumo in sostituzione delle batterie o usi come caricabatterie;
- generatori per usi militari.



## POSSIBILE UTILIZZO DELLE CELLE A COMBUSTIBILE IN CAMPO MILITARE

Oggi la richiesta di energia per alimentare i numerosi dispositivi (sistemi di comunicazione, apparecchiature informatiche, sensori per il rilevamento di agenti chimici, sistemi di sorveglianza, ecc.) adottati dalle varie organizzazioni militari nelle missioni che sono chiamate a svolgere (umanitarie, belliche, di controllo del territorio) è alta e continua a crescere. Si guarda quindi con interesse alle celle a combustibile come ad una tecnologia potenzialmente in grado di soddisfare le esigenze di questo settore. Le celle a combustibile, come abbiamo visto, presentano caratteristiche che le rendono adatte per un'ampia varietà di applicazioni.



Le celle candidate ad impieghi in campo militare e sulle quali si concentra la maggior attenzione sono quelle ad elettrolita polimerico alimentate ad idrogeno, le celle ad ossidi solidi e quelle a metanolo diretto. Queste tecnologie sono adatte alla generazione di energia portatile di bassa potenza (fino a 250 watt), dove dimostrano prestazione superiori a quelle delle batterie attualmente in uso, soprattutto nel caso di missioni di 72 ore di durata.

I veicoli elettrici sono un'altra area d'interesse, celle polimeriche, ad ossidi solidi o a carbonati fusi possono fornire la propulsione a mezzi militari terrestri, marittimi o aerei, o semplicemente alimentarne i servizi ausiliari. I mezzi militari dispongono oggi di sofisticate apparecchiature elettroniche e di telecomunicazione la cui alimentazione non può essere, al momento, sostenuta dalle sole batterie, ed in operazioni cosiddette "silent watch" è precluso l'impiego di generatori tradizionali perché rivelabili in quanto possibili sorgenti di rumore, vibrazioni, calore e materiale particolato.

Sono state infine valutate le potenzialità di impianti con celle a combustibile nella generazione di potenza distribuita. Negli Stati Uniti, presso basi militari sono stati installati in passato impianti di cogenerazione PAFC ed attualmente sono operativi sistemi PEFC per usi sia residenziali che industriali.

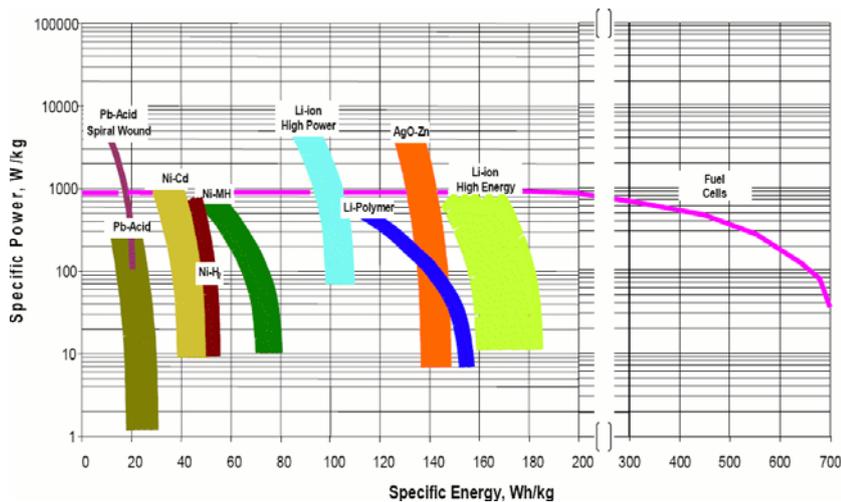
L'introduzione delle celle a combustibile in applicazioni militari richiede tuttavia che si superino una serie di problemi tecnici per ottimizzarne le prestazioni, ed occorre soprattutto mettere a punto efficienti sistemi di accumulo o di generazione di idrogeno.

Sistemi ibridi costituiti da una cella a combustibile ed una batteria ricaricabile si prestano molto bene come generatori portatili per operazioni "stealth" per potenze tra 20 W e 2 kW. In questo intervallo di potenza le celle offrono funzionalità e potenzialità che nessuna delle tecnologie concorrenti è forse in grado di offrire. Le batterie sono una buona soluzione quando la quantità di energia richiesta è bassa (potenze inferiori a 20 W e per missioni di durata inferiore alle 24 ore), mentre, quando tale richiesta diventa più elevata (potenza superiore a 2 kW) vengono oggi adottati sistemi alimentati con motori diesel. Questi ultimi, tuttavia, non risultano adatti nel caso di operazioni di sorveglianza o ricognizione silenziosa

**Densità di energia di sistemi a batteria e di unità PEFC (Protonex/Millennium Cell) per usi militari**  
Fonte: Protonex, Aprile 2006

TECNOLOGIA	Wh/kg
Batterie primarie al litio (BA 5590)	150
Batterie al litio ricaricabili	130
Batterie Zn-Aria (BA8180)	260
Sistema Protonex Gen I (2004- Idruri chimici)	380
Sistema Protonex Gen II (2005-2006- Idruri chimici)	425-500
Sistema Protonex Gen III (in sviluppo - Idruri chimici)	500-1000

*Sistemi da 30 W, 72 ore di missione*



ed inoltre nel campo di potenza considerato presentano efficienze inferiori a quelle ottenibili con una cella a combustibile. L'intervallo 20 W-2 kW risulta pertanto un'area dove le potenze richieste sono troppo elevate per le batterie e troppo basse per generatori tradizionali che usano combustibili logistici.

Il diagramma di Ragone riportato in figura ed i dati della precedente tabella indicano i chiari vantaggi dei sistemi a celle a combustibile su quelli a batteria in termini di densità di energia, cioè di quantità di energia per unità di peso (Wh/kg).

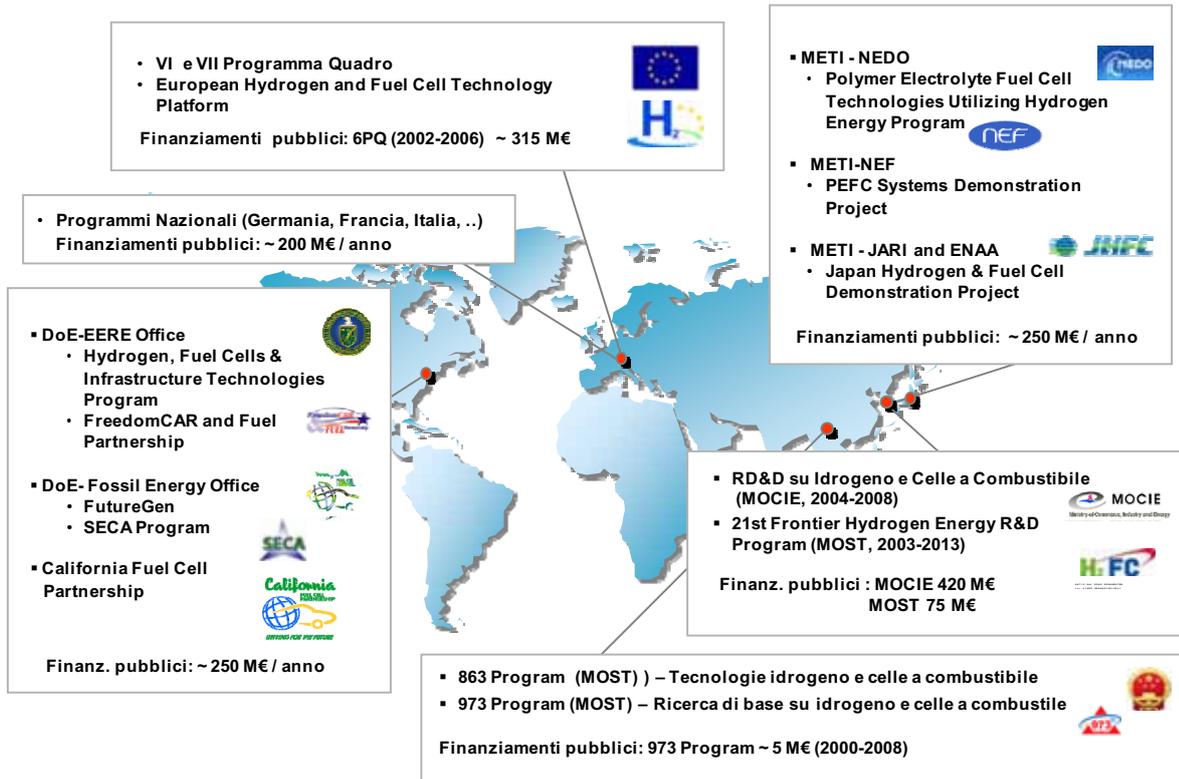
### CARATTERISTICHE DEI DIVERSI TIPI DI CELLE

Caratteristica	AFC	PEFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Elettrolita</b>	Idrossido di potassio	Membrana polimerica	Membrana polimerica	Acido fosforico	Carbonato di litio e potassio	Ossido di zirconio drogato
<b>Ione che promuove la reazione di cella</b>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	O <sup>=</sup>
<b>Temperatura, °C</b>	60-120	70-100	70-100	160-220	600-650	800-1000
<b>Catalizzatore</b>	Pt/Pd, Ni	Platino Platino/Rutenio	Platino Platino/Rutenio	Platino	Nichel	Non richiesto
<b>Materiali costruttivi</b>	Plastica, grafite, Inconel	Materiali grafitici, metalli	Grafite	Materiali grafitici	Nichel, acciaio inossidabile	Materiali ceramici, metalli
<b>Combustibile impianti</b>	Idrogeno puro (99,99%)	Idrogeno Gas riformati (MeOH, GN)	Metanolo	Idrogeno Gas riformati (GN, MeOH, idrocarburi leggeri)	Idrogeno Gas riformati	Idrogeno Gas riformati Gas da carbone
<b>Ossidante</b>	Ossigeno (puro)	O <sub>2</sub> / Aria	O <sub>2</sub> / Aria	O <sub>2</sub> / Aria	O <sub>2</sub> / Aria	O <sub>2</sub> / Aria
<b>Efficienza elettrica (PCI), %</b>	60	40-60	35-40	40-50	45-55	45-60
<b>Densità di potenza, mW/cm<sup>2</sup></b>	300-500	300-900	200-400	150-300	150	150-270
<b>Stato della tecnologia</b>	Sistemi 5-80 kW	Sistemi 1-250 kW	Sistemi fino 2 kW	Impianti dimostrativi fino a 11 MW	Impianti dimostrativi fino a 2 MW	Stack 25 kW Impianti 200 kW
<b>Tempo di avviamento</b>	Minuti	Minuti	Minuti	1-4 h	5-10 h	5-10 h
<b>Applicazioni</b>	Applic. spaziali, gener. portatili, trasporto	Usi residenziali, trasporto, gener. portatile	Generatori portatili 1 W - 1 kW	Cogenerazione, potenza distribuita	Cogenerazione industriale, potenza distribuita	Cogenerazione industriale, potenza distribuita

## I PROGRAMMI DI RICERCA, SVILUPPO E DIMOSTRAZIONE

I governi dei maggiori Paesi industrializzati stanno dedicando ingenti e crescenti risorse allo sviluppo della tecnologia. Si stima che negli Stati Uniti i finanziamenti pubblici in questo settore siano dell'ordine di 100 milioni di dollari l'anno e quelli privati almeno doppi; risorse analoghe vengono investite in Giappone. Per l'Europa si prevede una crescita notevole per i prossimi anni nell'ambito della European Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform e del VII Programma Quadro.

Bisogna notare che a livello internazionale le attività di ricerca e sviluppo sulle celle a combustibile sono fortemente integrate con quelle relative all'idrogeno.

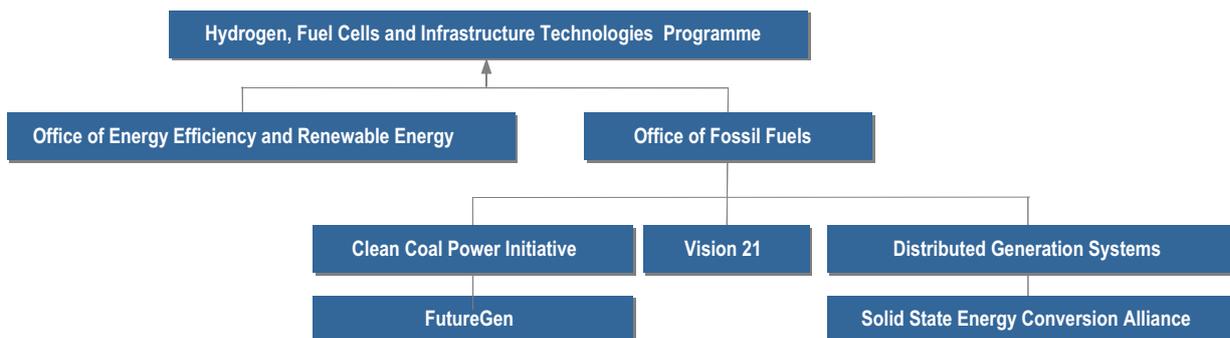


## STATI UNITI

Il Department of Energy finanzia da diversi anni lo sviluppo delle celle a combustibile, ed attualmente agisce attraverso due organizzazioni: l'Office of Fossil Energy (FE) e l'Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE).

L'Office of Fossil Energy promuove lo sviluppo di sistemi con celle ad alta temperatura alimentati con gas naturale o syngas (derivato da diversi combustibili, incluso il carbone), per applicazioni stazionarie e generazione di potenza distribuita.

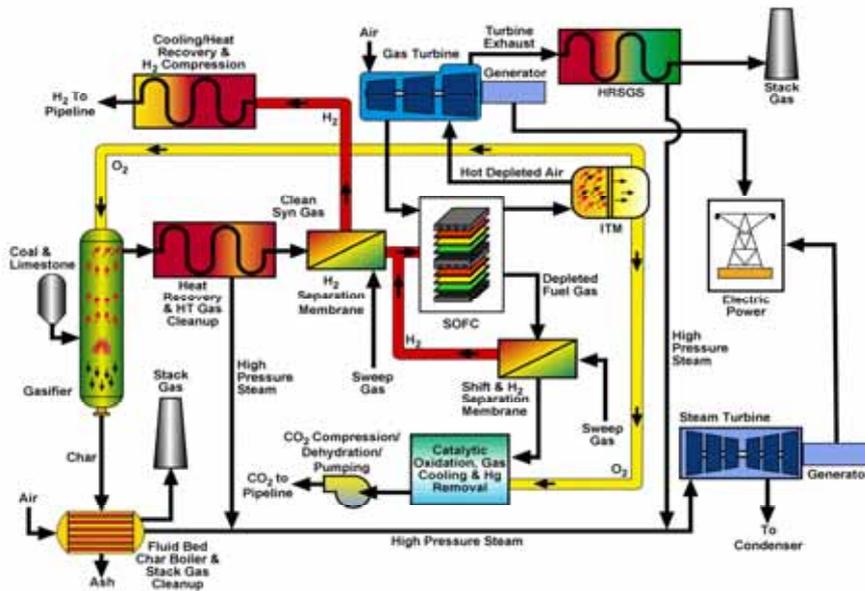
Tra le attività finanziate dall'Office of Fossil Fuel quelle del *Programma della Solid State Energy Conversion Alliance (SECA)*, una partnership tra National Energy Technology Laboratory ed industrie, creata nel 1999 per promuovere lo sviluppo di celle ad ossidi solidi per generazione distribuita, usi militari e per impieghi come unità di potenza ausiliaria nel settore del trasporto.



Al programma partecipano sei costruttori di celle, i quali in modo indipendente e quindi in competizione tra loro, stanno sviluppando SOFC a diversa configurazione. Le singole industrie collaborano con università, laboratori nazionali e strutture di ricerca, che operano all'interno del Core Technology Program.

Obiettivo del SECA è quello di sviluppare entro il 2010 celle ad ossidi solidi di potenza 3 - 10 kW ad un costo di 400 \$/kW (per produzioni di oltre 50.000 unità) ed efficienze dal 40 al 60% e dal 2015 sistemi ibridi SOFC/turbina con efficienze del 70-80 %.

I sistemi ibridi realizzati all'interno di questo programma costituiranno uno dei componenti base dell'impianto realizzato nel Progetto FutureGen, che è finalizzato alla realizzazione ed esercizio di un impianto per la produzione combinata di energia elettrica e idrogeno da carbone, ad "emissioni zero". L'impianto dovrebbe entrare in funzione a fine 2012 a Mattoon nell'Illinois.



Schema dell'impianto FutureGen

Le attività di sviluppo delle celle ad elettrolita polimerico, sia per applicazioni stazionarie (generazione distribuita e portatile) che per trasporto, sono attualmente finanziate all'interno dei programmi dell'Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.

In risposta alle raccomandazioni del Piano Energetico Nazionale e alla crescita d'interesse per l'idrogeno, l'EERE ha avviato nel 2004 l'Hydrogen Fuel Cells and Infrastructure Technologies Programme (HFCIT), in cui le attività sulle celle a combustibile e sull'idrogeno risultano fortemente integrate. Il programma vede la partecipazione delle maggiori industrie, organizzazioni di ricerca ed università statunitensi.

Le attività sono indirizzate principalmente allo sviluppo di celle polimeriche per applicazioni nel trasporto, obiettivo prioritario è quello di sviluppare dal 2010 sistemi PEFC alimentati a idrogeno, con efficienza del 60% e costi di 45 \$/kW e di ridurre tali costi a 30 \$/kW dal 2015.

Per quanto riguarda invece le celle per applicazioni stazionarie, sistemi APU e per elettronica di consumo sono stati fissati i seguenti obiettivi:

- dal 2011, sviluppo di sistemi PEFC per generazione distribuita a gas naturale o GPL, in grado di assicurare un'efficienza elettrica del 40%, 40.000 ore di durata e costi di 750 \$/kW;
- dal 2010, sviluppo di sistemi a celle a combustibile per elettronica di consumo (DMFC, potenza < 50 W) con densità di energia di 1.000 Wh/L;
- dal 2010, sviluppo di sistemi per unità di potenza ausiliaria (SOFC, 3-30 kW) con potenza specifica di 100 W/kg e densità di potenza di 100 W/L.

Il Programma HFCIT ha stretti collegamenti con la FreedomCAR and Fuel Partnership, che sarà descritta in seguito.

Acumentrics  
Cummins Power Generation  
Delphi / Bettelle  
Fuel Cells Energy  
General Electric Power Systems  
Siemens Power Generation.

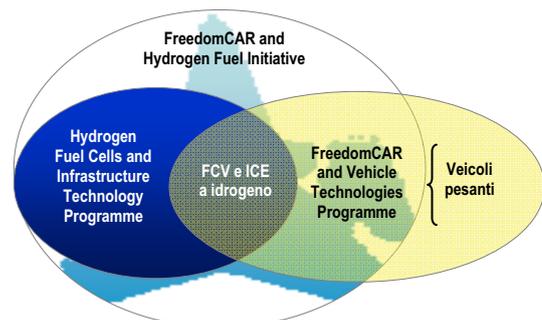


**CORE TECHNOLOGY PROGRAM**

Arcomac Surface Engineering  
Argonne National Laboratory  
Ceramtec  
ChevronTexaco Technology Venture  
Delevan  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Los Alamos National Laboratory  
National Energy Technology Laboratory  
Oak Ridge National Laboratory  
Pacific Northwest National Laboratory  
Sandia National Laboratories  
Gas Technology Institute  
GE Hybrid Power Generation Systems  
Georgia Tech Research  
Montana State University  
NexTech Materials, Ltd  
Northwestern University  
TiAx  
Southwest Research Institute  
Texas A&M University  
University of Connecticut  
University of Florida  
University of Illinois  
University of Missouri - Rolla  
University of Pittsburgh  
University of Utah  
University of Washington  
Virginia Tech

R&S nelle seguenti aree:

- Materiali
- Processi di fabbricazione
- Sistemi di trattamento del combustibile
- Elettronica di potenza
- Controlli e diagnostica
- Modellistica e simulazione



Nel 2007 il programma ha ricevuto finanziamenti per oltre 193 milioni di dollari e le richieste per il 2008 sono state di 213 milioni di dollari.

Nel febbraio 2003, il presidente degli Stati Uniti Bush aveva varato la "Hydrogen Fuel Initiative" e deciso di destinare 1,2 miliardi di dollari a iniziative scientifiche e progetti di ricerca finalizzati a creare un'economia dell'idrogeno, il programma HFCIT rappresenta una parte di quest'iniziativa.

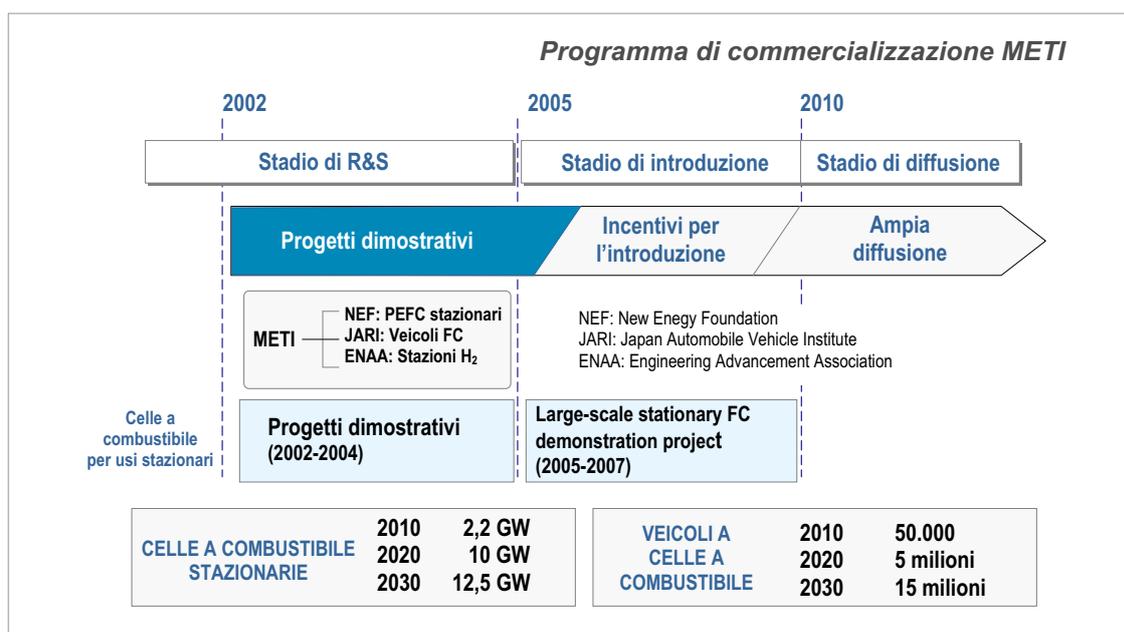
Le attività di ricerca e sviluppo condotte con finanziamenti del Dipartimento della Difesa (DoD), saranno illustrate nelle sezioni dedicate alle applicazioni militari.

*Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program – DoE EERE  
Finanziamenti 2006 e richieste per il 2007 e 2008*

Attività	Finanziamento (M\$)		
	2006	2007	Richiesta 2008
Produzione e distribuzione idrogeno	8,391	34,594	40,000
Accumulo idrogeno	26,040	34,620	43,900
Componenti di stack (PEFC- stazionario e trasporto)	30,710	38,082	44,000
Validazione della tecnologia	33,301	39,566	30,000
Sistemi a celle a combustibile per trasporto	1,050	7,518	8,000
Sistemi a celle a combustibile per energia distribuita	0,939	7,419	7,700
Sistemi di trattamento del combustibile	0,637	4,056	3,000
Sicurezza, codici e standard	81,000	13,848	16,000
Informazione e formazione	0,495	1,978	3,900
System analysis	4,787	9,892	11,500
R&S processi di fabbricazione	0	1,978	5,000
Azioni verso il Congresso USA	42,520	0	0
<b>TOTALE</b>	<b>153,451</b>	<b>193,551</b>	<b>213,000</b>

## GIAPPONE

Il Giappone ha avviato nel 1981 programmi nazionali sulle celle a combustibile, come parte di un progetto sul risparmio energetico, il Moonlight Project, coordinato e sponsorizzato dal METI (Ministry of Economy, Trade and Industry). Nel 1993 il Moonlight Project ed altri progetti nazionali sono stati integrati nel New Sunshine Programme, all'interno di questo programma, che sviluppa tecnologie per il risparmio energetico, nuove fonti di energia e conservazione dell'ambiente, sono oggi inseriti i progetti di sviluppo delle celle ad alta temperatura. Per le celle ad elettrolita polimerico nel 2002 è stato invece avviato un programma di durata decennale focalizzato allo sviluppo di sistemi sia per usi stazionari che per trazione.



La strategia di commercializzazione del METI, molto ambiziosa, prevede tre fasi di sviluppo:

- fase di introduzione delle celle nel sistema energetico (entro il 2010), legata soprattutto al settore pubblico; 50.000 veicoli e impianti stazionari per una capacità installata di 2,2 GW;
- fase di diffusione (2010-2020), legata anche al settore privato con un mercato ormai autosostenuto; 5 milioni di veicoli e 10 GW stazionari;
- fase di penetrazione (2020-2030), completamento di una rete di rifornimento dell'idrogeno e sviluppo di cicli combinati con celle a combustibile; 15 milioni di veicoli e 12,5 GW stazionari.

Il NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organisation), istituito nel 1980 per interventi nel campo delle energie alternative e dell'ambiente ed oggi incaricato della gestione organizzativa dei finanziamenti e del coordinamento di molti progetti di ricerca e sviluppo del METI, ha presentato una roadmap per le celle a combustibile che stabilisce precisi obiettivi per le varie fasi di sviluppo della tecnologia.

## Roadmap NEDO per le celle a combustibile – Aprile 2006

### CELLE A COMBUSTIBILE A ELETTROLITA POLIMERICO

	Efficienza	Durata	Costi	Temperatura oper.
<b>APPLICAZIONI STAZIONARIE</b>				
<b>Oggi</b>	32% (35%) *	10.000 h		70°C
<b>2007</b> (Introduzione)	32% (35%)	20.000 h	1.200.000 Yen/kW (8.000 €/kW) (10.000 unità/anno)	70°C
<b>2010</b> (Sistema ottimizzato)	32% (35%)	40.000 h	700.000 Yen /kW (4.670 €/kW) (100.000 unità/anno)	70°C
<b>2015</b> (Sistema precommerciale)	34% (37%)	40.000 - 90.000 h	500.000Yen/kW (3.350 €/kW) (500.000 unità/anno)	70°C-90°C
<b>2020~2030</b> (Commercializzazione)	36% (40%)	90.000 h	400.000Yen/kW (2.670 €/kW) (500.000 unità/anno)	90°C
<b>VEICOLI A CELLE A COMBUSTIBILE</b>				
<b>Oggi</b>	50%	1.000 h		80°C
<b>2007</b> (Introduzione)	50%	2.000 h		-20 / 80 °C
<b>2010</b> (Sistema ottimizzato)	50%	3.000 h	50.000 Yen/kW (334 €/kW) (100.000 veicoli/anno)	-30 / 90 °C
<b>2015</b> (Sistema precommerciale)	60%	5.000 h	10.000Yen/Kw (67 €/kW) (100.000 veicoli/anno)	-30 / 90 °C
<b>2020~2030</b> (Commercializzazione)	60%	5.000 h	4.000 Yen/kW (27 €/kW) (1 milione veicoli/anno)	-40 / 100-120 °C

\* Efficienza: HHV (LHV)

### CELLE A COMBUSTIBILE A OSSIDI SOLIDI

	Sistemi 1-3 kW (cogenerazione)	Sistemi da 1-3 kW a 100-300 kW (cogenerazione)	Sistemi > 100-300 kW (gener. distribuita, usi industriali)
<b>Oggi</b>	Dimostrazione E: < 40 % D: 10.000 h C:10 MYen/kW (67.000 €/kW)	Attività sperimentale E: < 40 % D: 10.000 h C:10 MYen/kW (67.000 €/kW)	Attività sperimentale E: < 50 % D: 10.000 h C:10 MYen/kW (67.000 €/kW)
<b>2007</b>		Dimostrazione E: 40 % D: 10.000-20.000 h C: 1-3 MYen/kW (6.700-20.100 €/kW)	Dimostrazione E: 55 % D: 10.000-20.000 h C:1 MYen/kW (6.700 €/kW)
<b>2010</b>	Prima introduzione E: < 40 % D: 90.000 h C:1 MYen/kW (6.700 €/kW)	Prima introduzione E: 42% D: 40.000 h C:1 MYen/kW ((6.700 €/kW)	Prima introduzione E: 60% D: 40.000 h C: 100.000- 300.000 Yen/kW (670-2.010 €/kW)
<b>2015</b>	Ampia diffusione E: > 40 % D: 90.000 h C: > 250.000 Yen/kW (1.675 €/kW)	Ampia diffusione E: > 45% D: 90.000 h C: < 200. 000 Yen/kW (1.340 €/kW)	Ampia diffusione E: 60% D: 90.000 h C: < 100.000 Yen/kW (670 €/kW)
<b>2020-2030</b>	300.000-400.000 Yen/kW (2.010-2670 €/kW (usi residenziali)		

### CELLE A COMBUSTIBILE A METANOLO DIRETTO

	Densità di energia	Densità di potenza	Durata
<b>Oggi</b>	150 Wh/L	50 mW/cm <sup>2</sup>	100 – 300 h
<b>2007</b>	300 Wh/L	50 -100 mW/cm <sup>2</sup>	> 1.500 h
<b>2010</b>	> 500 Wh/L	100 mW/cm <sup>2</sup>	> 5.000 h
<b>2015</b>	> 1.000 Wh/L	200 mW/cm <sup>2</sup>	10.000 h
<b>2020~2030</b>	> 1.000 Wh/L	> 200 mW/cm <sup>2</sup>	> 10.000 h

La roadmap NEDO copre le seguenti aree:

- Celle a combustibile ad elettrolita polimerico per generazione stazionaria e trasporto
- Celle a metanolo diretto per dispositivi elettronici (telefoni cellulari, computer portatili)
- Celle ad ossidi solidi per generazione di potenza stazionaria
- Idrogeno per veicoli a celle a combustibile (tecnologie di produzione, accumulo e distribuzione).

Altre importanti iniziative in corso con finanziamenti da parte del METI sono il *Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project*, finalizzato alla dimostrazione di veicoli a celle a combustibile e di stazioni di rifornimento idrogeno ed il *Large-scale Stationary Fuel Cell Demonstration Project*, all'interno del quale sono previste anche attività riguardanti la definizione di normative e standard per sistemi residenziali basati su PEFC. Entrambi i progetti sono illustrati nella sezione relativa alle celle ad elettrolita polimerico.

## SUD COREA

Il governo coreano ha adottato un Piano Energetico Nazionale (2002-2011) che prevede misure atte a ridurre la dipendenza energetica dalle fonti fossili (in particolare carbone e petrolio) di totale importazione estera. Al fine di utilizzare risorse energetiche proprie in Corea si continua ad accrescere la potenza nucleare installata e ad incoraggiare sia il risparmio energetico che lo sviluppo di energie alternative e rinnovabili (5% dal 2011). In questo quadro, idrogeno e le celle combustibile sono state selezionate come uno dei dieci motori di crescita economica per il futuro del paese.

Il Governo finanzia le diverse attività attraverso il Ministero dell'Industria, Commercio ed Energia (MOCIE) e il Ministero della Ricerca (MOST). Il MOCIE è impegnato principalmente nello sviluppo di tecnologie applicabili o commercializzabili nel breve e medio termine, mentre le attività del MOST sono più orientate verso lo sviluppo di tecnologie di base per il lungo termine.

Nel 2004 è stata costituita un'organizzazione nazionale, la H<sub>2</sub>FC, con il compito di pianificare e gestire i programmi di ricerca e sviluppo promossi dal MOCIE. I finanziamenti del MOCIE per il periodo 2004-2008 ammontano ad oltre 400 milioni di Euro.

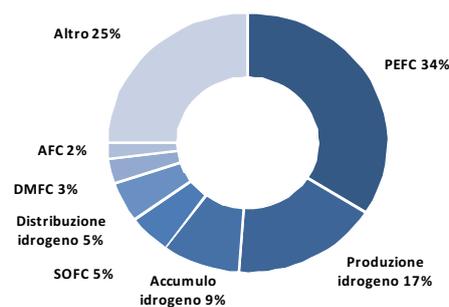
Nel 21st Century Frontier Hydrogen R&D Program del MOST istituito per sviluppare tecnologie di produzione ed accumulo idrogeno, sono incluse attività di ricerca di base per celle ad elettrolita polimerico, ad ossidi solidi e a metanolo diretto. Il budget stanziato per il periodo 2003-2013 è di 75 milioni di euro.

### OBIETTIVI H<sub>2</sub>FC al 2012

Attività	Tipologia di cella	Potenza	Fase I (2003-05)	Fase II (2006-08)	Fase II (2009-12)
			R&D	Dimostrazione	Commercializzazione
Gen. di potenza industriale	MCFC	250 - 1.000 kW	300 unità		
Trasporto	PEFC	200 kW		Autobus: 10	Autobus: 200
		80 kW	Autovetture: 10	Autovetture: 150	Autovetture: 3.200
Gen. di potenza commerciale	PEFC / SOFC	10 – 50 kW	2.000 unità		
Generaz. residenziale	PEFC / SOFC	< 3 kW	10.000 unità		
Portatili	DMFC / PEMFC	2W, 50W, 100W	R&S	Commercializzazione	
Stazioni rifornimento H <sub>2</sub>			1	10	50

## CANADA

Il Canada è tra le nazioni più attive nello sviluppo e commercializzazione di prodotti e sistemi che impiegano celle a combustibile, con oltre 80 organizzazioni e industrie che operano nel settore. Il governo canadese ha avuto un ruolo fondamentale nello sviluppo delle celle a combustibile, nel periodo 1982-2002 ha infatti promosso le attività di ricerca e sviluppo presso l'industria fornendo oltre 123 milioni di euro, erogati sotto forma di incentivi, prestiti o borse di studio. Successivamente, a supporto del settore privato, ci sono stati nuovi stanziamenti per 142 milioni di euro per promuovere iniziative utili ad accelerare lo sviluppo e la commercializzazione di tecnologie legate all'uso dell'idrogeno e delle celle a combustibile. Per quanto riguarda queste ultime le attività sono concentrate principalmente sullo sviluppo di celle ad elettrolita polimerico.



R&S in Canada su idrogeno e celle a combustibile (2006)  
Fonte: Canada, Fuel Cells Canada e PricewaterhouseCoopers, 2007

Nel 2005 in attività di R,S&D sui temi dell'idrogeno e delle celle a combustibile in Canada il settore privato ha investito oltre 150 M€.

Il governo canadese attualmente collabora con l'industria all'interno di tre vasti programmi, che includono attività dimostrative riguardanti celle a combustibile per usi stazionari e trasporto:

- il *Vancouver Fuel Cell Vehicle Demonstration Program*, che vede impegnati, oltre al governo canadese, Ford Motor Company, Hydrogen and Fuel Cells Canada e Governo della British Columbia e che prevede la dimostrazione (aprile 2005-marzo 2008) di una piccola flotta di veicoli a celle a combustibile (5 Ford Focus alimentate a idrogeno) nella città di Vancouver;
- la *Hydrogen Village Partnership* che si prefigge di creare "comunità sostenibili" attraverso l'uso di idrogeno e celle a combustibile entro una definita area geografica. Alla partnership partecipano 35 organizzazioni, tra cui l'Università di Toronto, Ontario Power Generation, Air Liquide Canada e Enbridge Gas Distribution;
- Il *BC Hydrogen Highway Project*, che si propone di progettare, realizzare ed esercire una rete di distribuzione idrogeno lungo un corridoio che collega le città di Vittoria, Vancouver e Whisler, in tempo per le Olimpiadi invernali che si terranno in questa area nel 2010. E' prevista la dimostrazione di sistemi per applicazioni stazionarie, per microgenerazione e per trasporto in grado di utilizzare l'idrogeno fornito da questa rete.

Le tre iniziative rientrano nel programma della Canadian Transportation Fuel Cell Alliance (CTFCA), coordinato dal Natural Resources Canada e finanziato dal governo con 21 milioni di euro. All'interno di questo programma si stanno valutando diverse opzioni per il rifornimento di veicoli con celle a combustibile e definendo procedure di prova per gli stessi, codici e standard.



## EUROPA

Uno degli obiettivi strategici della Commissione Europea è quello di sviluppare in Europa sistemi e servizi energetici sostenibili e contribuire al rafforzamento dello sviluppo sostenibile su scala mondiale, allo scopo di aumentare la sicurezza e la diversificazione dell'approvvigionamento energetico, ridurre l'inquinamento globale e locale e migliorare la competitività dell'industria europea in campo internazionale. Nelle sue strategie d'intervento la Commissione assegna notevole priorità a vettori e tecnologie pulite come idrogeno e celle a combustibile.

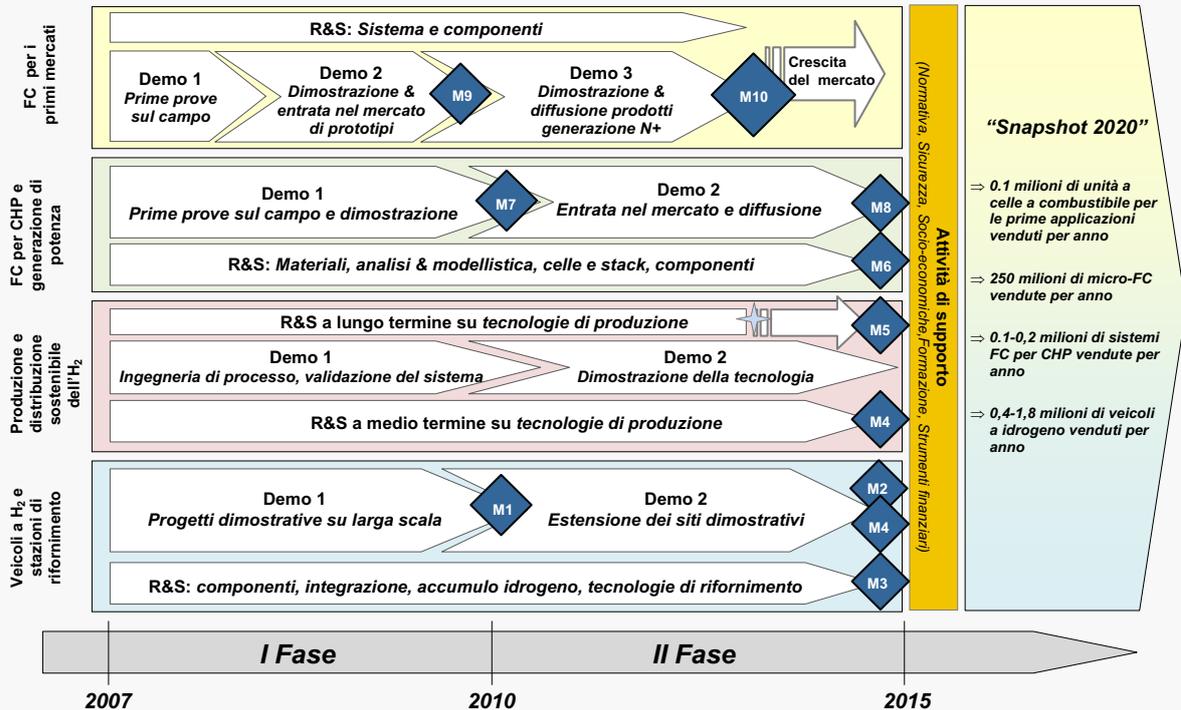
Nel giugno 2003, un gruppo di esperti composto da rappresentanti di grandi industrie europee del settore automobilistico ed energetico, del mondo della ricerca e dei governi nazionali - il cosiddetto "gruppo ad alto livello" - aveva presentato un rapporto "L'idrogeno e le celle a combustibile: una visione per il nostro futuro" in cui venivano delineate le azioni necessarie per passare dall'odierna economia basata su combustibili fossili ad una economia basata sull'idrogeno, con le celle a combustibile come principale tecnologia di produzione di energia.

Nel 2004 la Commissione Europea ha lanciato la *Piattaforma Tecnologica Europea sull'Idrogeno e le Celle a Combustibile*, con l'obiettivo di promuovere ed accelerare lo sviluppo e la diffusione di tecnologie europee competitive per l'impiego dell'idrogeno e delle celle a combustibile in applicazioni stazionarie, portatili e nel trasporto. I lavori svolti all'interno della Piattaforma avevano portato a definire una strategia di intervento nel settore, delineando le principali azioni da intraprendere sia nel campo della ricerca e sviluppo ("Strategic Research Agenda") che in quello della dimostrazione ed introduzione nel mercato ("Deployment Strategy").

Scenario al 2020 per idrogeno e celle a combustibile ("Snapshot 2020" della Deployment Strategy)

	FC portatili per dispositivi elettronici	Generatori portatili / Primi mercati	FC stazionarie (unità CHP)	Trasporto su strada
Proiezioni al 2020 - unità H <sub>2</sub> /FC vendute per anno	~ 250 milioni	~ 100.000 (~ 1 GWe)	100.000 - 200.000 (2-4 GWe)	0,4 - 1,8 milioni
Proiezioni di vendita totali fino al 2020	n.a.	~ 600.000 (~ 6 GWe)	400.000 - 800.000 (8-16 GWe)	1 - 5 milioni
Stato del mercato EU al 2020	Stabilito	Stabilito	In crescita	Introduzione nel mercato
Potenza media di sistemi con celle a combustibile	15 W	10 kW	< 100 kW (Micro CHP) > 100 kW (CHP industriali)	80 kW
Costi di sistemi con celle a combustibile	1-2 €/ W	500 €/kW	2.000 €/kW (Micro CHP) 1.000-1.500 €/kW (CHP industriali)	< 100 €/kW (per 150.000 unità/anno)

## Roadmap europea per lo sviluppo e la diffusione delle tecnologie dell'idrogeno e delle celle a combustibile



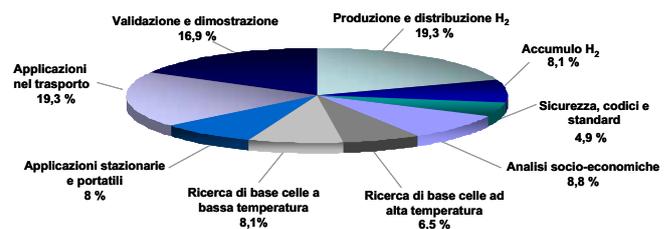
<b>M1</b>	13 siti dimostrativi per veicoli, 200 veicoli, 9 stazioni di rifornimento
<b>M2</b>	30 siti dimostrativi, 3.000 veicoli, costo dell'H <sub>2</sub> alla pompa 2,5 €/kg (escluse tasse)
<b>M3</b>	Costo 100 €/kW, durata 5.000 ore (FC per usi veicolari)
<b>M4</b>	Domanda di idrogeno 10-20%, carbon-free
<b>M5</b>	Costo di produzione idrogeno 2-5 €/kg
<b>M6</b>	Costo celle a combustibile per micro-CHP 6.000 €/kW, per CHP industriale 1.000-1.500 €/kW
<b>M7</b>	100 MW installati
<b>M8</b>	3 GW installati
<b>M9</b>	3.000 unità sul mercato
<b>M10</b>	17.000 nuove unità sul mercato

E' stato quindi redatto un *Implementation Plan*, in cui coerentemente con quanto riportato nei precedenti documenti di strategia, vengono definite le azioni del programma europeo su idrogeno e celle a combustibile per il periodo 2007-2015. Il programma è articolato in quattro principali *Azioni di Innovazione e Sviluppo* (IDA - Innovation and Development Action):

- Veicoli a idrogeno e infrastrutture di rifornimento
- Produzione sostenibile e distribuzione dell'idrogeno
- Celle a combustibile per cogenerazione e generazione di potenza
- Celle a combustibile per i primi mercati.

Queste linee di azione dovrebbero consentire a queste tecnologie di acquisire, al 2020, significative quote di mercato nel campo dei generatori portatili e delle applicazioni stazionarie, con l'impiego sia dell'idrogeno che di altri combustibili (gas naturale, gas derivante da biomasse, ecc.), e di avviare a quella data la penetrazione nel settore della trazione, con qualche milione di veicoli. L'idrogeno necessario per le diverse applicazioni dovrà essere prodotto in maniera crescente da fonti rinnovabili e attraverso processi a basse o nulle emissioni di CO<sub>2</sub>.

L'Unione Europea sostiene la ricerca sulle celle a combustibile dal 1989 e la crescente importanza che le attribuisce è testimoniata dal significativo aumento dei finanziamenti erogati, passato dagli 8 milioni di euro stanziati nel periodo



**Distribuzione budget 6PQ per attività su idrogeno e celle a combustibile**  
Fonte: Commissione Europea, 2006

1988-1992, ai 315 milioni del 6° Programma Quadro (2002-2006) ed è previsto un ulteriore aumento nel 7° Programma Quadro (7PQ).

Nel il 7PQ viene inoltre attivata una Joint Technology Initiative (JTI) su celle a combustibile e idrogeno. La JTI è una partnership pubblico-privato, chiamata a definire e gestire, con meccanismi più efficienti di quelli adottati finora, il programma di ricerca, sviluppo e dimostrazione nel settore e a preparare la fase di introduzione nel mercato, utilizzando a tal fine finanziamenti sia pubblici (Commissione e Stati Membri) che privati. Per il periodo 2007-2013 la Commissione Europea ha stanziato 470 M€; un importo equivalente sarà messo a disposizione dai partner industriali.

## ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO DI SISTEMI PER APPLICAZIONI MILITARI

Programmi di ricerca e sviluppo di sistemi a celle a combustibile per applicazioni militari sono in corso principalmente in Stati Uniti, Canada ed Europa. In Giappone, a differenza di quanto avviene per altri settori (trasporto, generazione stazionaria e portatile, unità per elettronica di consumo), al momento non risultano finanziamenti pubblici per progetti rivolti allo sviluppo di unità per usi in campo militare.

Nel seguito si riporta una panoramica delle attività promosse da organizzazioni governative e militari.

### NORD AMERICA (STATI UNITI E CANADA)

Negli **Stati Uniti** i maggiori finanziamenti governativi per lo sviluppo di celle a combustibile per applicazioni militari provengono dal **Dipartimento della Difesa (DoD)**. Nello specifico il DoD promuove lo sviluppo di celle a combustibile per la propulsione di veicoli (trasporto terrestre, aereo, navale) e per generatori portatili e la dimostrazione di sistemi di generazione di potenza stazionaria presso alcune basi militari.

Nel quadro del *Programma Land Warrior/Future Warrior* si stanno esplorando nuove tecnologie da integrare nell'equipaggiamento dei soldati. In quest'ambito viene valutata la possibilità di utilizzo delle celle a combustibile, alimentate con metanolo o altri combustibili logistici (diesel, JP-8), come sorgenti di energia per armi, dispositivi elettronici, sistemi GPS e anche per gli "exoskeleton", le strutture robotizzate che si stanno sperimentando per aumentare le prestazioni fisiche dei soldati in missione o in combattimento.

Le organizzazioni del DoD che hanno in corso programmi di R&S su celle a combustibile sono:

- Army Research Laboratory (ARL)
- Air Force Research Laboratory (AFRL)
- Defense Advanced Research Project Agency (DARPA)
- U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) e Construction Engineering Research Laboratory (CERL)
- Office of Naval Research (ONR).



**Prototipo di exoskeleton**  
Fonte: Università di Berkeley

L'**Army Research Laboratory** è impegnato in attività finalizzate allo sviluppo di unità portatili per l'alimentazione di sistemi di telecomunicazione, di visione notturna e sensori non presidiati. ARL, con il supporto di diversi partner (Motorola Laboratories, Illinois Institute of Technology, NuVant, Honeywell e molte università statunitensi), per le diverse applicazioni sta esaminando differenti tecnologie di cella (DMFC 0,1-100 W, PEFC 1-1.000 W e SOFC 0,1-10 kW).

In passato ARL ha lavorato con l'Università di Stato della Pennsylvania ad un progetto per convertire a celle a combustibile (tecnologia PEFC) un mezzo sottomarino a batterie senza equipaggio (UUV, *Unmanned Undersea Vehicle*), il "Seahorse".

L'**Air Force Research Laboratory** all'interno del *Dual Use Science and Technology Programme* nel 2004 ha avviato un progetto in cui Protonex Technologies e Millennium Cell sviluppano piccole unità portatili alimentate con idrogeno da sodio boridruro.

L'AFRL sta inoltre sviluppando celle a combustibile per "unmanned aerial vehicle" (U.A.V.), di piccole e medie dimensioni (potenze 50-300 W e 1-10 kW).



**Esempio di veicolo UAV (Raven)**  
Potenza: 80-200 W  
Peso batteria: 0,45 kg  
Densità di potenza: 177-444 W/kg

In collaborazione con i laboratori di ricerca **CERL** e **ERDC** del DoD, presso l'Army Research Laboratory è in corso la messa a punto di un'unità di generazione di idrogeno da 100 kW da integrare in un sistema a celle a combustibile compatto e modulare da utilizzare come alternativa alle unità MEP (Mobile Electric Power) attualmente in uso.



**Generatore Mobile Electric Power**

La **Defence Advanced Research Projects Agency**, a partire dal 2000, ha promosso molte

iniziative, tra cui ricordiamo:

- il *Micro Power Generation Programme*, coordinato da DARPA/MTO (Micro-systems Technology Office) e finalizzato alla realizzazione di microcelle a metanolo diretto ed a elettrolita polimerico alimentate con idrogeno da reformer;
- il *Palm Power Programme*, con il supporto di ARL e dell'Office of Naval Research, incentrato allo sviluppo e dimostrazione di sistemi portatili da 20 W, alimentati con combustibile JP-8 ed integrati con una batteria. Obiettivo è quello di ottenere unità in grado di fornire un contenuto energetico 15 volte superiore a quello delle attuali batterie. Questi sistemi sono destinati ad alimentare dispositivi elettronici in dotazione a singoli soldati, piccoli veicoli robot o exoskeleton;
- il *Mobile Electric Power Project* finalizzato all'introduzione della tecnologia delle celle a combustibile come alternativa ai generatori diesel di grandi dimensioni attualmente impiegati e alla realizzazione di piccole unità di potenza 500 W.

Il **Communications, Electronics Research Development and Engineering Center** (CERDEC) dell'U.S. Army, per usi nel settore militare sta valutando diverse tecnologie (batterie litio-ione e di tipo avanzato, celle a combustibile, motori Stirling, pannelli solari, batterie metallo-aria, motori a combustione interna); relativamente alle celle a combustibile ha identificato, per il medio termine, tre possibili aree di applicazione:

- generazione di potenza di piccola taglia (< 100 W) per dispositivi portatili di soldati e per sensori
- sistemi per ricarica batterie (100-500 W)
- unità di potenza ausiliaria (APU, 0,5-10 kW).

Concluso il *Foreign Comparative Test (FCT) Programme*, in cui erano state provate unità PEFC e DMFC di potenza compresa tra 25 W e 2 kW e sistemi di generazione idrogeno per valutarne l'affidabilità e la rispondenza agli standard militari, nel 2005 sono state avviate nuove iniziative nel *CERDEC Fuel Cell Technology Programme*. All'interno del programma operano diverse organizzazioni industriali che sviluppano celle a combustibile e sistemi di generazione di idrogeno. Parte delle attività sono svolte a supporto del Land Warrior Programme.

**FTP Programme - Organizzazioni coinvolte e unità provate**

Organizzazione	Tecnologia
NovArs (Germania)	PEFC 670 W - 3.8 kg
Smart Fuel Cell (Germania)	DMFC 25 W, 10 kg
Intelligent Energy (Regno Unito)	PEFC 2 kW, 115 kg
Ballard Power (Canada)	PEFC 1 kW, 87 kg
Hydrogenics (Canada)	sodioboro idruro 500 W, 80 kg

**CERDEC Fuel Cell Technology Programme - Organizzazioni coinvolte e tipologia di attività**

Organizzazione	Tecnologia / Combustibile	Potenza	Applicazione
Smart Fuel Cell	DMFC	20 W	Sistemi portatili individuali
UltraCell	RMFC (Methanol Reformer Fuel Cell)	25 W	Sistemi portatili individuali
Idatech / Genesis FuelTech	PEFC / Fuel processor a metanolo	200 W	Ricarica batterie portatili
SOFCo-EFS Holdings	SOFC / Combustibili idrocarburici pesanti	2-5 kW	Generatori di potenza silenziati
Adaptive Materials Inc.	SOFC / Combustibili idrocarburici	50-150 W	Ricarica batterie portatili
Nanodynamics /Altex Technol.	SOFC / Idrocarburi (es. propano)	50-150 W	Generazione portatile
General Atomics	PEFC / Generatori idrogeno che usano idruri chimici (NaNH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> BH <sub>3</sub> )	20 W	Generazione portatile
General Dynamics / Aspen Product Group	Fuel processor / Combustibili logistici (JP-8)	5 kW	



**Prototipo CECOM - unità APU (PEFC 2 kW) installata sul tetto**

Il **CECOM** (*Communications-Electronics Command*), in collaborazione con il **National Automotive Center** (NAC) ed il CERDEC, ha provato in condizioni reali un prototipo di veicolo leggero da combattimento su cui era installata una cella polimerica da 2 kW, che funzionava da sorgente di potenza ausiliaria per i dispositivi elettronici e di telecomunicazione durante le missioni "silent watch". La cella, fornita dalla Idatech, era alimentata a metanolo.

Il **National Automotive Center**, come parte del **TARDEC** (*Tank-Automotive Research Development and Engineering Center*), che si occupa dello sviluppo e gestione dei veicoli in dotazione alle forze armate statunitensi per il trasporto via terra, sta lavorando con diverse organizzazioni impegnate in progetti dimostrativi di veicoli alimentati con celle a combustibile, sia per usi in battaglia che per trasporto di personale all'interno delle basi militari.

Uno di questi progetti vede impegnata la Quantum Technologies che ha realizzato, il Quantum AMV™ (Alternative Mobility Vehicle), un fuoristrada denominato "Aggressor". Si tratta di veicolo ibrido, in cui un'unità PEFC da 10 kW (tecnologia Hydrogenics) è accoppiata ad un sistema di accumulo di energia (batteria) da 60 kW. Il veicolo, che è stato provato



**AMV™ Quantum - Aggressor**

presso basi militari statunitensi per un periodo di sei mesi, può anche funzionare come generatore da campo per sistemi di telecomunicazione, sorveglianza o altri dispositivi militari. Il mezzo è alimentato con idrogeno a 350 bar.

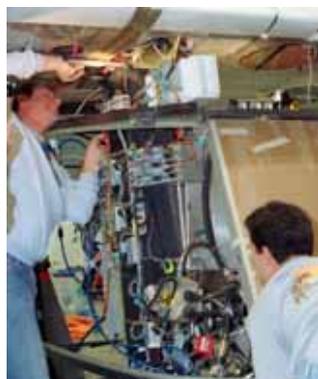
Il NAC è impegnato inoltre nello sviluppo di una locomotiva alimentata con un'unità PEFC da 1,2MW.

L'Engineer Research and Development Center e il Construction Engineering Research Laboratory del Dipartimento della Difesa dal 1994 promuovono programmi dimostrativi che riguardano celle a combustibile per generazione stazionaria. Come vedremo in seguito, presso basi militari e sedi diplomatiche statunitensi sono stati installare unità PAFC di potenza 200 kW e PEFC di tipo residenziale (1-5 kW).

Diversi centri della Marina promuovono l'uso di celle per applicazioni navali, con l'obiettivo abbastanza ambizioso di avere unità operative entro il 2011. In particolare attività di ricerca e sviluppo di celle a combustibile come unità APU o sistemi di generazione di back-up per navi e sottomarini sono in corso presso il **Naval Surface Warfare Center**. Nel corso degli ultimi anni sono stati provati diversi sistemi, tra cui un'unità PEFC da 500 kW sviluppata da Ballard e McDermott, e attualmente si sta sperimentando una cella a carbonati fusi da 625 kW, alimentata con diesel, fornita da FuelCell Energy.

Il **Naval Undersea Warfare Center**, in collaborazione con l'Office of Naval Research, ha sviluppato e provato celle a combustibile per varie applicazioni, compresi UUV ed armi per guerra sottomarina.

La NASA ha tre diverse organizzazioni con attività in corso nel settore delle celle a combustibile per usi militari. Il **Dryden Flight Research Center** (DFRC) promuove lo sviluppo di celle a combustibile per applicazioni su velivoli telecomandati per usi civili e militari all'interno del *UAV Project*, che vede il coinvolgimento di AeroVironment, Aurora Flight Systems, Boeing, General Atomics, Lockheed Martin, Northrop Grumman, e Scaled Composites. Presso il DFRC, frutto di un progetto congiunto con la società californiana AeroVironment, in passato era stato sviluppato Helios un velivolo senza equipaggio, alimentato a energia solare capace di operare ad altissima quota e per lunghi periodi, progettato per usi di sorveglianza sia militare che civile (es. osservazioni meteorologiche). Sul mezzo era montata una PEFC da 15 kW, che alimentava i 14 motori ad elica del prototipo nelle fasi di volo notturno. A causa di problemi tecnici, Helios è precipitato in mare nei pressi delle Hawaii durante un volo di prova nel giugno 2003. Il velivolo era arrivato a toccare i 22.800 metri di quota.



Montaggio della PEFC AeroVironment sul prototipo Helios (NASA)



Helios durante il suo primo volo (14 Luglio 2001) dalla U.S. Navy Pacific Missile Range Facility

Il **Glen Research Center** della NASA, che negli anni '60 e '70 del Novecento ha sviluppato celle alcaline e polimeriche per le varie missioni spaziali, è attualmente coinvolto nello sviluppo di celle a combustibile per UAV e piccoli aerei da trasporto e per palloni da alta quota.

Infine il **Jet Propulsion Center** gestito sempre dalla NASA attraverso l'Institute of Technology della California, sta lavorando su celle a metanolo diretto per applicazioni portatili. Supportato dal DARPA, il Jet Propulsion Center ha messo a punto un sistema portatile da 150 W.

In **Canada**, il **Dipartimento della Difesa** sostiene da alcuni anni lo sviluppo di celle a combustibile. In passato ha promosso attività della Ballard Power System volte allo sviluppo di unità da 50 kW e successivamente ha finanziato la realizzazione di un sistema da 250 kW per usi a bordo di un sottomarino.

Il Dipartimento della Difesa sta promuovendo presso il **Royal Military College of Canada** un progetto quinquennale volto allo sviluppo di fuel processor per la conversione di combustibili convenzionali in idrogeno.

L'Esercito Canadese sta inoltre valutando la possibilità di utilizzare le celle a combustibile come unità APU su veicoli corazzati del tipo LAV-3.

## EUROPA

In Europa le attività di sviluppo delle celle a combustibile per usi militari sono limitate ad alcune nazioni e riguardano essenzialmente applicazioni portatili e sistemi per il trasporto via mare (navi di superficie e sottomarini).

In Germania, Grecia, Italia e Portogallo è stata avviata la realizzazione di sottomarini con celle ad elettrolita polimerico. Si tratta di sottomarini della Classe U212, progettati congiuntamente da Siemens e da Howaldtswerke-Deutsche Werft (HDW) e costruiti a Kiel in Germania e dalla Fincantieri in Italia. I sottomarini sono dotati di propulsione diesel-elettrica affiancata ad un sistema a celle a combustibile, destinato alle fasi di navigazione silenziosa a bassa velocità, in quanto unico sistema di generazione/pro-



Sommersibile HDW/Siemens presso Fincantieri

pulsione quando in immersione.

In Francia, il dipartimento **DGA** (*Délégation Générale pour l'Armement*) del **Ministero della Difesa** nel 2004 ha avviato il progetto *FELIN*, analogo al Programma Land Warrior, finalizzato allo sviluppo e realizzazione di equipaggiamenti elettronici individuali di nuova generazione (es. sistemi di ricognizione visiva diurna/notturna) per la fanteria, all'interno del quale viene promosso l'impiego di celle a combustibile come sistemi di ricarica di batterie o per applicazioni su mezzi di trasporto.

Un programma simile, il *FIST* (Future Integrated Soldier Technology) è stato promosso dalla **Defence Procurement Agency** del Ministero della Difesa britannico, in cui si guarda alla possibilità di utilizzare le celle a combustibile per la generazione di potenza portatile.

#### **ASIA E RESTO DEL MONDO**

A parte alcune attività svolte a Singapore e in Sud Corea, non risultano attualmente in corso progetti significativi o quanto meno questi non sono resi pubblici.

A Singapore, la **Defence Science and Technology Agency** (*DSTA*) promuove presso la *Nanyang Technological University*, attività su celle a combustibile per usi stazionari. *DSTA* finanzia inoltre alcune attività del *CET Technologies*, che sta provando per le forze armate un sistema UPS della società canadese *Palcan Fuel Cells* (*PalPac*® 500, tecnologia *PEFC*).

La South Korea Navy ha ordinato tre sottomarini al gruppo *HDW/Siemens*, la cui costruzione sarà affidata alla *Hyundai Heavy Industries*.

# TERMODINAMICA DELLA CELLA, RENDIMENTI

In condizioni di equilibrio l'energia massima ottenibile in una cella, che opera a temperatura e pressione costante, è data dalla variazione di energia libera di Gibbs connessa alla reazione  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$  ed è espressa dalla relazione:

$$\Delta G = -nFE_{rev} \quad \text{dove: } \begin{array}{l} n = \text{numero di elettroni che partecipano alla reazione} \\ F = \text{costante} \\ E_{rev} = \text{potenziale reversibile di cella.} \end{array}$$

In queste condizioni la quantità di calore prodotta è pari a:

$$Q_{rev} = T\Delta S = \Delta H - \Delta G$$

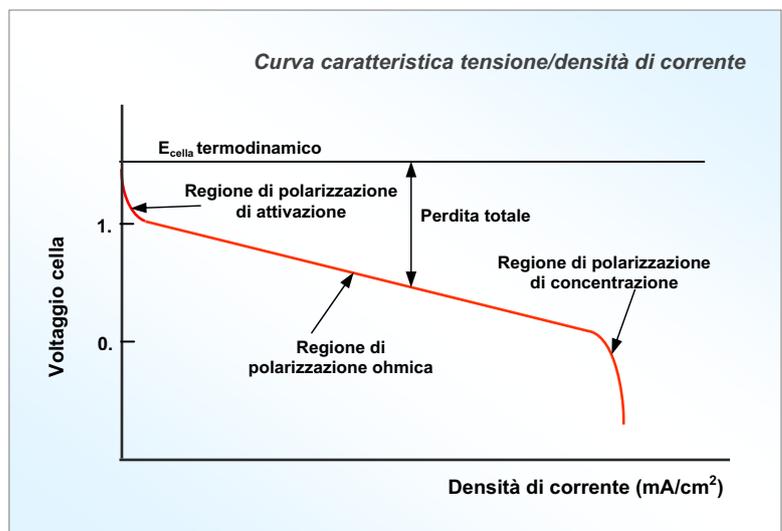
in cui  $\Delta H$  è la variazione di entalpia connessa con la reazione globale di ossidazione del combustibile.

In condizioni standard la tensione massima termodinamicamente ottenibile da una cella a idrogeno e ossigeno che produce acqua in forma liquida è:

$$E_{rev} = -\Delta G/nF = 1,229 \text{ V.}$$

La differenza di potenziale tra gli elettrodi è massima ( $E_{rev}$ ) quando non si ha passaggio di corrente nel circuito esterno, nel momento in cui questa comincia a circolare si ha un allontanamento dall'equilibrio per insorgere di fenomeni di polarizzazione (sovratensioni). Si ha quindi una diminuzione dell'energia elettrica fornita, rispetto a quella teorica, con corrispondente aumento del calore prodotto.

In figura si riporta una tipica curva di polarizzazione.



## POLARIZZAZIONI DI CELLA

**Polarizzazione di attivazione**, rappresenta la barriera energetica che occorre superare perché la reazione abbia luogo ed è connessa alla velocità delle reazioni elettrochimiche. Nel caso di reazioni elettrochimiche cui  $\eta_{att}$  è dell'ordine 50-100 mV, viene espressa dall'equazione di Tafel:

$$\eta_{att} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} = a + b \log i$$

$$a = -2,3 \frac{RT}{\alpha nF} \log i_0 \quad b = 2,3 \frac{RT}{\alpha nF}$$

in cui  $\alpha$  = coefficiente di trasferimento di carica  
 $i_0$  = densità di corrente di scambio.

La polarizzazione di attivazione è collegata allo stadio lento della reazione, contribuiscono a questo tipo di polarizzazione processi che implicano adsorbimento di reagenti, trasferimento di elettroni attraverso il doppio strato, desorbimento di prodotti e la natura della superficie elettrochimica.

**Polarizzazione di concentrazione** è dovuta a fenomeni di trasporto di massa che ostacolano le reazioni agli elettrodi (diffusione dei gas attraverso l'elettrodo, soluzione e dissoluzione dei reagenti e dei prodotti in e fuori l'elettrolita).

La velocità di trasporto di massa in molti casi può essere descritta dalla 1ª legge di Fick

$$i = \frac{nFD}{\delta} (c_b - c_s)$$

in cui:

$D$  = coefficiente di diffusione delle specie reagenti  
 $c_b$  = concentrazione delle specie reagenti nel bulk  
 $c_s$  = concentrazione sulla superficie dell'elettrodo  
 $\delta$  = spessore dello strato di diffusione.

Quando l'elettrodo è governato solo da fenomeni di diffusione si raggiunge una corrente limite  $i_L$  che è definita come:

$$i_L = \frac{nFDc_b}{\delta}$$

Nel caso in cui si assume trascurabile la  $\eta_{att}$ , cioè la reazione è molto veloce, la polarizzazione di concentrazione è espressa dalla:

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right)$$

**Polarizzazione ohmica** è causata dalla resistenza al flusso di ioni nell'elettrolita e al flusso di elettroni attraverso i materiali di elettrodo:

$$\eta_{ohm} = iR$$

in cui R è la resistenza totale di cella. La perdita più significativa è quella che si verifica nell'elettrolita e può venire ridotta diminuendo la distanza tra gli elettrodi e utilizzando elettroliti ad elevata conducibilità ionica.

## RENDIMENTO DI CELLA

### Rendimento termodinamico

Il rendimento energetico di una cella è definito come:

$$\epsilon_T = \frac{\text{Lavoro utile}}{H}$$

e può essere espresso come il rapporto tra il massimo lavoro elettrico ottenibile e l'energia totale disponibile:  $\epsilon_T = \frac{\Delta G}{\Delta H}$ .

Il valore di questo rapporto dipende dalla natura delle reazioni che avvengono in cella e dalla temperatura e pressione a cui si opera.

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 si consideri allo stato liquido o gassoso.

### Rendimento di tensione

Nel caso in cui la cella eroghi corrente elettrica, la tensione di cella (V) è, come abbiamo visto, minore della tensione che si avrebbe a circuito aperto ( $E_{rev}$ ). Si definisce rendimento di tensione il rapporto tra tensione sotto carico e tensione teorica:

$$\epsilon_V = \frac{V}{E_{rev}}$$

### Rendimento di corrente (Utilizzazione del combustibile)

La corrente elettrica prodotta da una reazione può essere definita dalla legge di Faraday:

$$I_F = I_{max} = n F \frac{df}{dt}$$

in cui  $df/dt$  è la velocità con cui si consumano le specie reagenti (numero di moli di reagente consumate al secondo).

La corrente effettivamente erogata dalla cella è minore della  $I_{max}$  ed è collegata alla quantità di combustibile realmente consumato:

$$I = n F \left( \frac{df}{dt} \right)_{cons}$$

Si definisce rendimento di corrente il rapporto:  $\epsilon_I = \frac{I}{I_{max}} = U$  normalmente riportato come utilizzazione del combustibile.

### Rendimento elettrochimico di cella

Il rendimento elettrochimico di una cella, che opera con gas contenenti solo le specie elettrochimicamente attive o specie inerti, è dato dal prodotto dei singoli rendimenti (termodinamico, tensione, corrente):

$$\epsilon_{el} = \epsilon_T \epsilon_V \epsilon_I$$

In caso di altre specie combustibili si ha un ulteriore termine che tiene conto di queste ultime e che è legato al potere calorifico inferiore di ciascuna di esse:

$$\epsilon_H = \Delta H_r / \Delta H_c \quad \text{in cui } \Delta H_r \text{ è la somma del potere calorifico inferiore di ciascuna specie combustibile } (\Delta H_c = \sum PCI_i X_i), \text{ mentre } \Delta H_c \text{ tiene conto soltanto delle specie coinvolte nella produzione di energia}$$

Il rendimento di cella in questo caso diventa:  $\epsilon_{cella} = \epsilon_{el} \epsilon_H$

### Polarizzazione di cella

Le polarizzazioni agiscono sempre nel senso di elevare il potenziale dell'elettrodo al quale decorre la reazione di ossidazione (anodo) e di abbassare il potenziale dell'elettrodo al quale decorre la reazione di riduzione (catodo). Abbiamo:

$$\begin{aligned} V_a &= E_a + |\eta_a| && \text{Anodo} \\ V_c &= E_c - |\eta_c| && \text{Catodo} \end{aligned}$$

Il potenziale di cella quando circola corrente può esprimersi come:

$$V_{cella} = E_{rev} - \eta_c - \eta_a - iR$$

**EFFETTO DEI DIVERSI PARAMETRI OPERATIVI SULLE PRESTAZIONI DI CELLA**

Le prestazioni di una cella a combustibile sono influenzate da parametri operativi quali temperatura, pressione, composizione dei gas, nonché da fattori come la presenza di impurezze, che modificano il potenziale reversibile di cella e le polarizzazioni.

**Temperatura e pressione**

L'effetto della temperatura e della pressione sul potenziale reversibile  $E_{rev}$  di una cella a combustibile può essere analizzato sulla base delle variazioni di energia libera di Gibbs con la temperatura e la pressione:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_P = \frac{\Delta S}{nF} \quad \left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)_T = -\frac{\Delta V}{nF}$$

Dal momento che la variazione di entropia nella reazione dell'idrogeno con ossigeno è negativa, il potenziale di cella diminuisce con il crescere della temperatura. Per la stessa reazione, la variazione di volume è negativa e quindi il potenziale reversibile aumenta con l'aumentare della pressione.

In pratica un aumento di temperatura:

- riduce la polarizzazione ohmica, in quanto aumenta la conducibilità ionica dell'elettrolita;
- migliora i fenomeni di trasporto, riducendo la polarizzazione di concentrazione;
- migliora la cinetica di reazione, riducendo la polarizzazione di attivazione;
- migliora in genere la tolleranza alle impurezze presenti nel gas di alimentazione.

Inoltre più è alta la temperatura, più efficiente è il recupero energetico del calore prodotto dalla cella.

La temperatura massima nei vari tipi di cella è assegnata di volta in volta sulla base della stabilità dei materiali utilizzati. Problemi pratici limitano la temperatura massima di esercizio di una cella, poiché i fenomeni di corrosione, i problemi di sinterizzazione e cristallizzazione dei catalizzatori, la degradazione dell'elettrolita sono tutti accelerati da un aumento di temperatura.

Un aumento della pressione di esercizio della cella ha effetti positivi sulle prestazioni, in quanto produce più alte pressioni parziali dei reagenti in prossimità degli elettrodi, migliora i fenomeni di trasporto e la solubilità dei gas nell'elettrolita, tutti fenomeni che attenuano la polarizzazione di cella, ed inoltre contribuisce a ridurre le perdite di elettrolita (se liquido) che sono particolarmente evidenti nelle celle ad alta temperatura.

Pressioni più alte creano però maggiori problemi ai materiali di cella e richiedono un più stringente controllo delle pressioni differenziali.

**Composizione dei gas e utilizzazione dei reagenti**

La corrente prodotta da una cella è direttamente legata alle moli di combustibile e di ossidante disponibili per la reazione. L'efficienza di una cella è influenzata dal grado di utilizzo dei reagenti. Definiamo utilizzazione (U) la frazione totale di reagente introdotto in cella che reagisce elettrochimicamente. Per esempio nel caso dell'idrogeno, il grado di utilizzo risulta:

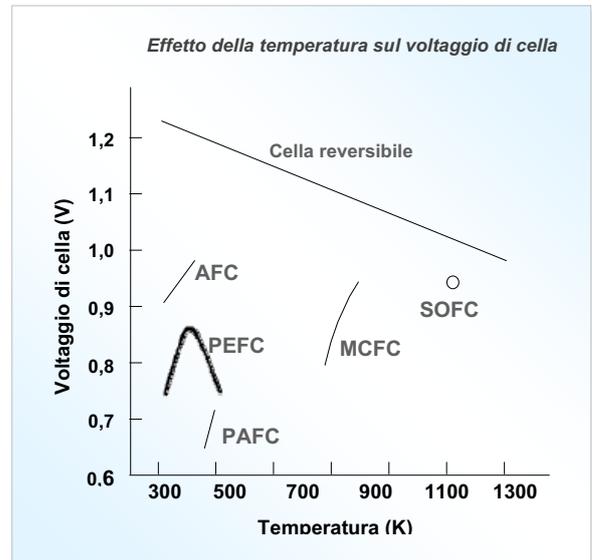
$$U_{H_2} = \frac{H_{2,i} - H_{2,u}}{H_{2,i}} = \frac{H_{2,consumato}}{H_{2,i}}$$

in cui  $H_{2,i}$  e  $H_{2,u}$  indicano rispettivamente le concentrazioni di idrogeno in ingresso e in uscita dalla cella.

L'idrogeno può essere consumato oltre che nel processo di elettrossidazione, anche in reazioni chimiche dirette con l'ossigeno o per perdite del sistema. In questo caso si ha un incremento dell'utilizzazione dell'idrogeno, senza tuttavia contribuire alla produzione di energia in cella.

**Effetto delle impurezze**

Impurezze presenti nei gas di alimentazioni riducono le prestazioni di cella; quantità e specie tollerabili variano con il tipo di cella, come possiamo notare dalla tabella.

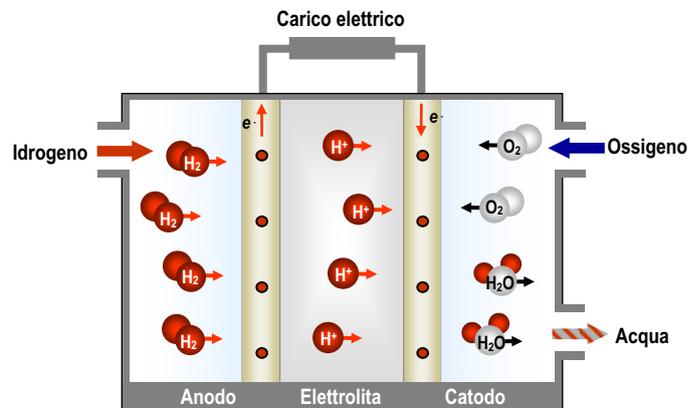


Tipo di cella	Limiti di tollerabilità
AFC	0% CO <sub>2</sub> , 0% H <sub>2</sub> S
PEFC	CO < 10 ppm
PAFC	CO < 1%, H <sub>2</sub> S + COS < 50 ppm
MCFC	H <sub>2</sub> S, COS < 1 ppm, HCl < 1 ppm, NH <sub>3</sub> < 1%
SOFC	H <sub>2</sub> S < 1 ppm, HCl < 1 ppm, NH <sub>3</sub> < 1000 ppm

# CELLE AD ELETTROLITA POLIMERICO



**Stack di celle ad elettrolita polimerico**  
(Fonte: PEMEAS/BAFS Fuel Cells)



Le celle ad elettrolita polimerico (PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell) operano a temperature comprese tra 70 e 100 °C ed utilizzano come elettrolita una membrana solfonica perfluorurata ad elevata conducibilità protonica. Gli elettrodi sono strutture porose a base di carbone, su cui è disperso il catalizzatore costituito da platino o sue leghe.

Rispetto ad altri tipi di celle presentano una serie di vantaggi:

- elevata densità di potenza dello stack (attualmente > 1,7 kW/L, >1,3 kW/kg);
- assenza di problemi di corrosione tipici di altri tipi di celle con elettrolita liquido;
- relativa semplicità costruttiva;
- rapidità di partenza a freddo (dell'ordine del minuto).

La bassa temperatura operativa è tuttavia fonte di alcuni svantaggi rispetto alle altre tipologie di cella, si ha:

- scarsa tolleranza alla presenza del CO nel combustibile;
- una più difficile integrazione termica fra sistema di trattamento del combustibile e stack.

Per ovviare a questi svantaggi sono in atto ricerche orientate allo sviluppo di membrane in grado di lavorare a temperature più elevate (fino a 200 °C).

Le PEFC, sviluppate agli inizi degli anni '60 per applicazioni spaziali, dalla metà degli anni '80 sono state oggetto di notevole attenzione per applicazioni nel campo della trazione elettrica, successivamente l'interesse è stato ampliato alla generazione/cogenerazione stazionaria di piccola taglia (fino ad alcune centinaia di kW) e alla generazione portatile.

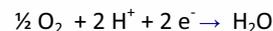
## REAZIONI ELETTROCHIMICHE

Le reazioni che avvengono in una cella ad elettrolita polimerico sono:

Reazione anodica



Reazione catodica



L'acqua prodotta viene espulsa al catodo, con l'eccesso di aria.

Al processo partecipa idrogeno; se si utilizza gas di sintesi, è necessario convertire l'ossido di carbonio, eventualmente presente in anidride carbonica ed idrogeno. La presenza anche in tracce di CO nel gas alimentato all'anodo comporta un avvelenamento del catalizzatore elettrodo.

Tenore di CO ammesso dalla cella: < 10 ppm.

## MATERIALI DEI COMPONENTI DI CELLA

<b>Anodo</b>	Elettrodi a diffusione gassosa costituiti da uno strato diffusivo (carbone + PTFE) ed uno strato catalitico (C/PTFE-catalizzatore) su supporto di carbon paper o carbon cloth
<b>Catodo</b>	Catalizzatore: platino o una sua lega (Pt-Ru, Pt-Sn) supportato su carbone Carico di platino: 0,2-0,4 mg/cm <sup>2</sup>
<b>Elettrolita</b>	Membrana solfonica perfluorurata (del tipo Nafion) Spessore: 50-200 μm
<b>Piatti bipolari</b>	Grafite o in qualche caso materiale metallico; in prospettiva polimeri conduttori

## COMPONENTI DI CELLA

### Assemblato membrana/elettrodo (MEA)

Le celle a combustibile ad elettrolita polimerico sono costituite da un anodo, su cui avviene l'ossidazione dell'idrogeno, un catodo, dove avviene la riduzione dell'ossigeno ed un elettrolita di natura polimerica, assemblati a costituire il cosiddetto MEA (Membrane Electrode Assembly).

Gli elettrodi a diffusione gassosa utilizzati nelle PEFC sono normalmente formati da uno strato diffusivo composto da una miscela carbone/PTFE, che ha la funzione di diffondere i reagenti gassosi ed uno strato catalitico composto da un catalizzatore a base di platino/carbone miscelato con un polimero. I due strati vengono depositati su un supporto poroso che serve a dare resistenza meccanica all'elettrodo senza tuttavia limitarne le proprietà diffusive e la conducibilità elettrica. Come supporti sono in genere impiegati carbon cloth o carbon paper. Questi supporti di spessore variabile differiscono fra di loro per le caratteristiche di porosità e conducibilità elettrica, quindi hanno anche influenza sulle caratteristiche e prestazioni dell'elettrodo. Inoltre, hanno diversa resistenza meccanica e rigidità, che determinano differenze nella configurazioni di cella.

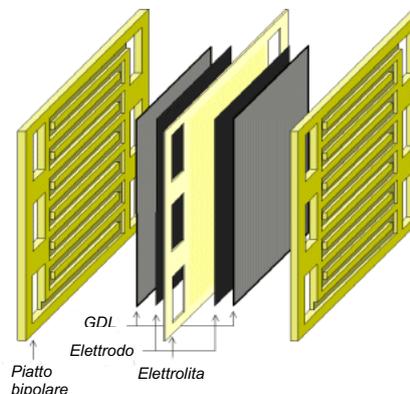
Il carico di catalizzatore dell'elettrodo è intorno a  $0,2 \text{ mg/cm}^2$ . Allo stato attuale il catalizzatore anodico maggiormente usato per celle che operano con contenuti di CO dell'ordine delle decine di ppm è costituito da una lega binaria Pt/Ru supportato su carbone. La formulazione più citata prevede un rapporto atomico 1:1.

La maggior parte delle celle usano membrane perfluorosolfoniche tipo Nafion prodotte dalla DuPont de Nemours, che possiedono un'elevata stabilità chimica a lungo termine in condizioni sia ossidanti che riducenti. Membrane di questo tipo presentano, in condizioni normali ed alla temperatura di cella, una conducibilità protonica superiore a  $0,1 \text{ S cm}^{-1}$  ed una resistenza di circa  $0,05 \text{ ohm/cm}^2$ . Ricordiamo che la membrana deve operare in condizioni di umidificazione, tali da ottimizzare la conduzione protonica. Un'eccessiva umidificazione della membrana non comporta un aumento della conduzione protonica, ma provoca l'allagamento dell'elettrodo e una resistenza nella diffusione dei gas.

Polimeri perfluorurati, con proprietà di scambio ionico simili a quelle del Nafion, sono stati sviluppati ed immessi sul mercato anche da Dow, Asahi Chemical ed Asahi Glass.

I due tipi di Nafion più utilizzati rimangono il Nafion 115 (spessore  $125 \text{ }\mu\text{m}$ ) ed il Nafion 112 ( $50 \text{ }\mu\text{m}$ ). Spessori minori rendono più facile l'idratazione ma presentano maggior permeabilità e minore resistenza meccanica. Si stanno comunque affermando membrane rinforzate di spessore inferiore ( $30 \text{ }\mu\text{m}$  o meno) del tipo di quelle commercializzate dalla W.L. Gore and Associates, sotto il nome di Gore-Select, costituite da una matrice di politetrafluoroetilene impregnata con elettrolita liquido tipo-Nafion. Il PTFE migliora la resistenza meccanica, ma aumenta la resistenza specifica. Tuttavia il minore spessore della membrana fa sì che quest'aumento non influenzi le loro prestazioni in cella.

Sono in corso attività finalizzate allo sviluppo di membrane in grado di funzionare ad una temperatura superiore a quella tradizionale, per rendere più semplice l'integrazione in sistemi per l'autotrasporto e l'accoppiamento con sistemi di trattamento del combustibile. La disponibilità di membrane in grado di operare a temperature superiori ai  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  renderebbe possibile la realizzazione di celle che possono accettare contenuti in CO sensibilmente superiori ai valori attuali ( $10 \text{ ppm}$ ),



Specifiche tecniche per il MEA  
Stato della tecnologia ed obiettivi DOE al 2010 e al 2015

Caratteristiche	Stato al 2005	2010	2015
Temperatura operativa, $^\circ\text{C}$	<80	<120	<120
Pressione parziale del vapor d'acqua in ingresso, kPa	50	<1.5	<1.5
Costo, \$/kW	60	10	5
Durata, $T_{\text{eserc.}} \leq 80^\circ\text{C}$	~2,000	5.000	5.000
	-	2.000	5.000
Avvio, $^\circ\text{C}$	-20	-40	-40
Prestazioni @ 1/4 potenza (0.8V), $\text{mA/cm}^2$	200	300	300
	$\text{mW/cm}^2$	160	250
Prestazioni, $\text{mW/cm}^2$	600	1,000	1,000
Degradazione del tempo di vita, %	5	10	5

Specifiche tecniche per i piatti bipolari  
Stato della tecnologia ed obiettivi DOE al 2010 e al 2015

Caratteristiche	Stato al 2005 <sup>a</sup>	2010	2015
Costo <sup>b</sup> , \$/kW	10	5	3
Peso, kg/kW	0.36	< 0.4	< 0.4
Permeabilità all' $\text{H}_2$ , $\text{cm}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ @ $80^\circ\text{C}$ , 3 atm (equiv. a $<0.1 \text{ mA/cm}^2$ )	< $2 \cdot 10^{-6}$	< $2 \cdot 10^{-6}$	< $2 \cdot 10^{-6}$
Corrosione, $\mu\text{A/cm}^2$	< 1	< 1	< 1
Conducibilità elettrica, S/cm	> 600	> 100	> 100
Resistività, $\Omega \text{ cm}$	> 0,02	0,01	0,01
Resistenza alla flessione, MPa	> 34	> 25	> 25
Flessibilità, %	da 1,5 a 3,5	da 3 a 5	da 3 a 5

<sup>a</sup> Stato per piatti in grafite, valori di corrosione relativi a piatti metallici

<sup>b</sup> Volumi di produzione 500.000 stack/anno

con una semplificazione notevole del sistema di alimentazione.

## Piatti bipolari

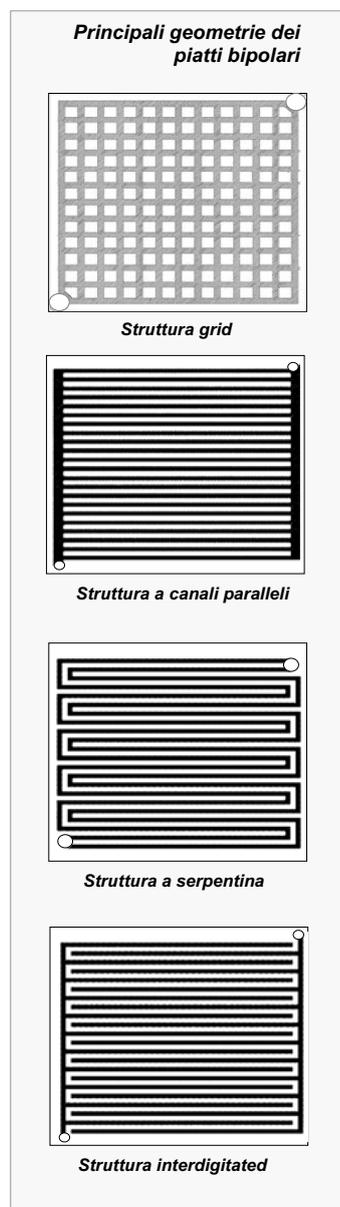
Nello stack, l'assemblato MEA è disposto tra due piatti bipolari, eccetto per la prima e l'ultima cella, per le quali il piatto esterno è a contatto con un solo elettrodo. I piatti bipolari debbono assolvere diverse funzioni:

- fornire la connessione elettrica tra le celle (conducibilità elettrica);
- distribuire il flusso gassoso del combustibile e dell'ossidante ai singoli elettrodi in maniera più uniforme possibile;
- rimuovere l'acqua prodotta nella reazione;
- permettere un'efficace dissipazione del calore;
- separare combustibile ed ossidante tra le celle connesse in serie.

Per la realizzazione di un piatto bipolare tradizionale, cioè un componente costituito da un unico materiale su cui sono ricavati i canali per i gas ed i rilievi fra i canali stabiliscono la conduzione elettrica piatto-elettrodo, possono essere usati diversi materiali: grafite monolitica, materiali compositi a base di resine e polvere di carbone, grafite impregnata con metalli. Per ridurre i costi, alcune aziende stanno sperimentando piatti metallici in alluminio e in acciaio rivestito con strati anticorrosivi.

Oggi il costo di un piatto in grafite è legato per il 50% alla lavorazione e per il 50% al materiale stesso. I piatti bipolari hanno un'incidenza sul costo totale di uno stack pari a circa il 70% ed è quindi critica la scelta dei materiali, della geometria e dei processi di lavorazione (stampaggio, pressofusione, macchine utensili, ecc.).

Per i piatti bipolari si possono adottare geometrie differenti. La struttura a serpentina è attualmente la più utilizzata per stack di taglia medio-grande, la geometria a canali paralleli è invece preferita per sistemi di piccole dimensioni, del tipo di quelli realizzati per alimentare dispositivi elettronici portatili.



## Guarnizioni

Le guarnizioni assolvono il duplice scopo di tenuta dei reagenti e di realizzazione delle camere elettrodeiche, sono in genere realizzate con un materiale termoplastico, facilmente lavorabile con geometrie anche complesse e termicamente stabile.

Alcuni costruttori di stack, tra cui Exergy Fuel Cells (in precedenza nota come Arcotronics Fuel Cells) ed ENEA, integrano il MEA e la guarnizione in un'unica struttura, il MEGA (Membrane Electrode Gasket Assembly).

La tecnologia consente non solo di semplificare il processo di impilaggio, ma rende lo stack disassemblabile e riasssemblabile più volte, caratteristica non comune nelle celle a combustibile.

## Organizzazioni impegnate nello sviluppo di stack e sistemi PEFC

*Argonne National Laboratories (USA)*  
*Axane Fuel Cell Systems (F)*  
*Ballard Power Systems (CND)*  
*Cosmo Oil (J)*  
*Ebara Ballard (J)*  
*European Fuel Cells (D)*  
*Exergy Fuel Cells (I)*  
*Fuji Electric Advanced Technology (J)*  
*General Motors (USA)*  
*Hitachi (J)*  
*Hitachi Zosen (J)*  
*Hokkaido Gas (J)*  
*Hydrogenics (CND)*  
*IdaTech (USA)*  
*Idemitsu Kosan (J)*  
*Intelligent Energy (UK)*  
*Matsushita Electric Industrial (J)*  
*Mitsubishi Heavy Industries (J)*  
*NASA (USA)*  
*NedStack (NL)*  
*New Energy Japan Eco Sytems (J)*  
*Nippon Oil (J)*  
*NuVant (USA)*  
*Nuvera Fuel Cells (USA/I)*  
*Osaka Gas (J)*  
*Plug Power (USA)*  
*Proton Motor Fuel Cell (D)*  
*ReliOn (USA)*  
*Sanyo Electric (J)*  
*Siemens AG (D)*  
*Tokyo Gas (J)*  
*Toshiba Fuel Cell Power System (J)*  
*UTC Fuel Cells (USA)*  
*Vaillant (D)*  
*Voller Energy (UK)*



MEGA (Exergy Fuel Cells)

## APPLICAZIONI STAZIONARIE E GENERAZIONE PORTATILE

Nel settore stazionario i segmenti di mercato accessibili alle celle ad elettrolita polimerico sono la generazione di potenza nei settori residenziale (2-50 kW) e commerciale (250-500 kW) e la generazione portatile. In questi settori le celle polimeriche si trovano a competere con le celle ad acido fosforico e con i generatori a motore termico. Rispetto a questi ultimi esse presentano migliori caratteristiche energetiche e d'impatto ambientale, mentre differiscono dai sistemi ad acido fosforico per alcuni aspetti che ne differenziano il campo di applicazione. Le celle polimeriche risultano particolarmente adatte alle applicazioni con un basso fattore di utilizzo, nelle quali possono essere impiegati sistemi meno integrati e tecnologicamente più semplici.

Applicazioni nel settore della generazione di potenza stazionaria richiedono costi del sistema nell'intervallo 1.000-1.500 €/kW e tempi di vita dell'ordine delle 40.000 ore. Il DoE ha identificato e proposto una serie di obiettivi tecnici da raggiungere entro il 2011 per impianti PEFC, di potenza compresa nell'intervallo 5-250 kW, alimentati a gas naturale o propano.

**Sistemi PEFC (5-250 kW) per usi stazionari alimentati a gas naturale o propano<sup>a</sup> - Stato della tecnologia ed obiettivi DOE al 2011**  
(il sistema comprende unità di trattamento del combustibile, stack ed ausiliari)

	Stato al 2005	2011
Efficienza elettrica, %	32	40
Efficienza totale, %	75	80
Costo <sup>b</sup> , \$/kWe	2.500	750
Risposta nei transitori (10 - 90 % della potenza), ms	< 3	< 3
Temperatura ammissibile (temp. min e max), °C	- 25 + 40	- 35 + 40
Durata, h	20.000	40.000
Rumore, dB	< 60 @ 1 m	< 55 @ 10 m
Emissioni, g/1000 kWh (NO <sub>x</sub> , CO, SO <sub>x</sub> , idrocarburi, particolato)	< 8	< 1,5

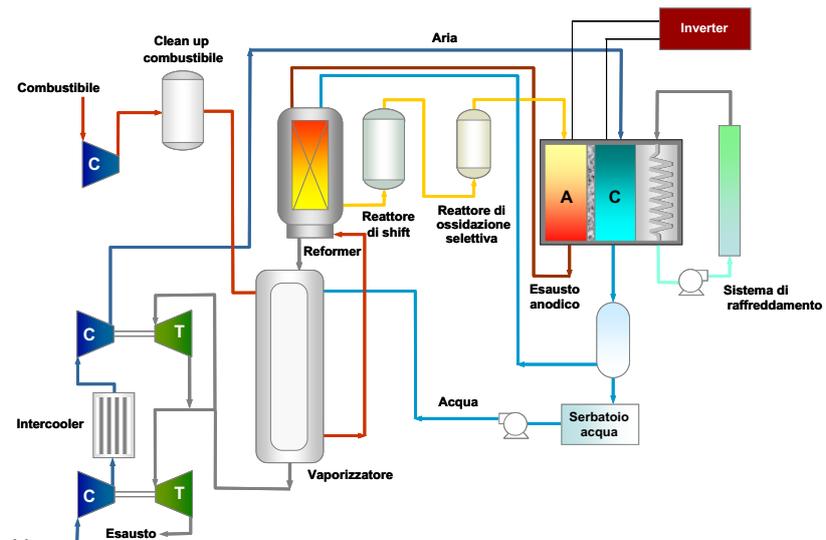
a. Contenuto medio di zolfo nel combustibile assunto pari a 6 ppm

b. Livello di produzione iniziale 2.000 unità/anno.

Il combustibile, dopo compressione, viene inviato in un dispositivo di desolfurazione, quindi il gas purificato è miscelato con acqua in un vaporizzatore ed alimentato al reformer (nel caso illustrato, steam reformer). La miscela prodotta, ricca in idrogeno, ma contenente un tenore di monossido di carbonio inaccettabile per le celle, passa quindi in un reattore di shift ed in uno di ossidazione selettiva posti in serie, che riducono il contenuto di CO a valori al di sotto di 10 ppm.

Il gas di processo ottenuto va ad alimentare la sezione anodica delle celle, dove reagisce con l'aria compressa alimentata al catodo. L'energia termica necessaria al processo di reforming è fornita dalla combustione dei gas residui provenienti dal modulo elettrochimico. L'esausto catodico viene liberato dell'acqua contenuta, parte della quale inviata nel vaporizzatore per umidificare il combustibile prima dell'entrata nel reformer.

La corrente continua prodotta dagli stack viene convertita in corrente alternata dall'inverter, per il collegamento in rete o per situazioni di generazione ad isola.



**Schema di processo di un impianto PEFC alimentato a gas naturale**

### Ballard Power Systems / Ebara Ballard

La Ballard Power Systems (Vancouver, Canada) è riconosciuta come la società leader nel settore delle celle a combustibile ad elettrolita polimerico, sia per i risultati raggiunti, che per i numerosi accordi di collaborazione che ha in corso. La società sviluppa dal 1983 sistemi sia per applicazioni stazionarie sia, come vedremo successivamente, per il trasporto.

La Ballard Generation Systems (BGS), fondata nel 1996 per commercializzare impianti di generazione stazionaria e dal 2004 integrata nella Ballard Power Systems, è stata la prima società a realizzare impianti PEFC per cogenerazione on-site di potenza significativa (unità PB2 da 250 kW, agosto 1997). In passato la BGS, ha stretto alleanze con la FirstEnergy Corp. (in precedenza GPU International, USA), la Alstom France S.A. (F) e la EBARA Corp. (J). Erano state create la Alstom Ballard (oggi non più attiva) e la Ebara Ballard che attualmente si occupa della fabbricazione e vendita in Giappone di impianti di potenza 1 kW per usi residenziali.

Tra la metà del 2000 e l'inizio del 2002 la Alstom Ballard, che aveva il compito di gestire l'installazione e sperimentazione delle unità PB2 e di occuparsi della loro distribuzione in Europa, aveva installato sei moduli da 250 kW, sui quali erano state condotte campagne di prova, per verificarne le prestazioni in differenti condizioni di esercizio ed raccogliere dati utili alla loro ottimizzazione. Le unità erano state installate a Berlino (Bewag), Basilea (Elektra Birsek, Münchenstein), Liegi (consorzio PROMOCELL), Forbach (Electricité de France - Gaz de France), Stoccarda (EnBW) ed Oberhausen (Progetto Fraunhofer).

#### Specifiche impianto PB2 da 250 kW

Potenza elettrica netta	212 kWel
Potenza termica	240 kW
Combustibile	Gas naturale
Efficienza elettrica	35%
Efficienza totale	76%
Dimensioni	7,3 x 2,4 x 2,7 m
Volume	47 m <sup>3</sup> (223 L/kW)

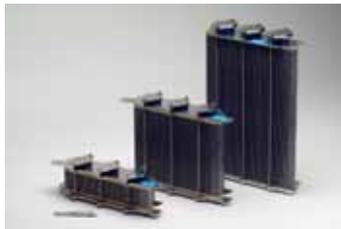


**Impianto Ballard 250 kW,  
Bewag Treptow Heating, Berlino (D)**

Un'unità dello stesso tipo era stata consegnata dalla EBARA Ballard in Giappone; l'impianto installato presso i laboratori della compagnia telefonica giapponese NTT (Nippon Telegraph and Telephone) di Tokyo ha operato per 5.026 ore, dal novembre 2.000 a maggio 2003, producendo 624 MWh.

La prima unità da 250 kW era stata realizzata da Ballard nel 1999 per la Cinergy Corporation ed installata presso il Naval Surface Warfare Center a Crane, nello stato dell'Indiana (USA). L'impianto aveva concluso il suo ciclo di prove nell'ottobre del 2001 con 7.000 ore di esercizio in rete.

Nel dicembre 2002, a seguito di una ristrutturazione della società, Ballard aveva annunciato la sospensione delle attività di sviluppo dei moduli di potenza 60 kW a idrogeno da impiegare come generatori di back-up nel settore delle telecomunicazioni e da 250 kW per cogenerazione ai quali stava lavorando, e l'intenzione di focalizzarsi sul settore automobilistico e della generazione portatile.



#### Mark 1020 ACS (2006)

Potenza	1,26 kW
Corrente	52 A
Combustibile	idrogeno
Pressione	0,3-0,5 bar
Dimensioni	95 x 350 x 280 mm
Peso	13 kg
Durata	4000 ore
	2500 cicli on-off

Ballard attualmente sta sviluppando sistemi adatti per applicazioni portatili, unità UPS (uninterruptible power supply) e per generazione di emergenza. Per questo settore, nel settembre 2006, è stato presentato uno stack raffreddato ad aria (1020 ACS, potenza da 300 W a 5 kW) ottimizzato rispetto ai prodotti utilizzati in precedenza. Lo stack impiega nuovi materiali a basso costo, ed opera senza bisogno di un'umidificazione esterna e di un compressore dell'aria, il che consente notevoli riduzioni di costo del sistema ed un miglioramento della sua affidabilità.

Si ricorda che nel settembre 2001, la Ballard aveva introdotto sul mercato il Nexa™, il primo sistema portatile di potenza 1,2 kW prodotto su larga scala.

Utilizzando la tecnologia Nexa™ era stato in seguito (2002) realizzato l'AirGen™, unità portatile da 1 kW sviluppata nel quadro di una collaborazione con la Coleman Powermate. Il sistema prodotto fino al 2006 aveva un prezzo di circa 6.500 dollari, ed era disponibile solo nell'area del Nord America. L'unità era alimentata ad idrogeno compresso.

#### Modulo NEXA

Potenza	1200 W
Corrente	46 A
Combustibile	idrogeno
Dimensioni	56 x 25 x 33 cm
Peso	13 kg
Emissioni	acqua 0,87 L
Rumore	≤ 72 dBA @ 1 m
Durata	1500 ore

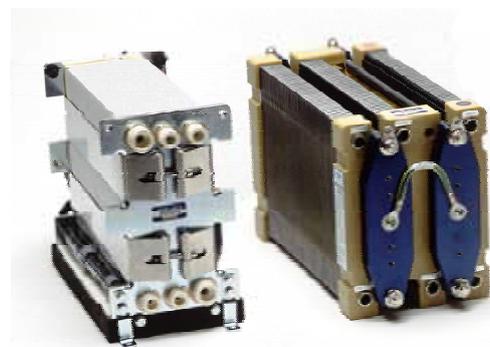


**Unità AirGen da 1 kW**

Ballard al momento ha un accordo con la società danese Danthern Air

Handling per la fornitura di stack Mark™ 1020 ACS di potenza 1 e 2 kW, da integrare in generatori di potenza di back-up destinati ad aziende di telecomunicazione europee. A giugno 2007 sono state consegnati i primi 53 sistemi.

Un accordo simile è stato stipulato, ad ottobre 2007, con la Voller Energy, che utilizzerà stack Mark™ 1030 da 1 kW nelle unità di potenza ausiliaria "Emerald" che sta sviluppando per il mercato dei veicoli ricreazionali (imbarcazioni, caravan).



#### Mark 1030 V3 (2006)

#### Mark 1030 AP2 (2005)

Potenza	1320 W DC
Specifiche Mark AP2:	Dimensioni 43 cm x 17,1 cm x 23,1 cm
	Peso 20,5 kg      Volume 17 L

La **Ebara Ballard** (51% Ebara, 49% Ballard Power Systems) è impegnata con **Tokyo Gas, Osaka Gas, Toho Gas e Nippon Oil**, nello sviluppo di impianti di cogenerazione da 1 kW. Questi sistemi sono alimentati con idrogeno prodotto per reforming di idrocarburi (gas naturale, cherosene) ed usano stack Mark 1030. Considerati i costi elevati dell'elettricità e del gas naturale in Giappone, dove la maggior parte dell'energia necessaria al fabbisogno del paese risulta importata, è stato stimato che questo



**Specifiche del sistema LIFUEL (Ebara Ballard/Tokyo Gas)**

Potenza	1 kW
Efficienza elettrica	34% (LHV)
Efficienza totale	92% (LHV)
Serbatoio acqua calda	200 L
Combustibile	gas naturale

aveva installato 310 impianti. I sistemi alimentati a gas naturale sono stati distribuiti da Tokyo Gas, Toho Gas, Saibu Gas e Hokkaido Gas, mentre gli impianti forniti dalla Nippon Oil erano alimentati a cherosene. Entro l'anno fiscale 2007 gli impianti Ebara Ballard installati saranno in totale 556.

mercato già oggi può sostenere costi dell'ordine di 3.000 €/kW.

La **Tokyo Gas** dal febbraio 2005 fornisce in leasing sistemi da 1 kW, realizzati nell'ambito della collaborazione con Ebara Ballard, ad un costo di 1 M¥ (6.800 €). Il contratto, di durata decennale, include le spese di manutenzione dell'impianto, ma non quelle di collegamento alla rete del gas ed dell'acqua. Chi aderisce all'iniziativa usufruisce di una riduzione della tariffa del gas per un periodo di tre anni, in cambio la Tokyo Gas acquisisce la possibilità di rilevare tutti i dati relativi al funzionamento dell'impianto, al fine di ottimizzarne le prestazioni.

Si prevede che questi prodotti avranno un'ampia diffusione (migliaia di unità per anno) a partire dal 2008. I nuovi impianti utilizzeranno stack di nuova generazione (Mark 1030 V3), che a seguito di un accordo tra le due società saranno realizzati direttamente in Giappone, con supporto di esperti Ballard.

All'interno del *Large Scale Demonstration Fuel Cell Project* (2005-2007) finanziato dal METI e gestito dalla New Energy Fondation (NEF), Ebara Ballard a marzo 2007

**Fuji Electric Advanced Technology**

La Fuji Electric Advanced Technology (Chiba, Giappone), che sviluppa sistemi residenziali di potenza inferiore ai 5 kW, ha attualmente in corso la messa a punto di un'unità CHP da 1 kW. Questo sistema sottoposto a prove in diverse condizioni operative ha dimostrato prestazioni che soddisfano pienamente i requisiti richiesti, come evidenziano i risultati delle prove condotte su due unità di 3° generazione che sono state esercitate nelle città di Yokkaichi e Suzuka.

Fuji ha stabilito l'avvio della commercializzazione di questi prodotti al 2008 e ha dichiarato che si propone di arrivare a vendere tra 5.000 e 10.000 unità all'anno. Gli obiettivi di costo fissati sono di 1,5-2 milioni di yen per unità (10.000-13.300 €) e la durata del sistema di 40.000 ore (oggi intorno alle 10.000 ore). La società crede che per un'ampia diffusione di questi sistemi si dovrà attendere il 2015, quando i costi probabilmente si ridurranno a 300.000-500.000 yen per unità (2.000-3.300 €/unità).

Sistemi CHP 1 kW	3ª gener.	4ª gener.
Potenza	1 kW	
Voltaggio	200 V AC	
Efficienza elettrica	33% LHV	35% LHV
Efficienza termica	42% LHV	51% LHV
Temperatura acqua	60-65 °C	
Combustibile	Gas di città	
Modalità di funzionam.	In automatico	
Dimensioni	92 x 37 x 89,5 cm	91 x 36 x 89,5 cm

Unità CHP 1 kW (4ª gen.)



**Sistemi CHP 1 kW (3ª generazione) - Obiettivi e risultati del test dimostrativi**

		Obiettivo	Risultati	Note
Prestazioni	Efficienza elettrica	33% LHV	35,5 % LHV Yokkaichi 34,1 % LHV Suzuka	Primo periodo di esercizio
	Efficienza termica	42% LHV	48,6 % LHV Yokkaichi 47,5 % LHV Suzuka	Primo periodo di esercizio
Affidabilità	Ore di esercizio	> 10.000 h	15.184 h Yokkaichi 10.553 h Suzuka	Al 15 agosto 2007 Test completati 15 mar. 2007
	Velocità di degradazione del voltaggio di cella	< 2 µV/h	< 8µV/h	

**General Motors**

La General Motors (Detroit, USA) ha presentato nel 2001 un sistema PEFC per usi stazionari da 5 kW alimentato a gas naturale, progettato sfruttando la tecnologia sviluppata nel quadro delle attività in atto per il settore della trazione.

GM sta lavorando con la Dow Chemical allo sviluppo di un impianto multiMW per fornire energia elettrica ad uno dei maggiori stabilimenti chimici della Dow, situato a Freeport nel Texas. L'impianto viene alimentato con l'idrogeno disponibile come co-prodotto dell'impianto. Questo idrogeno viene già oggi usato come combustibile per riscaldamento o rivenduto sul mercato dei gas tecnici.

Nel febbraio 2004 è stata avviata la prima fase del progetto che ha portato ad installare un primo modulo da 75 kW. La seconda fase si concluderà con l'installazione di ulteriori moduli fino ad un totale di 1 MW di potenza. Scopo di questa fase è quella di valutare le potenzialità della tecnologia integrata in uno stabilimento produttivo, in condizioni di funzionamento reali,



Sistema da 5,3 kW - GM



Moduli PEFC (300 kW) installati presso la Dow Chemical di Freeport, Texas

per migliorarne prestazioni tecniche ed ambientali.

Gli esiti di questa fase determineranno l'avvio dell'ultimo stadio del progetto che prevede l'installazione di 400 moduli in grado di generare 35 MW di energia, equivalenti al consumo di 25 mila abitazioni, ma pari a solo il 2% del consumo degli impianti texani della Dow. Al momento non ci sono informazioni sui risultati della dimostrazione.

## Hydrogenics Corp.

La società canadese Hydrogenics Corp. (Mississauga, Ontario) lavora nel settore dal 1995 e sviluppa prodotti per differenti mercati. Sono stati realizzati:

- sistemi modulari fino a 65 kW a idrogeno, per applicazioni stazionarie (HyPM<sup>®</sup>XR, da 4, 8 e 12 kW) e per trasporto (HyPM<sup>®</sup>LP)
- sistemi portatili di potenza compresa nell'intervallo 100 W - 1 kW (HyPort C)
- sistemi completi utilizzabili come generatori di potenza di back-up, in cui la cella è integrata con sistemi di generazione (per elettrolisi) ed accumulo di idrogeno. Un prototipo HyUSP da 25 kW era stato realizzato, all'interno di una collaborazione con General Motors, nel 2001.



### Specifiche sistema UPS (APC InfraStruXure)

Potenza	Multipli di 12 kW
Start-up PEFC	max 20 s, partenza a freddo
Combustibile	Idrogeno compresso
Dimensioni rack	207 x 109,2 x 59,7 cm
Peso con 1 modulo	400 kg (1 modulo 125 kg)
Autonomia	
10 kW @ 1 bombola	79 min (100 Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> )
30 kW @ 10 bombole	4 h 24 min (100 Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> )
Emissioni	Acqua e calore
Rumorosità @ 1 m	45 dB (stand by) 75 dB (pieno carico)

Hydrogenics, in collaborazione con la **Emerson Network Power**, ha messo a punto un generatore di potenza di back-up, che usa moduli HyPM<sup>®</sup>XR da 8 kW integrati con un sistema di accumulo di idrogeno. Un'unità di questo tipo è stata consegnata alla società di telecomunicazioni Bell Canada.

All'interno di un progetto finanziato dal DoE, Hydrogenics, sta lavorando con la **IdaTech**, allo sviluppo di un sistema completo da 50 kW, a gas naturale, per applicazioni stazionarie. Il sistema integra moduli PEFC realizzati da Hydrogenics, con unità di conversione del combustibile di tecnologia IdaTech. Il programma prevede la realizzazione di tre impianti prototipo che saranno installati in tre diversi siti (Sempra Utilities a San Diego, Puget Sound Energy nello stato di Washington e presso un hotel della catena Marriott).

Hydrogenics ha infine un contratto con la **Hitachi Zosen** (Osaka, J) per realizzare e commercializzare in Giappone unità per usi commerciali e residenziali. Obiettivo della società giapponese è quello di produrre un sistema di potenza compresa tra 10 kW e alcune centinaia di kW, con efficienza maggiore del 45% (HHV), se alimentato a idrogeno l'efficienza totale dovrebbe raggiungere l'86% ed il costo dell'unità porsi tra 500.000-600.000 ¥/kW (3.000-4.000 €/kW). L'idrogeno sarà prodotto per elettrolisi, con elettrolizzatori forniti dalla Hitachi Zosen, usando energia elettrica a basso costo disponibile nelle ore notturne.

Nel 2007 Hydrogenics ha introdotto stack con tecnologia migliorata. I nuovi prodotti (serie H2X<sup>®</sup> 200) operano a bassa pressione, risultano più compatti rispetto alle unità che li hanno preceduti e di costo inferiore (carico di platino ridotto del 25%).



Modulo HyPM<sup>®</sup> XR

Potenza	500 W
Dimensioni	533 x 330 x 406 mm
Peso	25 kg (escluso combustibile) 10 kg (sistema di accumulo)

### Specifiche HyPM<sup>®</sup>XR 12

Potenza max, kW	12 kW
Voltaggio, V (DC)	37 - 57
Corrente max, A	350
Dimensioni, cm	96 x 50 x 32
Volume, L	154
Massa, kg	90
Efficienza, %	55



HyPort C

Dal 2005 Hydrogenics ha in corso una collaborazione con l'**American Power Conversion** (APC, azienda leader nella fornitura di generatori di emergenza) indirizzata allo sviluppo di un sistema UPS a celle a combustibile per usi in data center di dimensioni medio-piccole. Il sistema è realizzato assemblando più moduli HyPM<sup>®</sup>XR, fino ad un massimo di 30 kW di potenza.

### HyPM XR DC Backup Power System

Potenza	8 o 16 kW
Corrente	300 A @ -48 Vdc
Temp. operativa	da -40 a +46°C
Combustibile	idrogeno (99,95%) Emissioni acqua a 27°C ≥ 108ml/min rumore 65 dBA @ 1,5 m



Stack H2X<sup>®</sup> 204 (2007)

Stack H2X<sup>®</sup> 506

## IdaTech

IdaTech (Bend, Oregon, USA), costituita nel 1996 come Northwest Power Systems, è impegnata nello sviluppo di sistemi per applicazioni residenziali, generazione di emergenza e sistemi portatili per usi civili e militari.

I prototipi finora realizzati impiegano stack PEFC acquisiti da diversi costruttori o realizzati in proprio e sistemi di trattamento del combustibile di tecnologia IdaTech. In passato accordi di fornitura erano stati sottoscritti con la DCH Technology (USA) e la Nuvera Fuel Cells Europe (I), al momento sono in corso collaborazioni con Ballard Power System e come citato in precedenza con Hydrogenics (Canada).

Il generatore portatile FCS 1200, usa ad esempio il modulo Ballard NEXA da 1,2 kW e un reformer IdaTech, in grado di convertire il metanolo in idrogeno (purezza > 99,5%, con meno di 3 ppm di CO). Del sistema è stata presentata anche una versione a GPL.

La società, nell'ambito di un accordo di collaborazione con la RWE (una delle maggiori società di servizi pubblici in Europa) e la Bosch Buderus Technik (produttrice di caldaie per riscaldamento), nel 2004 ha sviluppato un'unità CHP a gas naturale per il mercato residenziale, l'EtaGen™5 da 4,6 kW.

In parallelo con quest'attività sono state svolte ricerche che hanno portato a realizzare unità PEFC (moduli ElectraGen™ XRT da 3 e 5 kW), pensate come sistemi di emergenza per stazioni di telecomunicazioni. La società è in grado di produrre sistemi fino a 15 kW, ottenuti ponendo in parallelo più moduli. Queste unità hanno ottenuto la certificazione CE (European Conformity) e FC1 del CSA che ne consentono la distribuzione in Europa e Nord America.

Uno di questi sistemi (ElectraGen™5) è stato recentemente installato presso un sito della Telecom Italia, in Sicilia.



iGen™ 200 W

Idatech sviluppa inoltre unità PEFC portatili di potenza inferiori a 250 W, sia per usi commerciali ed industriali, che per applicazioni militari.

Nell'ambito di contratti con l'US Army (CERDEC) orientati allo sviluppo di unità compatte, facilmente trasportabili ed in grado di operare con combustibili liquidi, sono stati messi a punto alcuni prototipi da 200 W (12 Vdc) a metanolo/acqua. Il sistema, completo di reformer, unità di purificazione del combustibile e stack, è progettato per pesare meno di 10 kg. I prototipi finora realizzati usano PEFC a bassa pressione, raffreddate ad aria, realizzate dalla stessa IdaTech.

## Idemitsu Kosan Co.

Le attività della Idemitsu Kosan (Chiba, Giappone) sono incentrate allo sviluppo di sistemi CHP di potenza inferiore a 5 kW alimentati a cherosene o GPL, che la società prevede di introdurre sul mercato rispettivamente nel 2009 e nel 2007.

I primi test su un'unità di reforming del cherosene per un sistema PEFC da 5 kW sono iniziati nel 2003 presso una stazione di servizio della Keiko Apollo Co., a Anegasaki. L'anno successivo era stata avviata la dimostrazione di un sistema simile, alimentato con cherosene commerciale, che era stato collocato in un edificio residenziale di una raffineria a Hokkaido. Al termine della dimostrazione, dopo 3.572 ore di funzionamento, il sistema aveva generato 13.829 kWh di energia elettrica.

La società, con il contributo della **Corona Corporation**, ha realizzato unità per cogenerazione da 1 kW, sempre alimentate a cherosene. L'efficienza elettrica e l'efficienza totale misurate su un prototipo da 800 W risultavano del 36 % (LHV) e del 76%.

In parallelo, Idemitsu sta sviluppando sistemi da 1 kW alimentati a GPL. Nel quadro del *Large Scale Demonstration Fuel Cell Project* del NEF, nel periodo 2005-2007 sono state installate 123 unità di potenza 700 W presso abitazioni monofamiliari. Questi sistemi impiegano unità PEFC fornite dalla **Toshiba Fuel Cells Power Systems** (TFPCS).



Unità FCS 1200

Potenza	1 kW (48 VDC)
Combustibile	metanolo
Dimensioni	74 x 69 x 64 cm
Peso	77-84 kg
Temp. oper.	3-30 °C

### ElectraGen™5

Potenza AC	1-5 kW
Voltaggio, input	200-240 VCA @50-60 Hz
Voltaggio, output	Nominale -48 VDC
Combustibile	Idrogeno (99,95%)
Temperatura oper.	da -40°C a +50°C
Dimensioni	648 x 997 x 1345 mm
Peso	226 kg
Rumorosità	< 70 dB @ 1m
Certificazioni	CE, ANSI/CSA FC-1



Sistema CHP da 1 kW a cherosene

Potenza	0,8 kW (200 V AC)
Combustibile	cherosene
Efficienza elettrica	36 % LHV
Efficienza totale	76 % LHV
Dimensioni	77,5 x 46,8 x 76,4 cm

## Intelligent Energy

Intelligent Energy, fondata nel 2000 con sede a Londra e centri di ricerca in California e Nuovo Messico, produce sistemi basati sulla tecnologia PEFC che offrono soluzioni per diversi settori di mercato (generazione di potenza distribuita, generazione UPS, portatili per usi militari e trasporto).



Unità da 100 W  
per generazione remota

La società, che ha messo a punto una configurazione di sistema semplificata, ha in corso lo sviluppo di stack di potenza compresa nell'intervallo 50 W-75 kW, estremamente compatti, per i quali dichiara una densità di potenza dell'ordine di 2,5 kW/L.

Nel 2004 è stato realizzato un sistema portatile da 2 kW per usi militari, che è stato sperimentato nel quadro del *Foreign Comparative Test Program* del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti.



Sistema PEFC 2 kW per  
applicazioni industriali e militari

Intelligent Energy ha acquisito nell'aprile 2004 la **MesoFuel**, attiva nel settore dei sistemi di trattamento del combustibile. La collaborazione tra le due società ha portato allo sviluppo di fuel processor, con caratteristiche adatte all'alimentazione di sistemi PEFC ed in grado di produrre idrogeno da diversi combustibili (ammoniaca, etanolo, propano e cherosene). Sono stati costruiti prototipi multi-fuel compatti per celle fino 300 W (unità Meso) ed in collaborazione con la **Sasol**, una delle principali aziende chimiche del Sud Africa, è stato portato a termine lo sviluppo di un generatore di idrogeno (unità Hestia) per PEFC fino a 10 kW. Progettato per operare con diesel a basso tenore di zolfo, l'unità può essere modificata per funzionare con etanolo, biodiesel, ammoniaca e gas naturale.

### Generatore di idrogeno HESTIA Prototipo α da 9,2 kW

Idrogeno	7Nm <sup>3</sup> /h
Efficienza	60-70% (LHV)
Partenza a freddo	< 60 min
Combustibile	diesel (basso tenore S)
Gas prodotto	idrogeno > 99,9% CO < 0,5 ppm <sub>v</sub>
Volume sistema	300-700 L
Peso	100 kg



## NedStack

La NedStack (Arnhem, NL) sviluppa stack di potenza compresa nell'intervallo 2-10 kW per usi stazionari e nel trasporto e sta lavorando alla realizzazione di impianti da 120 kW, scalabili fino ad alcuni MW di potenza per usi residenziali ed applicazioni nel settore dell'industria chimica. La società è impegnata nello sviluppo di stack in grado di funzionare ad alta temperatura (150-180°C).

Nell'aprile 2007 è stata avviata la sperimentazione di un impianto di potenza 50 kW (potenza nominale 120 kW) presso un impianto chimico della Akzo Nobel a Delfzijl. Il modulo PEFC è costituito da 12 stack da 10 kW ed è alimentato con l'idrogeno ottenuto come sottoprodotto di un impianto cloro-soda. Il progetto, avviato nel 2004, è finanziato dal Ministero degli Affari Economici olandese attraverso il SenterNovem.



Impianto pilota installato da 50 kW presso la Akzo Nobel e modulo PEFC (12 stack da 10 kW)

## Nuvera Fuel Cells

La società Nuvera Fuel Cells (sedi in Stati Uniti ed Italia) è stata fondata nell'aprile 2000 dalla fusione della De Nora Fuel Cells (Milano), divisione della società De Nora attiva nello sviluppo di sistemi PEFC fin dal 1990 e dell'Epyx Corp. (società dell'Arthur D. Little specializzata in sistemi di trattamento del combustibile, Cambridge, Massachusetts). Al momento le azioni della compagnia sono detenute dalla Hess (società statunitense che opera nel settore della raffinazione del petrolio e del gas naturale, che ha rilevato la partecipazione dell'Arthur D. Little), dalla De Nora e dalla casa automobilistica Renault.

Per il mercato della generazione stazionaria, Nuvera realizza unità CHP a gas naturale (Avanti™) di potenza fino a 5 kW e sistemi a idrogeno da 120 kW (Forza™), di tipo modulare che possono essere usati come unità base di impianti di alcuni

### Specifiche AVANTI™

Potenza nominale	2,3 o 4,6 kW (AC)
Potenza termica	6,9 kW
Efficienza (HHV)	> 30%
Efficienza totale	75%
Combustibile	Gas naturale
Tempo di avviamento	120 min a freddo 3 0 min a caldo
Temperatura operat.	-20°C - 40 °C
Dimensioni	120 x 56 x 140 cm
Peso	400 kg
Intervallo manutenzione	500 ore
Emissioni	CO, NOx ,HC < 10 ppm



MW di potenza, per applicazioni industriali.

Sistemi residenziali sono stati sperimentati in Europa, Stati Uniti e Giappone. Moduli da 1 kW ad idrogeno sono stati installati al MIT Lincoln Laboratory, a Bedford (Massachusetts, USA), due unità da 4 kW a gas naturale hanno operato all'interno di una base della Guardia Costiera a Bristol (Rhode Island, USA), altre tre unità sono state provate in Giappone nel quadro del Millennium Program finanziato dal METI. Sistemi Avanti precommerciali saranno disponibili dal 2008.



Nel 2006 presso gli stabilimenti del gruppo SIAD/Rivoira di Osio Sopra (Bergamo) è divenuto operativo un laboratorio destinato alla sperimentazione in continuo di sistemi Nuvera.

A luglio 2006 un sistema Forza da 120 kW è entrato in funzione presso gli stabilimenti della Caffaro, società chimica con sede a Brescia. L'impianto è alimentato da idrogeno disponibile all'interno dello stabilimento come sottoprodotto della produzione del cloro. L'energia elettrica generata dalla cella a combustibile viene impiegata all'interno dell'azienda.



**Modulo Forza 120 kW (8 stack) presso il laboratorio di qualifica celle a combustibile Siad/Rivoira (Osio, BG)**

Nel 2007 un impianto dello stesso tipo è stato consegnato alla Sacré-Davey Innovations (North Vancouver, BC, Canada) nell'ambito dell'Integrated Waste Hydrogen Utilization Project promosso dal governo canadese. L'idrogeno, in questo caso, viene prodotto da un impianto elettrochimico della ERCO Worldwide. Il sistema è collocato presso una stazione di lavaggio auto della Easywash, alla quale fornisce energia elettrica e calore.

sia come generatore di potenza autonomo, che come vedremo, per la propulsione di veicoli industriali di tipo ibrido.

Tra i prodotti ora disponibili si ricorda, inoltre, il PowerFlow™, un sistema modulare da 5 kW, che può essere usato



**Unità Forza installata presso la Easywash**

## Plug Power

Plug Power (Latham, New York, USA) è stata costituita nel 1997 quale joint venture della DTE Energy, società del gruppo Detroit Edison e della Mechanical Technology Incorporated, una delle prime società coinvolte nello sviluppo di celle a combustibile.

Plug Power attualmente ha in corso accordi di collaborazione con Honda, Vaillant GmbH, BASF Fuel cell/PEMEAS, Elgelhard Corp. e Tyco. Nel febbraio 1999, la società aveva sottoscritto un accordo con la GE MicroGen, Inc. ed era stata costituita la GE Fuel Cell Systems (GEFCS), joint venture che deteneva i diritti per la distribuzione, installazione e fornitura di assistenza a livello mondiale dei suoi prodotti. A fine 2005 è stata annunciata la conclusione di questo accordo, sia per il limitato numero di sistemi distribuiti attraverso la GEFCS, sia soprattutto per cambiamenti della strategia di sviluppo di Plug Power, oggi finalizzati su prodotti per generazione remota e di emergenza piuttosto che su sistemi per usi residenziali, settore d'interesse della General Electric.

Nel 2003, Plug Power aveva acquisito H Power (Belleville, New Jersey, USA), compagnia impegnata fin dal 1989 nello sviluppo della tecnologia PEFC. Ricordiamo che H Power disponeva di una tecnologia adatta alla realizzazione di sistemi di potenza 35-500 W ad idrogeno per la generazione portatile e stava lavorando allo sviluppo di unità da 4,5 kW a gas naturale per usi residenziali. Recentemente ha acquisito le società canadesi Cellex Power Products e General Hydrogen Corporation società quest'ultima che sviluppava PEFC per la propulsione di forklift e di altri veicoli industriali impiegando stack della Ballard Power Systems, con la quale Plug Power prosegue la collaborazione.

Plug Power produce sistemi, di potenza inferiore a 5 kW, alimentati a gas naturale (GenSys) per applicazioni commerciali ed a idrogeno (GenCore) concepiti come sistemi di emergenza per società di servizi o attive nel campo delle telecomunicazioni. Dal 2001 sono state consegnate oltre 650 unità.

Le unità GenSys da 5 kW finora installate hanno accumulato in totale oltre un milione di ore di esercizio e generato più di 2,6 milioni di MWh di elettricità. Nel 2001 settantacinque sistemi di questo tipo erano stati forniti alla Long Island Power Authority (N.Y., USA), per produrre elettricità per utenze commerciali e residenze private. Successivamente la LIPA aveva acquistato altre unità.

Il *Residential PEM Demonstration Project* finanziato dal Dipartimento della Difesa USA, nel periodo 2004-2006, aveva portato ad installare presso sedi militari 91 unità di potenza da 1 a 5 kW prodotte da cinque diversi costruttori statunitensi, 64 dei quali realizzati da Plug Power. Nel corso del programma di prove condotte presso il Watervliet Arsenal (New York) i dieci impianti



Unità GenSys 5 kW installate presso la base dell'Air Force di Robins (Georgia, USA)

Sistema GenSys	
Potenza	2,5-5 kW <sub>e</sub> (3-9 kW <sub>term</sub> )
Voltaggio	120-240 Vac @ 60 Hz
Temperatura	- 17 / + 40 °C
Combustibile	Gas naturale o GPL
Emissioni	NO <sub>x</sub> < 1 ppm SO <sub>x</sub> < 1ppm Rumore < 60 dB @ 1 m
Installazione	Esterna
Connessione elettrica	In parallelo alla rete
Dimensioni	2,15 x 0,81 x 1,73 m

Sistema GenCore	
Potenza	0-5 kW <sub>e</sub> (9 kW <sub>term</sub> )
Voltaggio	da - 42 a - 56 Vdc (-48) da + 46 a +56 Vdc (+48) da + 25 a +27 Vdc (+24)
Temperatura	- 40 / + 46 °C
Combustibile	Idrogeno
Consumo combustibile	40 L/min a 3 kW 75 L/min a 5 kW
Emissioni	NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO < 1 ppm Acqua 2 litri/ora max Rumore < 60 dB @ 1 m
Dimensioni	1,12 x 0,66 x 0,61 m



Unità GenCore e modulo di accumulo idrogeno

installati hanno funzionato per oltre 80.000 ore, producendo circa 214.500 kWh di elettricità, con una disponibilità media del 94%.

Nel luglio 2006 è stata annunciata che la Telefónica Móviles, una delle due maggiori società fornitrici di reti wireless dell'America Latina adatterà unità GenCore, come sistemi di emergenza presso torri di trasmissione nell'area di Caracas. Questa serie di installazioni fa seguito al positivo completamento di un programma di prove che si è svolto presso uno dei siti della Telefonica Moviles. Il sistema GenCore aveva risposto bene a diverse interruzioni dell'alimentazione elettrica da rete, continuando a fornire energia e conservando la funzionalità ed operatività della torre di trasmissione nel corso di interruzioni dell'energia elettrica da rete causata da sovraccarichi e da fattori derivanti da condizioni meteorologiche.

Plug Power, con **BASF Fuel Cell** (in precedenza PEMEAS GmbH), ha sviluppato prototipi PEFC in grado di operare ad alta temperatura, con finanziamenti da parte del National Institute of Standards and Technology (NIST), della New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) e del Dipartimento dell'Energia (DoE). Quest'attività sta proseguendo all'interno del Progetto NextGenCell, finanziato congiuntamente dal DoE e dalla Commissione Europea nel quadro del 6PQ. Il progetto, coordinato da Vaillant e Plug Power, è finalizzato alla realizzazione e prova di un'unità CHP per usi domestici da 5 kW, con celle polimeriche capaci di operare a temperature di 160-180°C.

Infine, all'interno di un accordo con **Honda**, Plug Power sta lavorando alla messa a punto di stazioni di rifornimento ad uso domestico (HES, Home Energy Station). Il sistema Home Energy Station produce idrogeno da gas naturale per il rifornimento di autovetture ed è equipaggiato con celle a combustibile di tecnologia Plug Power in grado di fornire elettricità e calore all'abitazione. La HES di IV generazione, installata nella sede Honda di Torrance in California, risulta più compatta rispetto alle versioni precedenti; le dimensioni della stazione sono state ridotte di oltre il 70% rispetto alla versione presentata nel 2003.



HES I (Honda R&S Americans, Torrance, CA – Ott. 2003)



HES IV (Honda R&S Americans, Torrance, CA – Nov. 2007)

## Protonex Technology Corp. / Millennium Cell

Protonex (Southborough, Massachusetts, USA) sviluppa sistemi portatili a celle ad elettrolita polimerico per applicazioni civili e militari. La società realizza diverse serie di prodotti (10-100 W, 100-300 W e 300-500 W) che si differenziano per dimensioni dello stack, tipo di alimentazione e configurazione del balance-of-plant.

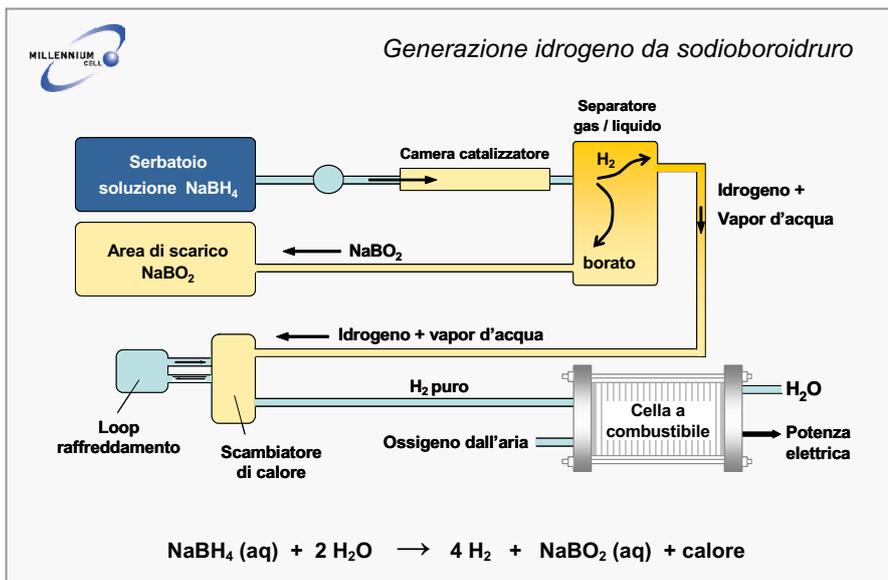
Per lo sviluppo dei vari prodotti ha stretto accordi di collaborazione con Millennium Cell (generatori da 30 W) e Parker-Hannifin (unità da 150 e 500 W). I primi generatori portatili da 150 e 250 W, sviluppati in collaborazione con Parker-Hannifin, erano stati presentati nel novembre 2004.

Protonex ha in corso collaborazioni con diverse branche ed agenzie delle Forze Armate statunitensi: Air Force Research Lab (AFRL), Army Research Office (ARO), Army Research Lab (ARL) e Special Operations Command (SOCOM).

La società, in collaborazione con Millennium Cell (Bothell, WA, USA) sta mettendo a punto unità portatili per l'Air Force USA. Si tratta di sistemi in grado di generare 30 W



Prototipi 150 e 500 W - Protonex / Parker-Hannifin



di energia elettrica in corrente continua, progettati per missioni fino a 72 ore di durata.

La cella è alimentata con idrogeno generato da idruri chimici (sodio boroidruro) attraverso un processo sviluppato dalla Millennium Cell (U.S. Patent 6.534.033 "System for Hydrogen Generation"). Occorre sottolineare che nel 2006 la Millennium Cell ha ricevuto finanziamenti (2,5 milioni di dollari) dal Dipartimento della Difesa per ottimizzare questa tecnologia.

Nel 2006 è stato realizzato un prototipo da 30 W di seconda generazione (ProPack 50), che è stato provato dall'Air Force Research Laboratory nel corso di esercitazioni militari, per valutarne le prestazioni in condizioni reali. Un sistema ProPack 50 con tre

ricariche di combustibile (HOD™, Hydrogen on Demand) genera la stessa potenza di 13 batterie del tipo BA 5590 attualmente in dotazione alle forze armate e consente notevoli risparmi in termini di peso e costi (riduzione rispettivamente del 60% e del 20%).



Prototipi 30 W (P1 e ProPack 50) – Protonex/Millennium Cell

### Confronto unità Protonex 30 W / Batteria BA5590

30 W, 72 h di missione	Sistema Protonex/MCEL	Batteria BA5590A/U
Configurazione	1 cella e 3 ricariche HOD	13 batterie
Peso del sistema (Incluso combustibile)	5,1 kg	13,3 kg
Volume	6 L	11 L
Costo totale sistema	793 \$	1040 \$

Sempre per usi militari, Protonex realizza unità da 150 W da impiegare come caricabatterie da campo.

Alla Fiera di Hannover del 2007 è stato infine presentato il Valta™ M250, generatore portatile di potenza 250 W adatto a diversi usi (potenza di back-up, generazione portatile, unità di potenza ausiliaria per battelli o veicoli ricreazionali), in cui la cella è integrata con un reformer a metanolo.

Potenza 250 W  
 Voltaggio 12-24 VDC  
 Combustibile 63/37 Metanolo/Acqua  
 Consumo 420 mL/h  
 Peso del sistema 25 kg  
 Dimensioni 64 cm x 24cm x 40 cm  
 Temperatura da -20°C a 45°C  
 Rumorosità <55 dbA a 1 m

### Protonex Valta™ M250



## ReliOn

ReliOn (in passato Avista Labs, Spokane, WA, USA) sta sviluppando unità di potenza 50 W - 5 kW in grado di fornire energia a utenze remote o utilizzabili come generatori di emergenza nel settore delle telecomunicazioni. La società adotta un'architettura modulare basata sull'impiego di cartucce autoumidificate e raffreddate ad aria, indipendenti fra loro, che in caso di malfunzionamento possono essere facilmente escluse e sostituite.

Le unità T-1000 e T-2000, realizzate nel 2006, forniscono da 600 W a 2 kW di potenza; la combinazione di più moduli consente di soddisfare richieste fino a 12 kW.

In Italia, la SGS Future (Cavalese, TN), in Trentino Alto Adige, ha installato unità dimostrative in tre diverse centrali Telecom (potenze 2 e 4 kW). Altre due unità (I-1000 da 2 kW) erano state fornite alla Wind Telecomunicazioni. Queste ultime, impiegate come sistema di generazione di potenza di backup presso una stazione di trasmissione per lo smistamento del traffico GSM-UMTS, consentivano fino a 12 ore di autonomia. La fase di sperimentazione, ormai conclusa, ha permesso di validare aspetti importanti quali la gestione del sistema, la sicurezza di esercizio e l'impatto ambientale dell'impianto. Sempre in Italia tre unità I-1000 sono state consegnate al CESI Ricerca per attività sperimentali.



**ReliOn T-2000™**

Potenza	0 - 2000 W
Voltaggio	24 o 48 VDC nominale
Combustibile	Idrogeno (99,95%)
Dimensioni	502 x 495x 597 mm
Peso	da 35 a 85 kg
Temp. operat.	0-46 °C



## Tokyo Gas

Tokyo Gas (Tokyo, J) ha immesso sul mercato giapponese due sistemi residenziali per cogenerazione da 1 kW, noti come LIFUEL™, realizzati rispettivamente in collaborazione con **Matsushita Electric Industrial** (nota con il marchio Panasonic) ed **Ebara Ballard**. All'interno del "Large-Scale Stationary Fuel Cell Demonstration Project" promosso da METI e NEF in totale entreranno in esercizio 520 unità LIFUEL™.



**Sistemi LIFUEL™ Matsushita ed Ebara Ballard**

Risultati esercizio sistemi LIFUEL™ Tokyo Gas (sett. 2005- mar. 2007)		Totale	Media
Durata esercizio		94.306 giorni	304 giorni/anno
Ore di produzione		1.381.612 h	14,7 h/giorno
Elettricità prodotta		971.5111 kWh	10,3 kWh/giorno
Energia elettrica fornita	Quantità	880.537 kWh	9,3 kWh/giorno
	Contributo	38 %	
Calore fornito	Quantità	1.264.238 kWh	13,4 kWh/giorno
	Contributo	75 %	
Risparmi energia primaria *	Quantità	952.718 kWh	10,1 kWh/giorno
	Rapporto	24 %	
Riduzione CO <sub>2</sub> **	Quantità	339.470 kg CO <sub>2</sub>	36 kg CO <sub>2</sub> /giorno
	Rapporto	37 %	

\* Confronto con sistema tradizionale con efficienza elettrica del 36,6 % (HHV) ed efficienza del bruciatore a gas del 78%

\*\* Confronto con sistema tradizionale con fattori di emissione di 0,69 kg-CO<sub>2</sub>/MJ (elettricità) e 0,0051 kg-CO<sub>2</sub>/MJ (gas di città a base di gas naturale)

Specifiche LIFUEL™		Matsushita	Ebara Ballard
Unità PEFC	Potenza max	1 kW	
	Efficienza elettrica	37% (LHV), 33% (HHV),	
	Efficienza termica	50% (LHV), 45% (HHV),	
	Temp. calore di recupero	> 60 °C	
	Combustibile	Gas di città	
	Dimensioni	80 x 37,5 x 90 cm	80 x 35 x 100 cm
	Peso	175 kg	153kg
	Rumorosità	43 dB	44 dB
Serbatoio acqua calda	Dimensioni	85x51x190 cm	85x53x185 cm
	Peso	140 kg	153 kg
	Capacità serbatoio	200 L	
	Bruciatore di back-up	49,3 kW	

Tokyo Gas al Fuel Cell Seminar 2007 ha presentato alcuni risultati ottenuti su unità provate all'interno del progetto. Un sistema forniva in media 9,3 kWh/giorno di elettricità e 13,4 kWh/ giorno di calore impiegando 32,6 kWh/giorno di energia primaria, contro i 42,7 kWh/giorno consumati da un sistema di tipo tradizionale. E' stato calcolato che l'introduzione di questi impianti su larga scala consentirebbe di ottenere risparmi nei consumi di energia primaria del 24%.

Per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica, un sistema LIFUEL™, rispetto ad un sistema tradizionale, permette una riduzione della CO<sub>2</sub> di 3,6 kg /giorno (37 %).

## UTC Power / Toshiba Fuel Cell Power Systems

L'UTC Power (in precedenza nota come UTC Fuel Cells o International Fuel Cells, South Windsor, USA), la prima società al mondo a produrre impianti commerciali con celle a combustibile (impianti PAFC da 200 kW per generazione on-site, PureCell™), aveva successivamente avviato lo sviluppo di sistemi PEFC per applicazioni residenziali.

UTC Power, nel 2000 aveva esteso la collaborazione in corso con la giapponese Toshiba Corp., riguardante lo sviluppo e la vendita in Giappone di impianti PAFC per cogenerazione on-site, alle celle di tipo polimerico e nel marzo 2001 era stata costituita la joint-venture Toshiba International Fuel Cells (TIFC), rivolta nello sviluppo di unità residenziali da 1 kW per il mercato giapponese. Questa collaborazione era stata rivista a fine 2004 quando Toshiba aveva acquisito la TIFC e costituito la **Toshiba Fuel Cell Power Systems** (TFCP, Yokohama, J), della quale è ora unica proprietaria; a quella data in Giappone, a fini dimostrativi, erano state consegnate oltre 40 unità.

Toshiba, per le PEFC per usi residenziali, prevede un avvio del mercato giapponese a partire dal 2008 e ha intenzione di supportare questa espansione portando la sua capacità produttiva a 1.000 unità/anno. Attualmente dispone di una linea di fabbricazione che le consente di produrre 20 unità al mese.

TFCP è tra le società che partecipano al *Large Scale Fuel Cell Demonstration Project* promosso dal METI, all'interno del quale nel periodo 2005-2006 sono entrati in esercizio 341 sistemi da 700 W alimentati a gas naturale o GPL, a questi andranno ad aggiungersi altre 200 unità.

Sistema PEFC TM1-B (TFCP, 2006)	
Potenza nominale	700 W (AC)
Efficienza (HHV)	> 32%
Efficienza totale	> 71%
Peso	125 kg
Combustibile	Gas naturale/GPL
Temp. calore di scarto	60°C
Tempo di start-up	< 60 min
Rumore	<42 dB
Modalità di funzionamento	Connesso alla rete



Sistema CHP a idrogeno	
Potenza nominale	700 W (AC)
Efficienza (HHV)	> 37%
Efficienza totale	> 77%
Combustibile	Idrogeno (99,99%)
Temp. calore di scarto	80°C
Tempo di start-up	<100 min
Modalità di funzionamento	Connesso alla rete
Dimensioni	101 x 40x 188 cm
Volume serbatoio acqua	150L

Toshiba sviluppa anche sistemi CHP da 1 kW ad idrogeno. La prima unità, installata nel 2004, forniva un'efficienza elettrica maggiore del 37% ed un'efficienza totale superiore al 77%. Sono stati in seguito realizzati prototipi ottimizzati, con un'efficienza elettrica del 45%. Questo tipo di sistemi sono progettati con caratteristiche adatte ad abitazioni private che dispongono di idrogeno o a stazioni di rifornimento.

Tornando alla UTC Power, ricordiamo che quest'ultima in passato aveva realizzato un prototipo da 5 kW, in grado di operare con gas naturale o propano. L'unità integrava un reformer basato sull'ossidazione parziale sviluppato dalla **Hydrogen Sources**, joint-venture tra UTC e Shell Hydrogen (Olanda). La società ha quindi avviato lo sviluppo del PureCell™ 5, sistema di potenza 5 kW concepito come generatore di potenza di back-up.

PureCell Model 5 (UTC Power)	
Potenza	5 kW
Voltaggio	48 v DC (nominale)
Efficienza (HHV)	> 41%
Combustibile	Idrogeno (99,99%)
	Consumo 0,1 g/s a 5 kW
Durata	535 x 432x 700 mm
Peso	100 kg
Rumore	63 dB @ 1 m



## Vaillant

La Vaillant GmbH Co. (Remscheid, Germania), uno dei principali produttori di apparecchi per riscaldamento domestico in Europa, dal 1999 collabora con Plug Power, per introdurre nel mercato europeo sistemi a gas naturale in grado di fornire energia elettrica e calore ad edifici ed aziende di piccole dimensioni. La società ha realizzato il sistema FCHA (Fuel Cell Heating Appliance), che fornisce energia elettrica per 4,6 kWe e calore per 7 kW; l'unità è affiancata da una caldaia a condensazione che genera ulteriori 28 kW<sub>term.</sub>

La prima unità Vaillant con certificazione CE (Conformità Europea) è stata installata, nel dicembre 2001, in un edificio a Gelsenkirchen (Germania), dove copriva il fabbisogno energetico di sette famiglie. Dopo 2.010 ore di funzionamento erano stati prodotti 5.000 kWh elettrici e 9.000 kWh termici.

Il progetto era finanziato da Vaillant, Ruhrgas AG, E.ON Engineering GmbH, ELE GmbH, EUS GmbH e dalla regione del Nord Reno-Westfalia. Nello stesso periodo altre unità erano entrate in esercizio ad Essen e Düsseldorf.



### Prototipo FCHA da 4,5 kWe

Specifiche obiettivo	
Potenza elettrica	4,6 kW
Potenza termica	7 kW
Efficienza elettrica	35 %
Efficienza totale	80%
Combustibile	Gas naturale
Vita utile	15 anni (80.000 ore)

1. Dispositivi di regolazione ed interfaccia di comunicazione
2. Inverter
3. Reformer
4. Stack PEFC
5. Controllo dell'umidificazione

A scopo dimostrativo alla fine del 2006 risultavano installate 60 unità. All'interno di un progetto finanziato dalla Comunità Europea (Progetto "European Virtual Fuel Cell Power Plants" concluso nel marzo 2005) rivolto alla creazione di una centrale virtuale di generazione distribuita, Vaillant e Plug Power, insieme ad istituzioni di ricerca e società fornitrici di energia, hanno messo in esercizio 31 sistemi FCHA interconnessi per via telematica ed eserciti attraverso un sistema di controllo centralizzato.



**Esempio di installazione - Oldenburg, Germania**

- Utenza condominiale (8 famiglie), 2 anni di esercizio
- 5.500 di funzionamento
- 10.100 kWh di energia elettrica prodotta
- Disponibilità 86%

Le prime sette unità erano state installate tra la fine del 2002 e gli inizi del 2003 in abitazioni site in Germania ed Olanda, successivamente sono entrati in esercizio altri 24 sistemi in Germania e Olanda, Portogallo e Spagna. Questi sistemi hanno accumulato 113.000 ore di funzionamento e prodotto circa 337 MWh di elettricità e 680 MWh termici. Approssimativamente il 90% dell'energia elettrica prodotta è stata utilizzata per coprire il fabbisogno dell'utenza presso la quale era installata ed il restante 10% immesso nella rete pubblica. Il sistema forniva inoltre circa un terzo del calore necessario all'edificio.

Il progetto ha consentito di acquisire indicazioni su eventuali problemi di gestione di impianti a celle a combustibile posti in rete e di verificare la loro affidabilità in condizioni di funzionamento reali.

Vaillant, Plug Power e BAFS Fuel Cell stanno lavorando (progetto "NextGenCell", accordo di collaborazione Unione Europea-USA) allo sviluppo di sistemi CHP in grado di funzionare a più alta temperatura (160-180°C contro gli attuali 75°), con caratteristiche quindi più idonee alla cogenerazione.

## Voller Energy

Voller Energy (Basingstoke, Hampshire, Regno Unito), fondata nel 2002, realizza sistemi portatili per usi commerciali e militari ed è una delle società leader in questo settore.

A giugno 2006 è stato presentato un sistema da 100 W (ABC, Automatic Battery Charger) di ultima generazione che può essere impiegato per alimentare piccoli dispositivi portatili (come ad es. iPod, lettori MP3), telefoni cellulari o semplicemente fungere da caricabatterie. Si tratta di una versione completamente rinnovata rispetto al prodotto realizzato in precedenza (VE100 v2). Il sistema può essere alimentato con idrogeno gassoso fornito da bombole di piccole dimensioni (a pressione di 1-3 bar) connesse esternamente o in alternativa da cartucce contenenti idruri metallici poste all'interno.

### Generatore Fuel Cell ABC

Potenza	70 W
Voltaggio	13.8 V
Temp. operativa	+5°C - +40°C
Dimensioni	38 x 30 x 20 cm
Peso	9 kg



Voller è impegnata da alcuni anni nello sviluppo di sistemi per il settore militare. Sono stati realizzati sistemi VE100M di potenza 100 W, con funzione di generatore mobile o di carica batterie. Le unità realizzate sono alimentate con idrogeno prodotto da idruri metallici.



**Generatore VE900M**  
Dimensioni 18,5 x 8,5 x 5 cm Peso 1 kg

Voller, all'interno del Programma *Future Integrated Soldier Technology* (FIST) promosso dal Ministero della Difesa britannico, ha in corso lo sviluppo di un caricabatterie non rintracciabile sia dal punto di vista termico che acustico, che opererà su diesel o JP-8, il combustibile ormai adottato dai vari settori delle forze armate negli Stati Uniti e in paesi NATO. Per il sistema di trattamento del combustibile, Voller usa una tecnologia basata su un processo di pirolisi sviluppata dalla Kat-Chem, società che ha acquisito nel febbraio 2005.

A settembre 2005 al DSEI (Defence Systems & Equipment International), mostra internazionale di tecnologie e sistemi per i settori militare, aerospaziale e della

sicurezza, che si è tenuta a Londra, è stato presentato un sistema (VE900M) estremamente compatto facilmente inseribile in una tasca.

Come accennato in precedenza la Voller, ha avviato un accordo con Ballard Power System, per la fornitura degli stack da integrare nell'unità Emerald che sarà disponibile a fine 2007 (costo previsto 30.000 \$) per il mercato dei veicoli ricreazionali.



### Unità Emerald Specifiche di progetto

Potenza elettrica	800 W
	12v o 24 V DC
Potenza termica	1.000 W a 65°C
Combustibile	GPL
Efficienza elettrica	25%
Peso	75 g
Dimensioni	49,5 x76x 56 cm
Certificazione	TÜV, CE

## Sistemi PEFC per usi residenziali - Programmi dimostrativi

### Giappone

In Giappone lo sviluppo delle celle ad elettrolita polimerico è iniziato nel 1992 all'interno di programmi promossi dal METI (Ministry of Economy, Trade and Industry). Nello specifico progetti dimostrativi di sistemi PEFC per usi residenziali erano stati avviati nel 2000 nel quadro del **Millennium Project**, coordinato dalla Japan Gas Association. Erano stati provati sistemi per cogenerazione da 1 kW, ottenuti da diversi costruttori. Scopo dell'attività era quello di raccogliere dati tecnici utili a stabilire codici e normative necessari per l'introduzione di sistemi ad elettrolita polimerico nel mercato giapponese.

Al progetto hanno partecipato Ebara Ballard, Sanyo Electric, Fuji Electric, Toshiba Fuel Cell Power System, Toyota Motor, Japan Gas Appliances Inspection Association, Matsushita Electric Works, Matsushita Electric Industrial, Mitsui, Mitsubishi Heavy Industries e Mitsubishi Electric.

Il governo giapponese successivamente ha avviato il **Large Scale Fuel Cell Demonstration Project (2005-2007)** promosso dal METI e coordinato dalla New Energy Foundation (NEF).



Unità PEFC presso i laboratori del Japan Gas Association

#### Large Scale Fuel Cell Demonstration Project - Installazioni 2005-2007

Operatore	Costruttore PEFC	No. sistemi			Totale
		FY 2005	FY 2006	FY 2007	
Tokyo Gas	Ebara Ballard	80	85	210	520
	Panasonic	70	75		
Osaka Gas	Panasonic	4	0	81	224
	Sanyo Electric	45	40		
	TFCP	14	40		
Nippon Oil	Sanyo Electric	134	226	396	831
	Ebara Ballard	-	75		
Japan Energy	TFCP	30	40	34	104
Idemitsu Kosan	TFCP	33	40	50	123
Kyushu Oil	TFCP	8	10	12	30
Taiyo Oil	TFCP	8	13	18	39
Toho Gas	Ebara Ballard	12	8	38	90
	Toyota Motors	-	24		
	Panasonic	-	8		
Saibu Gas	Ebara Ballard	10	5	13	33
	Panasonic	-	5		
Iwatani Internat.	TFCP	10	34	29	73
Cosmo Oil	TFCP	10	19	19	48
Kamata	TFCP	6	-	-	6
Showa Shell Sekiyu	TFCP	6	10	10	26
Hokkaido Gas	Ebara Ballard	-	10	10	20
Nihon Gas	TFCP	-	10	10	20
<b>TOTALE</b>		<b>480</b>	<b>777</b>	<b>930</b>	<b>2187</b>

Il progetto prevede la dimostrazione di sistemi PEFC da 1 kW in edifici commerciali e residenziali in diverse aree del Giappone. Nella prima fase del progetto le unità PEFC erano state fornite da Ebara Ballard, Panasonic (Matsushita Electric), Sanyo Electric e Toshiba Fuel Cell Power Systems, a queste si è aggiunta in seguito Toyota. I sistemi installati usano combustibili diversi (gas naturale, GPL, cherosene).

#### Numero di sistemi PEFC per costruttore

	Unità			
	2005	2006	2007	Totale
Sanyo	179	266	304	749
Ebara Ballard	102	183	271	556
TFCP	125	216	204	545
Panasonic	74	88	123	285
Toyota	0	24	28	52
<b>TOTALE</b>	<b>480</b>	<b>777</b>	<b>930</b>	<b>2187</b>

#### Numero di sistemi PEFC per combustibile

	Unità			
	2005	2006	2007	Totale
Gas naturale	235	303	355	891
GPL	245	399	424	1068
Cherosene	0	75	151	226
<b>TOTALE</b>	<b>480</b>	<b>777</b>	<b>930</b>	<b>2187</b>

A fine 2006 risultavano operative 1257 unità, alle quali andranno ad aggiungersi i 930 sistemi finanziati nell'anno fiscale 2007.

Il NEF per ciascuna unità nel 2005 forniva una sovvenzione di 6 milioni di yen (circa 38.400 €), sovvenzione che nel 2007, con un numero maggiore di unità installate si è ridotta a 3,5 milioni di yen (circa 22.400 €). In Giappone, i costi medi di fabbricazione sono oggi di circa 10 milioni di yen (64.000 €) ad unità, l'obiettivo è di arrivare a ridurre di un quinto tali costi nel 2008, e di raggiungere volumi di produzione di circa 10.000 unità/anno entro il 2010..

## Stati Uniti

Negli Stati Uniti il Dipartimento della Difesa attraverso l'US Army Engineer Research and Development Center e il Construction Engineering Research Laboratory (ERDC e CERL) promuove programmi dimostrativi riguardanti celle a combustibile per usi stazionari che hanno portato ad installare diverse unità PAFC e PEFC presso basi militari e sedi diplomatiche statunitensi.

Tra il 1994 ed il 1997 sono stati eserciti 30 impianti PureCell™ da 200 kW (noti in precedenza come PC25) della UTC Power e nel 2001 è stato avviato un nuovo progetto finalizzato alla dimostrazione di PEFC, che ha portato ad installare, in 56 siti militari, 91 sistemi di potenza 1-5 kW ottenuti da diversi costruttori (Plug Power, Idatech, ReliOn, Nuvera Fuel Cells e Ballard).

### Prestazioni flotta DoD - Impianti residenziali PEFC (Sett. 2007)

523.378	Ore di funzionamento totali
1.293.133	Energia totale prodotta, kWh
23,7%	Efficienza elettrica media
86%	Disponibilità

Il programma consente di trarre interessanti informazioni, sul funzionamento e sull'affidabilità di questi impianti in un intervallo di condizioni, climatiche e geografiche, diverse, utili a stimolare la penetrazione nel mercato delle celle a combustibile e la crescita della generazione distribuita, dimostrando tra l'altro la capacità di questi sistemi di essere utilizzati come generatori di potenza di back-up.

### DOD Residential Proton Exchange Membrane Fuel Cell Demonstration Programme - Progetti 2001- 2004

Fornitore	Sito	Combust.	Potenza (kW)	No. Unità	Cogen. Si/No	Avvio cella	Stato
<b>PROGETTI FY04</b>							
<b>Plug Power</b>	Alcorn State University, Lorman, MS	Gas naturale	5	1	Si	Feb 2006	Operativa
	Sito FAA, Sandersville, GA	Idrogeno	5	1	No	Giu 2006	Operativa
	Fort Hood, TX	Idrogeno	5	2	No	Giu 2006	Operativa
	Keflavick, Islanda	Idrogeno	5	1	No	Gen 2006	Operativa
	Muniz ANG, Portorico	Propano	5	1	Si	Lug 2006	Operativa
	Tyndall AFB, FL	Propano	5	1	Si	Ago 2006	Operativa
	U.S. Air Force Academy, Colorado Springs, CO	Gas naturale	5	1	Si	Feb 2006	Operativa
<b>ReliOn, Inc.</b>	Spokane Sector Depart. of Homeland Defense, WA	Idrogeno	3	1	No	Giu 2006	Operativa
	Spokane Sector Depart. of Homeland Defense, WA	Idrogeno	2	1	No	Giu 2006	Operativa
<b>Ballard</b>	Fort Devens, Ayer, MA	Idrogeno	1	2	No		Non installata
<b>Nuvera</b>	Fort Knox, KY	Gas naturale	4,6	1	Si	Giu 2006	Operativa
<b>PROGETTI FY03</b>							
<b>Plug Power</b>	Arizona Army National Guard, Mesa, AZ	Gas naturale	5	1	Si	Lug 2005	Operativa
	Camp Mabry Army National Guard Base, Austin, TX	Gas naturale	5	1	Si	Ott 2005	Operativa
	Fort Benning, GA	Idrogeno	5	1	Si		Installata
	Hill AFB, UT	Gas naturale	5	1	SI	Feb 2005	Demo Completata
	Keesler AFB, Biloxi, MS	Gas naturale	5	1	SI	Mar 2005	Demo Completata
	Los Angeles AFB, CA	Gas naturale	5	1	SI	Mag 2005	Operativa
	March ARB, Riverside, CA	Gas naturale	5	1	SI	Feb 2005	Operativa
	MCB Kaneohe Bay, HI	Propano	5	1	SI	Mar 2005	Demo Completata
	McEntire ANG, SC	Gas naturale	5	1	SI	Mar 2005	Demo Completata
	Montana Army National Guard, MT	Gas naturale	5	1	SI	Dic 2004	Demo Completata
	Schofield Barracks, HI	Propano	5	1	Si	Dic2004	Demo Completata
	Sierra Army Depot, Herlong, CA	Propano	5	1	Si	Mar 2005	Demo Completata
	U.S. Embassy, Londra UK	Gas naturale	5	1	Si	Apr 2006	Operativa
	US Army Reserve Center, Mesa, AZ	Gas naturale	5	1	No	Mar 2005	Demo Completata
<b>IdaTech</b>	US Army Reserve Center, Mesa, AZ	Gas naturale	5	1	No	Apr 2005	Demo Completata
	Fort A.P. Hill, VA	Propano	4,6	1	No	Giu 2005	Demo Completata
	Offutt Air Base, NE	Propano	4,6	1	No	Giu 2005	Demo Completata
	Offutt Air Base, NE	Gas naturale	4,6	1	No	Nov 2005	Demo Completata
<b>ReliOn</b>	Fort Lewis, WA	Idrogeno	1	4	No	Lug 2004	Demo Completata
	Fort Rucker, AL	Idrogeno	1	4	No		Non installata
	Gabreski Air National Guard, Westhampton, NY	Idrogeno	4	1	No	Dic 2004	Demo Completata
	US Antarctic Division, Christchurch, Nuova Zelanda	Idrogeno	1	2	No	Apr 2005	Demo Completata

(segue)

### DOD Residential Proton Exchange Membrane Fuel Cell Demonstration Programme - Progetti 2001- 2004

Fornitore	Sito	Combust.	Potenza (kW)	No. Unità	Cogen. Si/No	Avvio cella	Stato
<b>PROGETTI FY02</b>							
<b>Plug Power</b>	ERDC/CERL, Champaign, IL	Propano	5	1	Si	Gen 2006	Operativa
	Fort Belvoir, Alexandria, VA	Gas naturale	5	1	SI	Mar 2005	Operativa
	Fort Gordon, GA	Gas naturale	5	1	No	Giu 2004	Demo Completata
	Georgia Institute of Technology - ROTC, Atlanta, GA	Gas naturale	5	1	Si	Mar 2005	Operativa
	MCAS Cherry Point; NC	Propano	5	1	SI	Dice 2004	Demo Completata
	NCA&T University, Greensboro, NC	Gas naturale	5	1	SI	Apr 2003	Demo Completata
	Robins AFB, GA	Gas naturale	5	1	si	Apr 2003	Demo Completata
	Saratoga Springs NSU, Saratoga Springs, NY	Gas naturale	5	8	si	Apr 2003	Demo Completata
	Selfridge ANGB, MI	Gas naturale	5	2	si	Nov 2003	Demo Completata
	Shaw AFB, SC	Gas naturale	5	1	si	Mag 2003	Demo Completata
	State Dept - ICC, Washington DC	Idrogeno	5	1	No	Lug 2005	Operativa
	Stennis Space Center, MS	Propano	5	1	SI	Set 2004	Demo Completata
	West Point Military Academy, NY	Gas naturale	5	3	SI	Mag 2003	Demo Completata
<b>ReliOn</b>	McChord AFB, WA	Idrogeno	3	1	No	Apr2003	Demo Completata
<b>Nuvera</b>	USCG Aids to Navigation Tea, Bristol, RI	Gas naturale	5	2	No	Feb 2004	Demo Completata
<b>PROGETTI FY01</b>							
<b>Plug Power</b>	Barksdale AFB, Bossier City, LA	Gas naturale	5	1	No	Feb 2003	Demo Completata
	Brooks AFB, San Antonio, TX	Gas naturale	5	3	No	Feb 2003	Demo Completata
	Coast Guard Station New Orleans, Metairie, LA	Gas naturale	5	1	si	Nov 2003	Demo Completata
	Fort Bragg, NC	Gas naturale	5	1	No	Nov2002	Demo Completata
	Fort Jackson, Columbia, SC	Gas naturale	5	1	SI	Mar 2003	Demo Completata
	Fort McPherson, Atlanta, GA	Gas naturale	5	1	SI	Ott 2003	Demo Completata
	NAS Patuxent River, MD	Propano	5	1	SI	Gen 2004	Demo Completata
	NAS Patuxent River, MD	Gas naturale	5	1	SI	Gen 2004	Demo Completata
	Watervliet Arsenal, Albany, NY	Gas naturale	5	10	No	Gen 2002	Demo Completata
<b>ReliOn</b>	Geiger Field, Spokane, WA	Idrogeno	3	1	No	Mar 2002	Demo Completata



**Unità Plug Power da 5 kW  
Watervliet Arsenal, NY**



**Unità Nuvera 5 kW  
U.S. Coast Guard, Bristol, RI**



**Unità Relion 3 kW  
Spokane, WA**



**Unità idaTech 2 kW  
Fort A.P. Hill, VA**

## APPLICAZIONI NEL TRASPORTO

Per impieghi nel settore del trasporto dopo i primi prototipi realizzati con tecnologie diverse, le celle ad elettrolita polimerico sono quelle su cui si sono concentrati tutti i maggiori costruttori di autoveicoli. Le celle ad elettrolita polimerico grazie alle loro caratteristiche, prime fra tutte bassa temperatura operativa e rapida partenza a freddo, sono quelle che meglio soddisfano i requisiti richiesti dalla trazione. Le maggiori case automobilistiche hanno già realizzato, come vedremo meglio in seguito, diversi veicoli a celle a combustibile, restano tuttavia ancora da sviluppare alcuni aspetti della tecnologia, che si può considerare matura per la realizzazione di prototipi, ma non ancora per quanto riguarda la produzione di serie.

### I PROGRAMMI INTERNAZIONALI

Negli **Stati Uniti**, il Department of Energy (DoE) ha finanziato per diversi anni lo sviluppo di sistemi di propulsione con celle a combustibile all'interno del *Fuel Cells for Transportation Programme*. Le attività inizialmente erano dirette allo sviluppo di stack, di sistemi di trattamento del combustibile, nonché degli ausiliari del sistema (compressori, sistema di alimentazione, controlli, ecc.). Successivamente, a seguito della crescita d'interesse per l'idrogeno ed in risposta alle raccomandazioni di un nuovo Piano energetico nazionale, era stato varato l'*Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies (HFC&IT) Programme*, in cui le attività sulle celle a combustibile e sull'idrogeno risultano fortemente integrate.

Il programma vede la partecipazione delle maggiori industrie, organizzazioni di ricerca ed università statunitensi. Il DoE ha individuato una serie di obiettivi da raggiungere entro il 2015. Strategia ed obiettivi del programma sono illustrati nel "Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan", a cui si rimanda per maggiori dettagli.

Nel 2007 sono stati stanziati 195,8 milioni di dollari e per il 2008 la richiesta è stata di 213 milioni di dollari.

Le attività del programma HFC&IT sono svolte in stretta connessione con quelle del *FreedomCAR and Vehicle Technologies Program*, all'interno del quale opera la FreedomCar and Fuel Partnership.

Il FreedomCAR (Cooperative Automotive Research) era un programma di ricerca avviato nel 2002, da DoE e United States Council for Automotive Research, che rappresenta le tre principali case automobilistiche statunitensi (General Motors, DaimlerChrysler e Ford Motors), orientato allo sviluppo di tecnologie che consentano di realizzare mezzi di trasporto a basso impatto ambientale e in grado di ridurre i consumi d'energia. Nel 2003 la partnership FreedomCAR è stata estesa a aziende che operano nel settore energetico (BP America, Chevron Corp., Conoco-Phillips, Exxon Mobil Corp. e Shell Hydrogen) e si è costituita la FreedomCAR and Fuel Partnership.

Il FreedomCAR and Vehicle Technologies Program sostituisce il Programma PNGV (Partnership for a New Generation of

**SISTEMA INTEGRATO DA 80 kW ALIMENTATO A IDROGENO**  
Stato della tecnologia ed obiettivi DoE al 2010 e al 2015

	STATO 2005	2010	2015
Efficienza @ 25% potenza di picco, %	59	60	60
Efficienza @ potenza di picco, %	50	50	50
Densità di potenza, W/L	500	650	650
Potenza specifica, W/kg	470	650	650
Costo (incluso stoccaggio H <sub>2</sub> ), \$/kW *	110	45	30
Risposta nei transitori (10 - 90% potenza max), s	1,5	1	1
Tempo di avviamento a 50% potenza, s			
@ - 20 °C	20	30	30
@ + 20 °C	< 10	5	5
Energia di start up e shut down, MJ			
da - 20°C temperatura ambiente	7,5	5	5
da + 20°C temperatura ambiente	na	1	1
Durata con ciclaggio, h	~ 1.000	~ 5.000	~ 5.000
Partenza non assistita da, °C	- 20	- 40	- 40

\* Costi previsti per produzioni di 500.000 unità/anno.

**STACK DA 80 kW ALIMENTATO A IDROGENO**  
Stato della tecnologia ed obiettivi DoE al 2010 e al 2015

	STATO 2005	2010	2015
Densità di potenza, W/L	1,5	2,0	2,0
Potenza specifica, W/kg	1,4	2,0	2,0
Efficienza @ 25% potenza, %	65	65	65
Efficienza @ potenza di picco, %	55	55	55
Costo, \$/kW *	70	25	15
Durata con ciclaggio, h	~ 2.000	~ 5.000	~ 5.000
Risposta nei transitori (10 - 90% potenza max), s	1	1	1
Tempo di avviamento a 50% potenza, s			
@ - 20 °C	20	30	30
@ + 20 °C	< 10	5	5
Energia di start up e shut down, MJ			
da - 20°C temperatura ambiente	7,5	5	5
da + 20°C temperatura ambiente	na	1	1
Partenza non assistita da, °C	- 20	- 40	- 40

\* Costi previsti per produzioni di 500.000 stack/anno.

Vehicle), che aveva l'obiettivo di sviluppare e dimostrare, entro il 2004, la fattibilità tecnologica di veicoli a basso consumo (circa 34 km con un litro di carburante), mantenendo prestazioni e costi equivalenti a quelli dei veicoli convenzionali.

Per le diverse tecnologie sono stati stabiliti gli obiettivi da raggiungere al 2010 e al 2015 e nello specifico quelli relativi a veicoli a celle a combustibile a idrogeno, risultano comuni a quelli del programma HFC&IT. Nel programma sono inserite anche attività di sviluppo di tecnologie a basso impatto ambientale ed in grado di ridurre i consumi di energia (motori a combustione interna di tipo avanzato, motori ibridi gas/elettrico).

In **Giappone**, lo sviluppo di veicoli a idrogeno riceve pieno appoggio da parte del governo, attraverso il NEDO ed il METI (Ministry of Economy, Trade and Industry). Diretto da quest'ultimo e gestito dal Japan Automobile Research Institute (JARI) e dal Engineering Advancement Association of Japan (ENAA) è operativo il *Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project*.

All'interno del progetto otto case automobilistiche (Daimler AG, General Motors, Toyota, Hino, Honda, Mazda, Nissan e Suzuki) stanno effettuando prove su strada dei loro prototipi per acquisire informazioni utili a migliorare la tecnologia ed a promuoverne l'ingresso nel mercato. Nella prima fase del progetto, che si è conclusa nel 2005, nell'area di Tokyo-Kanagawa per l'alimentazione di questi veicoli erano state costruite 10 stazioni di servizio che fornivano idrogeno utilizzando diversi processi produttivi.

Il settore dei trasporti è riconosciuto dall'**Unione Europea** come uno dei settori sui quali agire per realizzare uno sviluppo sostenibile. Nel Libro Verde dell'Unione Europea "Una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura" del marzo 2006, che illustra le nuove realtà nel campo energetico con le quali ci si trova a confrontarsi, vengono suggerite diverse azioni da intraprendere a livello europeo.

Nel documento si ribadisce che una politica energetica europea che intenda garantire la competitività, la sicurezza dell'approvvigionamento e la protezione dell'ambiente deve concentrarsi tra l'altro su nuove politiche dei trasporti che riducano i consumi di energia migliorando l'efficienza dei veicoli e che sostituiscano gradualmente il petrolio con altri carburanti (biocarburanti, gas naturale, idrogeno, elettricità o altre fonti). Ricordiamo che la Commissione aveva proposto, quale obiettivo per il trasporto stradale, di sostituire entro l'anno 2020 il 20% dei carburanti fossili con carburanti alternativi (8% di biocarburanti, 10% di gas naturale e 2% di idrogeno), nel duplice intento di migliorare la sicurezza dell'approvvigionamento energetico e ridurre le emissioni di gas serra.

I progetti finanziati all'interno dei programmi comunitari, hanno riguardato finora non solo lo sviluppo della tecnologia di cella, ma anche la sua integrazione a bordo del veicolo; sono stati realizzate concept-car e prototipi di veicoli. Con finanziamenti europei sono in corso programmi che prevedono l'esercizio sperimentale di flotte di veicoli a idrogeno in diverse città europee. Nel Sesto Programma Quadro (6PQ, 2002-2006) i progetti sulle celle a combustibile rientravano nella priorità tematica "Sviluppo sostenibile, cambiamento globale ed ecosistemi" ed erano inseriti all'interno delle aree "Sistemi energetici sostenibili" e "Trasporto di superficie sostenibile".

L'Implementation Plan, elaborato nel 2006 nel quadro delle attività della Piattaforma Europea, nella sezione attinente ai veicoli a idrogeno e realizzazione delle relative infrastrutture di rifornimento, stabilisce le azioni da svolgere per raggiungere un livello tecnologico tale da consentire l'avvio di una produzione di serie a partire dal 2015. Vengono definiti gli obiettivi da conseguire per sistemi destinati alla propulsione di mezzi di trasporto su strada, ma anche per il trasporto ferroviario e marittimo. In quest'ultimo caso si prefigura l'impiego di sistemi APU basati su celle MCFC e SOFC.

## Obiettivi



**Sviluppo di sistemi di propulsione con celle a combustibile**, con l'obiettivo di ottenere:

- Sistemi di propulsione elettrici in grado di assicurare almeno 55 kW per 18 secondi e 30 kW in continuo, durata almeno 15 anni; costo del sistema 12 \$/kW.
- Sistemi con celle a combustibile (incluso sistema di stoccaggio idrogeno) con efficienza del 60%, potenza specifica di 325 W/kg e densità di potenza di 220 W/L; costo 45 \$/kW al 2010 e 30 \$/kW al 2015.

**Sviluppo di veicoli ad alta efficienza**, che operano con carburanti idrocarburi "puliti" alimentati con motori a combustione interna o con celle a combustibile, con l'obiettivo di ottenere:

- Sistemi con motori a combustione interna con efficienze del 45%, in grado di rispettare i limiti standard fissati per le emissioni.
- Sistemi con celle a combustibile (incluso unità di reforming) con efficienze del 45% in grado di rispettare i limiti standard fissati per le emissioni; costo 45 \$/kW al 2010 e 30 \$/kW nel 2015.

**Sviluppo di veicoli elettrici ibridi**, con l'obiettivo di ottenere:

- Sistemi di accumulo di energia, durata 15 anni a 300 Wh con potenza di scarica di 25 kW per 18 secondi; costo 20 \$/kW.

*Sono stati stabiliti inoltre obiettivi relativi al sistema di accumulo a bordo del veicolo e per le infrastrutture di distribuzione dell'idrogeno.*

**Sistemi PEFC per usi nel trasporto su strada - Obiettivi UE al 2015**  
(Fonte: HFP- Implementation Plan)

	Obiettivi al 2015	
	Sistema da 100 kW	Unità APU
<b>Efficienza, %</b>	> 40 <sup>a</sup>	35
<b>Costo, €/kW</b>	100 <sup>b</sup>	< 500
<b>Durata, h</b>	<b>Autovetture</b> 5.000	<b>Autovetture</b> 5.000
	<b>Autobus</b> 10.000	<b>Veicoli pesanti</b> 40.000

<sup>a</sup> Ciclo NEDC

<sup>b</sup> Costi previsti per produzioni di 150.000 sistemi/anno

## Esempi di sistemi PEFC per usi veicolari

### Ballard Power Systems

La Ballard Power Systems, che come abbiamo visto, è riconosciuta come la società leader nella tecnologia delle celle ad elettrolita polimerico, nel 1998 aveva formato un'alleanza strategica con DaimlerChrysler (ora Daimler AG) e Ford Motor Co. (le due società possedevano rispettivamente il 18% ed il 13% delle azioni Ballard). Nel corso degli anni questa alleanza è stata riorganizzata più volte e nel 2005 Ballard Power Systems ha ceduto la sua filiale tedesca di Nabern a Daimler e Ford, che hanno costituito la joint venture **NuCellSys**. Quest'ultima opera a stretto contatto con Ballard, che rimaneva responsabile dello sviluppo e costruzione degli stack, mentre Daimler e Ford si sarebbero occupate della realizzazione del drive train completo da integrare nel veicolo.

A novembre 2007 è stata, infine, annunciata il trasferimento a Daimler e Ford del settore di sviluppo relativo ai prodotti per usi "automotive"; presso gli stabilimenti Ballard sarà creata una nuova compagnia (50,1% Daimler, 30% Ford e 19,9% Ballard) nella quale le due case automobilistiche investiranno oltre 60 milioni di dollari.

Ballard nel 2005 aveva presentato una "roadmap" tecnologica che fissava gli obiettivi di costo e di prestazioni da raggiungere entro il 2010, da utilizzare per stabilire i progressi compiuti annualmente dalla sua tecnologia.

La società per applicazioni veicolari ha recentemente presentato l'unità Mark1100™ da 110 kW. Ballard realizza inoltre moduli (Mark9 SSL™) di potenza compresa tra 4 e 19 kW, con caratteristiche adatte sia al trasporto (es. propulsione di forklift) che ad usi stazionari.

La tecnologia Ballard è usata dai principali costruttori automobilistici impegnati nello sviluppo di prototipi di veicoli (oltre a Daimler e Ford, Volkswagen, Volvo, Yamaha e nella prima fase di sviluppo anche da General Motors, Nissan e Honda).



**Stack GM - 2001**  
Potenza: 102 kW  
Potenza di picco: 129 kW  
Densità di potenza: 1,75 kW/L

### Nuvera Fuel Cells

Nuvera sviluppa stack per applicazioni nel settore del trasporto da oltre 10 anni ed è arrivata a realizzare unità da 85 kW (Andromeda™), che raggiungono una densità di potenza di 1,3 kW/L. Lo stack opera senza umidificazione esterna dei gas, il che semplifica notevolmente il balance-of-plant del sistema da installare a bordo. Unità Nuvera sono attualmente utilizzate nei prototipi di FIAT e Renault.

Nuvera ha messo a punto sistemi a idrogeno per applicazioni su veicoli industriali (veicoli per miniere, forklift) e sta lavorando allo sviluppo di moduli (Forza™, 120 kW) per usi nel trasporto ferroviario (locomotive). L'evoluzione della tecnologia Nuvera sarà descritta in dettaglio nella sezione relativa alle attività svolte in Italia.

### Evoluzione tecnologia Ballard



**Mark 902**  
Potenza: 85 kW  
Dimensioni: 805 x 375 x 250 mm  
Peso: 96 kg Volume: 75 L



**Mark 1100**  
Potenza: 110 kW  
Dimensioni: 804 x 485 x 210 mm  
Peso: 120 kg Volume: 82 L



**Mark 9SSL**  
Potenza: 4 kW  
Dimensioni: 108 x 760 x 60 mm  
Peso: 7,2 kg

### Stato della tecnologia Ballard ed obiettivi della Roadmap al 2010

Caratteristiche	2005	2006	TARGET 2010
Densità di potenza, W/L	1,47	1,50	2,50
Costi, \$/kW (prod. 500.000 unità/anno)	73	65	30
Durata, ore	2.100	2.300	5.000
Start-up a freddo	-25°C in 90 s	-30 °C in 195 s	-30 °C in 30 s

### General Motors

La GM, parallelamente alla progettazione e realizzazione di veicoli a celle a combustibile, sta portando avanti attività di sviluppo stack.

L'ultimo sistema messo a punto genera 1,75 kW/L e si dimostra tra i migliori prodotti finora presentati. Lo stack eroga una potenza continua di 102 kW, con una potenza di picco di 129 kW, e produce una tensione in corrente continua compresa, a seconda del carico, tra 125 e 200 Volt.

Lo stack ha un ottimo comportamento nelle partenze a freddo, garantendo la piena potenza dopo soli 30 secondi anche a temperature di -20 °C: un fattore importante per garantire la compatibilità delle auto a celle a combustibile con le esigenze quotidiane.



**Andromeda II - 2004**  
Potenza: 85 kW (a bassa pressione)  
Potenza di picco: 100 kW  
Densità di potenza: 1,3 kW/L

## Honda Motor Co.

Honda, come altre case automobilistiche, ha in corso attività di sviluppo stack. I sistemi di tecnologia Honda, estremamente compatti, utilizzano piatti separatori metallici ottenuti per stampaggio ed una membrana elettrolita di tipo aromatico di nuova concezione, che consentono un'elevata conducibilità ed eccellenti prestazioni in un ampio intervallo di temperatura (da -20 a +95 °C).

A settembre 2006 è stato mostrato uno stack di ultima generazione, più compatto rispetto all'unità sviluppata in precedenza. Nello stack i gas di alimentazione e l'acqua prodotta fluiscono in senso verticale, anziché orizzontale, il che garantisce un miglior drenaggio dell'acqua e quindi prestazioni migliori. Lo stack raggiunge una potenza di 100 kW contro gli 85 kW dello sistema utilizzato in passato, con dimensioni che sono state ridotte del 20%. La nuova configurazione consente di integrare più facilmente il sistema nel tunnel centrale del veicolo.

## Hydrogenics

La società dispone di una serie di prodotti di potenza compresa fra 8 e 65 kW adatti per una ampia gamma di applicazioni nel settore del trasporto.

Unità Hydrogenics alimentano prototipi di autobus e veicoli commerciali ed industriali realizzati con finanziamenti ottenuti dal governo canadese o nell'ambito di collaborazioni industriali (General Motors Canada).

Hydrogenics è tra i partner del progetto HYCHAIN Mini-Trans, finanziato nel 6PQ della Commissione Europea, che prevede la sperimentazione di piccole flotte di veicoli I, tra cui 10 midi-bus ibridi alimentati con moduli HyPM 12.



Modulo HyPM12

## UTC Power

La UTC Power per l'azionamento di autovetture e di autobus ibridi ha realizzato sistemi da 75 kW. Per questi dichiara di aver raggiunto una densità di potenza di 1,5 kW/L a livello di stack e di 1,3 kW/L come moduli pronti per l'installazione sul veicolo. Sistemi di questo tipo sono stati montati su prototipi Hyundai, Nissan e su autobus Thor e Irisbus (IVECO).

Successivamente, nel quadro di una collaborazione con l'U.S. Army Tank-Automotive and Armaments Command (TACOM) del Dipartimento della Difesa statunitense e del Northeast Advanced Vehicle Consortium del Dipartimento del Trasporto è stato messo a punto un sistema da 120 kW, il PureMotion™. Il sistema opera a pressione prossima a quella ambiente, non richiede quindi l'uso di un compressore e questo rende il sistema più efficiente e silenzioso. Sistemi PureMotion™ 120 sono installati su autobus realizzati in collaborazioni con ISE Research, VanHool, AC Transit e Sunline Transit.

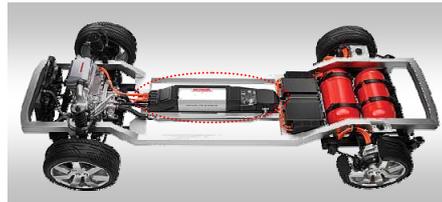
La società ha inoltre sviluppato e fornito alla BMW un'unità PEFC da 5 kW ad idrogeno, che è stata usata come unità APU (Auxiliary Power Unit) su una BMW serie 7, per fornire all'auto potenza per i vari circuiti elettrici a bordo.

Tra le società che hanno sviluppato unità per applicazioni nel trasporto ricordiamo ancora **Intelligent Energy**, il **CEA** (Commissariat à l'Energie Atomique) e costruttori automobilistici come **Nissan** e **Toyota**.



**Unità PEFC 2005**  
Potenza: 85 kW  
Densità di potenza: 1,5 kW/L

**Unità PEFC 2006**  
Potenza: 100 kW



Layout della HONDA FCX

### Specifiche moduli di potenza HyPM Hydrogenics

	HyPM 8	HyPM 12	HyPM 16	HyPM 65
<b>Potenza max, kW</b>	8,5	13	17	66
<b>Voltaggio, V</b>	25-36	37-58	48-72	215-300
<b>Corrente max, A</b>	350	350	350	310
<b>Volume, L</b>	129	148	170	365
<b>Peso, kg</b>	93	98	110	320
<b>Efficienza di picco, %</b>				> 55
<b>Pressione dello stack, kPa</b>				< 125
<b>Temperatura operativa, °C</b>				10-40



**Stack UTC Fuel Cells**  
Potenza: 75 kW  
Densità di potenza: 1,5 kW/L



**Sistema PureMotion™120**  
Potenza: 120 kW  
Dimensioni: 1030 x 1490 x 1177 mm

## I PROGRAMMI DEI COSTRUTTORI AUTOMOBILISTICI

Tutte le maggiori case automobilistiche sono impegnate nello sviluppo di prototipi di veicoli con celle a combustibile stimulate del fatto che questa tecnologia in futuro sarà certamente favorita dalle sempre più stringenti normative emesse in favore dell'ambiente e dalla necessità di contenere i consumi energetici. Le diverse aziende stanno impegnando notevoli risorse nella realizzazione di prototipi dimostrativi, basti pensare che Daimler e General Motors singolarmente hanno investito negli ultimi anni oltre un miliardo di dollari. Data l'entità degli investimenti ed i tempi lunghi necessari per un ritorno di capitale, la strategia dei grandi costruttori è stata, soprattutto nella prima fase, quella di coalizzarsi per dividere i costi di ricerca e sviluppo.

A parte le case automobilistiche (GM, Honda, Nissan e Toyota) che hanno iniziato a sviluppare in proprio celle a combustibile, per non perdere competenze tecnologiche su quello che è il componente chiave del veicolo, altre case hanno accordi di fornitura con i diversi costruttori di stack; la tecnologia maggiormente utilizzata rimane ancora quella della Ballard Power Systems.

*Tecnologie di stack utilizzate dalle principali case automobilistiche*

Costruttore	Tecnologia di stack
Daimler AG	Ballard Power Systems
Ford Motor Co.	Ballard Power Systems
General Motors Co./Opel	General Motors
Honda Motors Co.	Ballard Power Systems
Hyundai	UTC Fuel Cells
Madza	Ballard Power Systems
Nissan	Ballard Power Systems UTC Fuel Cells
PSA/Peugeot	Nuvera Fuel Cells CEA
Suzuki	General Motors
Toyota Motor Corp.	Toyota
FIAT	Nuvera Fuel Cells UTC Fuel Cells

### Daimler AG

Il Centro Ricerche della Daimler AG (in precedenza DaimlerChrysler) ha riconosciuto le potenzialità di questa tecnologia con largo anticipo iniziando nel 1991 a lavorare allo sviluppo di veicoli con celle a combustibile. La collaborazione con la Ballard Power Systems ha portato a realizzare diversi prototipi di autovetture ed autobus. Dall'introduzione nel 1994 della NECAR 1

<p><b>1994 - NECAR 1</b></p>  <p>Potenza: 50 kW (12 stack) Autonomia: 130 km Velocità max.: 90 km/h Combustibile: idrogeno (300 bar)</p>	<p><b>2000 - NECAR 5</b></p>  <p>Potenza: 75 kW (12 stack) Autonomia: 450 km Velocità max.: 150 km/h Combustibile: metanolo</p>
<p><b>1996 - NECAR 2</b></p>  <p>Potenza: 50 kW (2 stack) Autonomia: 250 km Velocità max.: 110 km/h Combustibile: idrogeno (250 bar)</p>	<p><b>2000 - NECAR 4 Avanzata</b></p>  <p>Potenza: 75 kW Autonomia: 200 km Velocità max.: 145 km/h Combustibile: idrogeno (350 bar)</p>
<p><b>1997 - NECAR 3</b></p>  <p>Potenza: 50 kW Autonomia: 400 km Velocità max.: 120 km/h Combustibile: metanolo</p>	<p><b>2001 - NECAR 5.2</b></p>  <p>Potenza: 75 kW Autonomia: 480 km Velocità max.: 145 km/h Combustibile: metanolo</p>
<p><b>1999 - NECAR 4</b></p>  <p>Potenza: 70 kW Autonomia: 450 km Velocità max.: 145 km/h Combustibile: idrogeno liquido</p>	<p><b>2002 - F-Cell (1ª generazione)</b></p>  <p>Potenza: 72 kW stack - batteria Autonomia: 150 km Velocità max.: 145 km/h Combustibile: idrogeno (350 bar)</p>

(New Electric CAR), un furgone in cui le celle a combustibile occupavano praticamente l'intero spazio destinato alle merci, la società ha compiuto notevoli progressi. Oggi oltre 100 veicoli Daimler, tra vetture, autobus e veicoli commerciali, stanno circolando sulle strade in Europa, Stati Uniti, Giappone, Cina, Singapore ed Australia. Due vetture F-Cell di recente sono state consegnate rispettivamente al Wayne State University Police Department di Detroit (Michigan) e ai Vigili del Fuoco del Sacramento Metropolitan Fire District.

Nel corso degli anni i ricercatori impegnati nelle attività sono riusciti a ridurre significativamente le dimensioni ed il peso del sistema di propulsione, migliorandone contemporaneamente le prestazioni. Nella Mercedes-Benz F-Cell, l'intero sistema di propulsione a celle a combustibile è alloggiato all'interno della struttura del pianale. Il motore elettrico sviluppa una potenza di 65 kW. La vettura alimentata a idrogeno compresso (350 bar) presenta un'autonomia di circa 150 chilometri. Il tempo di accelerazione da 0 a 100 km/h è di circa 16 secondi e l'auto è in grado di raggiungere una velocità massima di circa 140 km/h.

A partire dal 2004 sessanta di queste vetture sono state affidate a utenti che le stanno sperimentando su strada negli Stati Uniti (California e Michigan), a Berlino, Tokyo e Singapore, nelle più diverse condizioni d'impiego. A ottobre 2007 la flotta di F-Cell in totale aveva percorso oltre 1.500.000 chilometri e fatto registrare 45.000 ore di esercizio. Allo scopo di acquisire informazioni sul funzionamento del veicolo utili per futuri sviluppi, le autovetture sono dotate di un sistema di acquisizione dati che registra tutti i parametri rilevanti dello stack e del veicolo (voltage di cella, corrente, velocità di marcia, condizioni climatiche, ecc) e li trasmette via radio ad un server centrale per l'analisi.

Nel corso della sperimentazione sono stati acquisiti anche dati sul consumo dei veicoli. Le prove sono state condotte sia da gruppi interni alla Daimler che da organizzazioni esterne, tra cui l'EPA (Environmental Protection Agency), DoE e JARI (Japan Automobile Research Institute). I consumi di idrogeno, valutati su cicli di guida standard (NEDC, UDDC, 10-15 mode, HWFET), sono risultati equivalenti a 2,8-3,6 litri di gasolio per 100 chilometri.



**F-Cell, 2004**  
Potenza: 72 kW  
Autonomia: 177 km  
Velocità max.: 140 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)  
Batteria: NiMH



**F600 HYGENIUS, 2005**  
Potenza: 66 kW  
Autonomia: > 400 km  
Velocità max.: 174 km/h  
Combustibile: idrogeno (700 bar)  
Batteria: Li-ione



**F-Cell Classe B (in sviluppo)**  
Potenza: 80 kW  
Autonomia: 400 km  
Velocità max.: 170 km/h  
Combustibile: idrogeno (700 bar)  
Batteria: Li-ione (Mn)

Nel 2005, Daimler ha presentato una vettura sperimentale la F600 HYGENIUS progettata esclusivamente per la propulsione con celle a combustibile. La vettura utilizza uno stack di nuova concezione, le cui dimensioni sono state ridotte di circa il 40% rispetto a quelle dello stack usato in precedenza, ed un nuovo sistema di umidificazione a fibre cave che consente un migliore avviamento a freddo. Motorizzata con un sistema di potenza 85 kW (115 CV), la vettura percorre più di 400 chilometri con un pieno di idrogeno. Quest'ultimo è accumulato in serbatoi a 700 bar. La vettura, già in grado di circolare su strada, è attualmente in fase di prova sia su pista che su banco a rulli, al fine di ottimizzarne le prestazioni.

La F600 è progettata in modo che il sistema PEFC non si limiti a fornire energia per la propulsione della vettura, ma possa essere utilizzato anche come generatore di potenza mobile, per alimentare diversi dispositivi elettrici a 110/220 Volt. La potenza elettrica del veicolo pari a 66 kW è infatti sufficiente per fornire elettricità a più di un'abitazione.

Dal 2005 Daimler sta lavorando alla F-Cell di prossima generazione che sarà basata su una Mercedes-Benz Classe B. La produzione in piccola serie di quest'auto sarà avviata nel 2010. Nel veicolo saranno perfezionati tutti i componenti del sistema per aumentarne affidabilità e durata ed apportate modifiche per migliorare l'autonomia e la capacità di avviamento a freddo, riprendendo diverse innovazioni introdotte nella HYGENIUS. Nella F-Cell Classe B viene adottato uno stack ancora più evoluto, compatto e efficiente. Il motore elettrico sviluppa una potenza di punta di 100 kW/136 CV ed una coppia massima di 320 Nm. Ciò assicura alla F-Cell Classe B una buona dinamica di marcia, superiore a quella di un modello a benzina da 2 litri. Il propulsore a celle a combustibile consuma l'equivalente di 2,9 litri di gasolio per 100 chilometri.

Daimler per l'alimentazione dei suoi veicoli nelle fasi di sviluppo iniziali ha valutato diverse soluzioni, oltre a idrogeno immagazzinato direttamente a bordo in forma liquida, o compresso in bombole, ha analizzato la possibilità di produrlo da sodio boridruro o di ottenerlo attraverso reforming da combustibili liquidi, soluzioni in seguito abbandonate.

Daimler aveva dimostrato la possibilità di produrre l'idrogeno a bordo del veicolo a partire da metanolo nella Nekar 3 (1997) e Nekar 5 (2001). Nel 2002, quest'ultima ha attraversato gli Stati Uniti, da San Francisco a Washington, percorrendo 5.250 chilometri ad una media di 61,7 km/h, e viaggiando per oltre 1.200 km ad altitudini superiore ai 1800 metri sul livello del mare, in

#### 2000 - Jeep Commander 2



Potenza: celle 50 kW /batteria NiMH  
Autonomia: 190 km  
Combustibile: metanolo



#### 2001 - Natrium (Concept car)



Potenza: celle 50 kW /batteria  
Autonomia: 500 km  
Velocità max: 129 km/h  
Combustibile: idrogeno da NaBH<sub>4</sub>



condizioni di temperatura che variavano da -1 °C a 35 °C. Scopo del test è stato quello di provare i limiti del veicolo in situazioni operative reali.

A metanolo era alimentata anche la Jeep Commander 2, uno sport utility vehicle (SUV) presentato nel 2000.

Le attività Daimler sono rivolte anche allo sviluppo di autobus per il trasporto pubblico e di veicoli commerciali. Relativamente a questi ultimi, un veicolo Mercedes-Benz Sprinter azionato con celle a combustibile era stato affidato nel 2001 ad una società di consegne di Amburgo, la

Hermes Versand Service, per provarlo nelle normali operazioni di consegna. Nel periodo in cui è rimasto in esercizio (settembre 2001-giugno 2003) il veicolo ha percorso oltre 28.000 chilometri ed è stato impiegato per rifornire oltre 7.000 clienti.

E' stata in seguito avviata (2003) una collaborazione con la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) e la società UPS per provare uno Sprinter van e una vettura F-Cell, come veicoli per le consegne espresse a Ann Arbor, nel Michigan, presso il National Vehicle and Fuel Emissions Laboratory dell'EPA e nell'area di Detroit.

Il primo autobus con celle a combustibile alimentato a idrogeno (NEBUS, New Electric Bus), costruito dalla Daimler in collaborazione con Ballard, risale al maggio 1997. Con una potenza erogata di 250 kW, il veicolo raggiungeva una velocità massima di 80 km/h e aveva un'autonomia di 250 chilometri.

Il NEBUS nel periodo di prova era riuscito a dimostrare le sue eccellenti capacità operative come mezzo di trasporto urbano in varie città. Nel agosto 1999 ha prestato servizio ad Oslo, nell'ambito di una collaborazione con la Greater Oslo Transit Authority e la Norsk Hydro, aziende che dal 1994 stavano valutando la possibilità di utilizzare idrogeno per l'alimentazione di mezzi di trasporto pubblici. Altre dimostrazioni sono avvenute ad Amburgo, Perth, Melbourne, Città del Messico e Sacramento.



**Sprinter van (vers. 2003)**  
Potenza: celle 75 kW /batteria  
Autonomia: 150 km  
Velocità max: 120 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)



**Citaro FC bus - 1ª generaz. 2003-07**

Potenza: 200 kW  
Autonomia: 200 km  
Velocità max: 80 km/h  
Combustibile: Idrogeno (350 bar)

**Citaro FC bus - 2ª generaz. 2008-09**

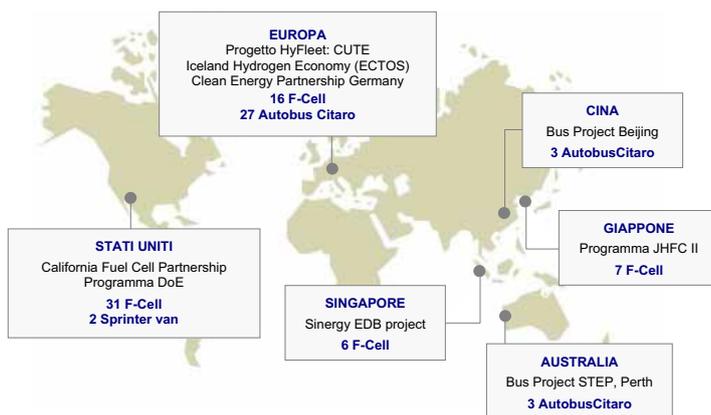
Potenza: 160 kW cella -120 kW batteria  
Autonomia: 250 km  
Velocità max: 80 km/h  
Combustibile: Idrogeno (350 bar)

I buoni risultati ottenuti con questo prototipo avevano portato alla realizzazione di un nuovo autobus, basato sul modello Mercedes Benz Citaro, sviluppato ancora in collaborazione con Ballard. In questo veicolo il sistema PEFC, dotato di una potenza di 200 kW, ed i serbatoi di idrogeno compresso a 350 bar sono posti sul tetto. Il motore elettrico e la trasmissione automatica sono invece collocati sul retro della vettura. A partire da maggio 2003, 36 autobus Daimler sono stati consegnati in dieci grandi

città europee, a Pechino (Cina) e Perth (Australia). Ad ottobre 2007, questa flotta di autobus aveva percorso circa 1,9 milioni di chilometri accumulando 126.000 ore di esercizio.

La società sta operando su più fronti per portare in circolazione su strade pubbliche veicoli a celle combustibile. La sperimentazione su scala mondiale dei vari prototipi, effettuata nell'ambito di diversi progetti di cooperazione e sviluppo, sta dimostrando che la tecnologia funziona in modo estremamente affidabile nelle condizioni di utilizzo più diverse. Le attività ed i risultati delle prove condotte all'interno di questi progetti dimostrativi (Progetti HyFleet: CUTE, JHFC, ecc) sono descritti in altra sezione del documento.

Daimler ha dichiarato che prevede di immettere veicoli sul mercato tra il 2012 ed il 2015.



## Ford Motor Company

La Ford Motor Co. è impegnata nello sviluppo di autovetture alimentate ad idrogeno dal 1994 ed attualmente sta operando nel quadro di diversi progetti dimostrativi in Stati Uniti, Canada ed Europa. Ford è proprietaria, con Daimler, della NuCellSys.

La società ha presentato il primo prototipo di veicolo a celle a combustibile, la P2000 FCV, al North American International

**1999 - Ford P2000 (concept car)**  
Potenza: 60 kW (3 stack Mark700)  
Autonomia: 160 km  
Combustibile: Idrogeno





**2000 - Focus FC5**  
 Potenza: 75 kW (Ballard Mark900)  
 Autonomia:  
 Velocità max: 128 km/h  
 Combustibile: metanolo



**2001- Focus FCV**  
 Potenza: 75 kW (Ballard Mark900)  
 Autonomia: 160 km  
 Velocità max: 128 km/h  
 Combustibile: idrogeno (350 bar)



**2002- Focus FCEV Hybrid**  
 Potenza: 68 kW (85 kW Ballard Mark902)  
 batteria NiMH (Sanyo 216 V)  
 Autonomia: 260-320 km  
 Velocità max: 128 km/h  
 Combustibile: idrogeno (350 bar)

902, che fornisce una potenza massima di 68 kW, ed un pacco batterie (Ni-idruri metallici) da 216 V. Nella maggior parte delle modalità di guida, lo stack costituisce la sola fonte di energia per la propulsione. Nel caso in cui venisse richiesta ulteriore potenza, la batteria, che è utilizzata per la fase di avviamento dell'intero sistema, fornisce ulteriori 18 kW. Lo stack è collocato al di sotto dei sedili, mentre il motore elettrico ed il sistema di controllo, compreso il sistema di recupero dell'energia sono posizionati nel vano motore. L'idrogeno compresso a 350 bar, assicura al veicolo un'autonomia di oltre 300 km. Il serbatoio realizzato dalla canadese Dynetek Industries Ltd., contiene 4 kg d'idrogeno, equivalenti all'energia prodotta da circa 15 litri di benzina.

Focus FCEV Hybrid rappresenta il primo approccio di Ford alla produzione di serie di auto a celle a combustibile. Flotte di Focus FCEV, per un totale di 30 vetture, stanno partecipando a test dimostrativi in Canada, Stati Uniti e Germania, nel quadro di programmi volti a promuovere lo sviluppo di tecnologie basate sull'idrogeno.

In Canada, cinque vetture Ford Focus sono in circolazione nella British Columbia, nel quadro delle attività del Vancouver Fuel Cell Vehicle Program che si concluderà nel marzo del 2008. Il programma, nato dalla collaborazione tra Ford e le autorità canadesi, ha lo scopo di informare il pubblico sulla validità concreta di questa nuova tecnologia, e al tempo stesso di farlo familiarizzare con aspetti pratici come il rifornimento di idrogeno o il tipo di guida richiesta da una vettura alimentata con celle a combustibile.

Negli Stati Uniti, oltre ai tre veicoli sperimentati presso il laboratorio di ricerca Ford di Dearborn (Michigan); cinque veicoli sono stati messi a disposizione della California Fuel Cell Partnership e stanno circolando nell'area di Sacramento e cinque veicoli sono stati consegnati rispettivamente in Florida ed in Michigan. Sempre in California tre Focus FCEV sono state affidate a tre organizzazioni locali (California Air Resources Board, California Department of General Services e California Energy Commission).

In Europa, a Berlino stanno circolando tre veicoli, nell'ambito della Clean Energy Partnership (CEP), un'iniziativa sostenuta dal governo federale tedesco per promuovere l'uso dell'idrogeno nel trasporto.



**2006 - Ford Explorer**  
 Potenza: 60kW (stack Ballard)  
 50 kW Batteria NiMH  
 Autonomia: 560 km  
 Combustibile: idrogeno (700 bar)



**2007 - Ford Edge**  
 Ibrido batterie Li-ione/PEFC  
 Autonomia: 360 km  
 Velocità max: ~140 km/h  
 Combustibile: idrogeno (350 bar)

Auto Show a Detroit nel gennaio 1999. Si trattava di una vettura alimentata ad idrogeno, che impiegava un sistema Ballard da 60 kW.

A questa vettura era seguita (gennaio 2000) la Focus FC5 che a differenza del prototipo precedente utilizzava uno stack Ballard da 75 kW alimentato a metanolo. Con la potenza elettrica generata da quest'unità, l'auto forniva un'ottima efficienza, unitamente a velocità e prestazioni simili a quelle dell'analogo modello diesel.

Nell'ottobre dello stesso anno al SEMA (Speciality Equipment Market Association) era stata esposta la versione ad idrogeno della Focus FCV, auto con la quale ha partecipato alle prove organizzate dalla California Fuel Cell Partnership (CaFCP).

Risultato di queste attività di ricerca e sviluppo è la Focus FCEV ibrida realizzata nel 2002. Il veicolo utilizza uno stack Ballard Mark



A fine 2006, è stato presentato un nuovo veicolo, l'Explorer, realizzato nell'ambito di attività finanziate dal DoE. Il veicolo utilizza un serbatoio capace di contenere 10 kg di idrogeno (700 bar), che gli consente un'elevata autonomia (560 km). Il serbatoio occupa lo spazio utilizzato nel modello in produzione dal sistema di trasmissione automatico a 6 marce, il veicolo mantiene quindi abitabilità e capacità di carico del modello tradizionale.

L'ultimo prototipo realizzato, la Ford Edge, è un veicolo ibrido in cui la cella viene usata per la ricarica delle batterie e per aumentare l'autonomia del mezzo.

La commercializzazione di veicoli alimentati a celle a combustibile, secondo quanto asserito dalla società, con si concretizzerà prima del 2015.

## General Motors / Opel

La General Motors già alla fine degli anni Sessanta, prima quindi di tutte le altre case automobilistiche, aveva presentato un veicolo a celle a combustibile, da allora, il gruppo GM/Opel ha investito notevoli risorse in questo settore.

Nel novembre 1997 è stato fondato il Global Alternative Propulsion Center, con sedi a Rochester (New York), a Warren (Michigan) e a Magonza-Kastel (Germania), con lo scopo di sviluppare veicoli alimentati con sistemi di propulsione alternativi, con speciale attenzione per le celle a combustibile. A questi si sono aggiunti successivamente il GM Advanced Technology Center di Torrance (California), una sede a Tokyo e una a Shanghai. Questi centri, che impiegano oltre 600 persone, sono stati poi riuniti nella Divisione di ricerca Fuel Cell Activities.

Il primo prodotto del Global Alternative Propulsion Center è stato un veicolo alimentato a metanolo, derivato dall'Opel Zafira, esposto nel 1998.

Nella primavera del 2000 è stata realizzata la prima vettura guidabile su strada, la HydroGen1, ancora derivata da un Opel Zafira. Sull'auto, alimentata ad idrogeno liquido (serbatoio da 76 litri), la potenza era fornita da uno stack che sviluppava una potenza continua fino a 80 kW e consentiva, grazie ad un elettromotore asincrono trifase da 55 kW una velocità di 140 km/h.



**2000 - Hydrogen1**  
Potenza celle: 80 kW  
Autonomia: 400 km  
Velocità max: 140 km/h  
Combustibile: idrogeno liquido



**2001- HydroGen 3**  
Potenza: 94 kW  
Velocità max: 160 km/h  
Autonomia: 400 km/h  
Combustibile: idrogeno liquido



**2002- HydroGen3**  
Potenza: 94 kW  
Velocità max: 160 km/h  
Autonomia: 270 km/h  
Combustibile: idrogeno (700 bar)



**1967 - "Electrovan" GM**  
Potenza celle: 5 kW (stack AFC)  
Autonomia: 200 km  
Velocità max: 105 km/h  
Combustibile: idrogeno liquido



**1998 - Opel Zafira**  
Potenza celle: 50 kW (2 stack)  
Autonomia: 400-500 km  
Velocità max: 120 km/h  
Combustibile: metanolo

Versione innovativa di questo modello è l'HydroGen3 del 2001. Sull'auto era montato uno stack che erogava una potenza continua di 94 kW (potenza di picco di 129 kW). L'energia elettrica prodotta a bordo del veicolo azionava un motore asincrono trifase da 60 kW (82 CV), il quale a sua volta trasmetteva il moto alle ruote anteriori. Questo sistema di propulsione consentiva di passare da 0 a 100 km/h in 16 secondi e di raggiungere una velocità massima di 160 km/h.

Lo stack della HydroGen3, di dimensioni di 472 x 251 x 496 mm, era notevolmente più compatto di quello utilizzato sul modello precedente (590 x 270 x 500 mm). La densità di potenza era passata da 1,10 kW/L (0,47 kW/kg) a 1,60 kW/L (0,94 kW/kg). Lo stack presentava inoltre un ottimo comportamento nelle partenze a freddo, garantendo la piena potenza dopo soli 30 secondi anche a temperature di -20°C: un fattore importante per garantire la compatibilità delle auto alimentate con celle a combustibile con le esigenze quotidiane.

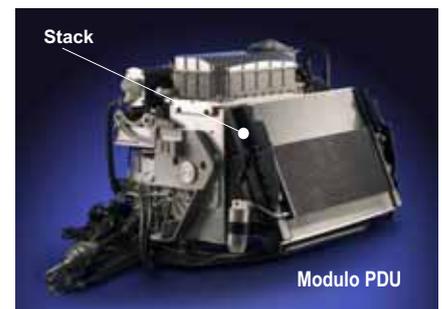
Per sviluppare un prodotto indirizzato alla produzione di serie, gli ingegneri GM nella HydroGen3 erano riusciti a progettare un sistema estremamente compatto (75 x 70 x 55 cm) grazie alla riduzione del numero e del volume dei componenti, che sono assemblati nel cosiddetto modulo PDU (Propulsion dress-up). Il sistema elettrico di trazione, lo stack, il compressore e gli ausiliari formano cioè un unico modulo (peso 300 kg), concepito in modo tale da poter essere inserito nella vettura dal basso, esattamente come un motore convenzionale, ed utilizzando perfino gli stessi supporti.

Nella Hydrogen3, l'idrogeno, a seconda della versione, è immagazzinato a bordo o allo stato liquido oppure come idrogeno compresso ad una pressione di 700 bar. I due diversi tipi di serbatoio consentono un'autonomia rispettivamente di 400 km e di 270 km.

HydroGen3 ha dimostrato la sua affidabilità prendendo parte a diversi eventi. Nel corso della Fuel Cell Marathon, che si è svolta nell'estate del 2004, in 38 giorni la vettura ha percorso 9.696 chilometri attraversando 14 Paesi europei, da Hammerfest in Norvegia a Cabo de Roca in Portogallo, senza mostrare problemi tecnici rilevanti.

Con questo veicolo GM partecipa alle attività del Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project, diretto dal METI. Ricordiamo che in Giappone, l'HydroGen3 è stata fornita alla Federal Express Corporation ("FedEx Express") che l'ha utilizzata, tra il luglio 2003 ed il giugno 2004, per le operazioni di consegna nella città di Tokyo.

Una collaborazione simile è stata avviata, a settembre 2004, con il Servizio Postale degli Stati Uniti (USPS), il quale ha preso in leasing alcune Hydrogen3, da usare come veicoli per il recapito della corrispondenza nel distretto di Washington D.C.



Negli Stati Uniti, General Motors ha ottenuto finanziamenti dal Department of Energy, per la realizzazione di una flotta dimostrativa costituita da 40 veicoli, da impiegare a New York, Washington D.C. e in California e Michigan.



GM sta acquisendo ulteriori esperienze nell'utilizzo quotidiano della sua tecnologia attraverso un programma di prove svolto in collaborazione con il gruppo svedese IKEA. Una HydroGen3 viene infatti impiegata presso il magazzino IKEA di Berlino-Spandau per le consegne di merci alla clientela. Le prove sono effettuate nell'ambito del progetto CEP (Clean Energy Partnership Berlin), nel quale si sta tra l'altro analizzando il comportamento, in situazioni di utilizzo pratico, di veicoli ad idrogeno realizzati dalle diverse case automobilistiche.

Alla HydroGen3 è seguita, nel settembre 2006, la Equinox Fuel Cell, un'auto ibrida che utilizza un sistema PEFC di quarta generazione che produce 93 kW di potenza e a cui è stata affiancata una batteria litio-ione. Il sistema PEFC della Equinox è progettato per una durata di almeno 75.000 chilometri e per avviarsi a freddo a temperature fino a -25 °C.



**2006 - Chevrolet Equinox Fuel Cell**

**2007 - HydroGen4**

Potenza: 93 kW stack  
35 kW batteria Ni MH  
Velocità max: 160 km/h  
Autonomia: 320 km/h  
Combustibile: idrogeno (700 bar)

L'idrogeno è accumulato a bordo allo stato gassoso, in serbatoi a 700 bar. L'autonomia con un pieno di idrogeno è di 320 chilometri, la velocità massima di 160 km/h. Numeri che ne fanno un'auto adeguata al normale uso quotidiano.

La Equinox Fuel Cell sarà prodotta in più di 100 esemplari che nell'ambito del Project Driveway, verranno affidati a diversi utenti in tre aree degli Stati Uniti: lo Stato della

California, l'area metropolitana di New York e Washington DC. Lo sviluppo del Project Driveway prevede nei prossimi anni la diffusione di flotte significative di Equinox Fuel Cell a idrogeno anche in Europa e Giappone, per raggiungere una conoscenza il più possibile completa del funzionamento del veicolo in diverse condizioni climatiche, socio-economiche e di traffico.

Versione europea della Equinox Fuel Cell è la HydroGen4 esposta al Salone dell'Auto di Francoforte nel settembre 2007. Dalla metà del 2008 dieci HydroGen4 prenderanno parte ad un programma di prove che si svolgeranno a Berlino, nel quadro del progetto CEP.

La GM, con il progetto AUTonomy ed il prototipo Hy-wire, realizzato nel 2002 è stata la prima società a mettere a punto un veicolo dal design completamente innovativo progettato intorno al sistema di propulsione a celle a combustibile e non ottenuto adattando quest'ultimo alla struttura di un'auto già in produzione. Le celle a combustibile (lo stack è dello stesso tipo di quello installato della HydroGen 3), le bombole di idrogeno e i sistemi di controllo dell'auto erano stati inseriti all'interno di un sottile pianale (meno di 28 cm di spessore) simile ad uno skateboard, che lasciava completa libertà nella configurazione del veicolo.



**GM HydroGen4**



**2002- Hy-wire**  
Potenza: 94 kW  
Velocità max: 160 km/h  
Autonomia: 270 km/h  
Combustibile: idrogeno (700 bar)

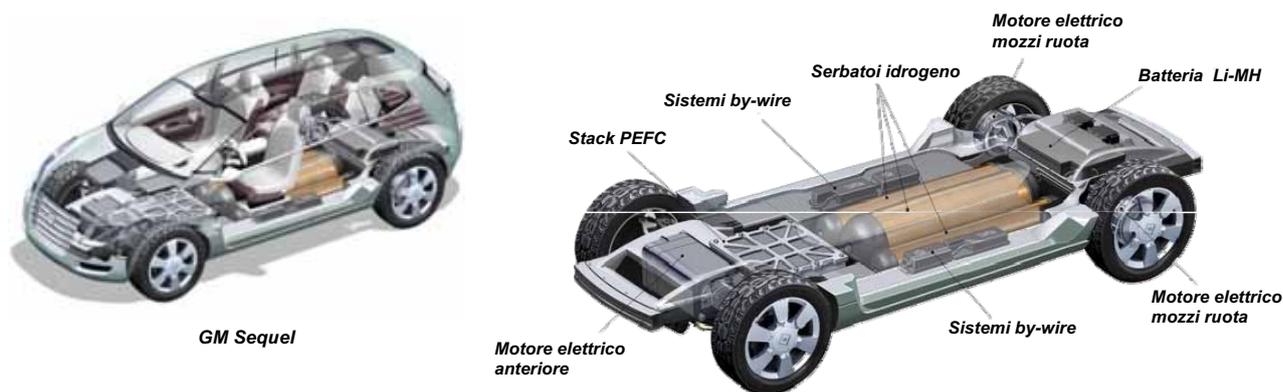


**2006- Sequel**  
Potenza: 73 kW stack  
65 kW batteria Li-ione  
Velocità max: 145 km/h  
Autonomia: 480 km/h  
Combustibile: idrogeno (700 bar)

Hy-wire, come suggerisce il nome, utilizza la tecnologia drive-by-wire, usa cioè comandi elettronici, vengono eliminati quindi tutti i sistemi meccanici presenti in una vettura convenzionale, inclusi il motore, la colonna dello sterzo, i pedali per freni, frizione ed acceleratore. La gestione dell'auto era affidata a una sorta di cloche, che permetteva di sterzare, accelerare, frenare e che poteva essere spostata facilmente per la guida a sinistra o a destra.

Evoluzione dell'Hy-wire è stata la Sequel, un'auto con una struttura completamente in alluminio, studiata per rispondere alle normative di sicurezza americane. Anche la Sequel è realizzata su un telaio a "skateboard" che ospita i componenti relativi alla propulsione, l'impianto frenante e le sospensioni. La Sequel

è un'auto ibrida con un'autonomia di oltre 480 chilometri ed in grado di raggiungere i 100 km/h con partenza da fermo in circa 10 secondi. A bordo era installato uno stack da 73 kW.



GM Sequel

Motore elettrico anteriore

General Motors intende arrivare a rendere veicoli a celle a combustibile competitivi con i motori a combustione interna in termini di prestazioni, durata e costi tra il 2010 ed il 2015.

### Honda Motor Company

La Honda Motor Co. ha iniziato ad esplorare le potenzialità delle celle a combustibile nel 1989, da allora ha compiuto enormi progressi fino ad arrivare nel 2002 alla realizzazione della Honda FCX, che è stata la prima auto al mondo ad ottenere la certificazione dell'EPA (Agenzia di Protezione Ambientale americana) e della California Air Resources Board (CARB) per l'uso quotidiano. La FCX ha ottenuto, sempre dal CARB, la certificazione di veicolo a zero emissioni (Zero Emission Vehicle) ed è l'unica vettura a celle a combustibile a rientrare nella EPA Fuel Economy Guide.

Dopo la realizzazione nel settembre 1999 di due prototipi di veicoli ibridi, uno alimentato a idrogeno (FCX-V1) e l'altro a



**1999 - Honda FCX-V1**  
Potenza: 62 kW (stack Ballard Mark 700)  
Autonomia: 170 km  
Velocità max: 130 km/h  
Combustibile: idrogeno in idruri metallici



**1999 - Honda FCX-V2**  
Potenza: 60 kW (stack Honda)  
Autonomia: 130 km  
Combustibile: Metanolo



**2000 - Honda FCX-V3**  
Potenza: 62 kW  
Autonomia: 180 km  
Velocità max: 130 km/h  
Combustibile: idrogeno (250 bar)



**2001 - Honda FCX-V4**  
Potenza: 75 kW (stack Ballard Mark 900)  
Autonomia: 300 km  
Velocità max: 140 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)



**2002 - Honda FCX**  
Potenza: 75 kW (stack Ballard Mark 900)  
Autonomia: 355 km  
Velocità max: 150 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)

metanolo (FCX-V2), esattamente un anno dopo è stata presentata la FCX-V3. Rispetto al precedente veicolo ad idrogeno, erano stati apportati notevoli miglioramenti, non solo in termini di abitabilità (4 posti contro i due dei precedenti prototipi). Il tempo di start up si era infatti ridotto di un ordine di grandezza (10 secondi contro i 10 minuti della FCX-V1), il peso del veicolo era diminuito del 10% (1.750 kg contro 2.000 kg) ed infine il tempo necessario per il rifornimento (serbatoio da 100 litri, 250 bar) era passato a soli 5 minuti contro i 20 minuti della FCX-V1. Sulla FCX-V3 un supercondensatore sostituiva la batteria ad idruri metallici usata nella versione precedente.

Nel settembre 2001 veniva prodotto un prototipo di 4<sup>a</sup> generazione, la FCX-V4, in cui il sistema cella era stato riprogettato per renderlo più compatto ed erano state ulteriormente migliorate le prestazioni e la sicurezza del veicolo. Sull'auto era installato uno stack Ballard Mark 900. L'idrogeno era immagazzinato in due serbatoi a 350 bar posti sotto il pianale, che assicuravano elevata autonomia (circa 300 km) senza penalizzare la capacità di carico del veicolo.

La FCX-V4 ha rappresentato la base del veicolo FCX realizzato nel 2002. L'auto era dotata di un motore elettrico asincrono AC da 60 kW (80 CV) alimentato da uno stack Ballard ed impiegava idrogeno gassoso. I due serbatoi ad alta pressione (350 bar) capaci di contenere 156,6 litri di idrogeno garantivano un'autonomia di circa 355 km ed una velocità massima di 150 km/h. Si trattava di un veicolo ibrido sul quale era montato un supercondensatore sviluppato dalla stessa Honda, che consentiva di ottenere ottime prestazioni su strada in termini di potenza e prontezza di risposta del motore.

Della FCX, in seguito, è stata presentata una versione in cui era stato montato un sistema PEFC sviluppato da Honda.

La FCX è stato il primo veicolo a rendersi disponibile commercialmente, quando nel 2002 in Giappone furono consegnate tre vetture ai Ministeri dell'Ambiente e dell'Economia, del Commercio e dell'Industria e tre fornite alla Municipalità di Los Angeles.

Da allora, oltre venti FCX sono state affidate a diverse municipalità negli Stati Uniti e undici consegnate nelle città di Tokyo e Hokkaido in Giappone. Le vetture erano offerte in leasing a 500 euro al mese per un periodo di 18 mesi. Per dimostrarne l'affidabilità una delle vetture era stata assegnata ad una famiglia californiana che la utilizzava per i propri spostamenti quotidiani. Con quest'auto la Honda partecipa alle attività del Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project.

**2003 - Honda FCX**  
Potenza: 86 kW (2 stack Honda)  
Autonomia: 395 km  
Velocità max: 150 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)



A novembre 2007, Honda ha mostrato ufficialmente a Los Angeles la FCX Clarity, auto di nuova generazione che dovrebbe arrivare sulle strade del Giappone e della California nell'estate 2008. In California l'auto verrà fornita in leasing per tre anni a 600 \$/mese, cifra comprensiva dei costi di manutenzione e assicurazione.



**2007 - Honda FCX Clarity**  
Potenza: 100 kW (stack Honda)  
Batteria Li-ione  
Autonomia: 430 km  
Velocità max: 160 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)

Il veicolo, equipaggiato con uno stack di ultima generazione a flusso verticale di potenza 100 kW, dispone di una batteria litio-ione come sorgente di potenza ausiliaria. E' stato dichiarato che il veicolo risulta tre volte più efficiente rispetto ad veicolo con un motore a benzina, due rispetto ad un veicolo ibrido.

Honda, che continuerà ad effettuare test in Giappone e negli Stati Uniti per rendere la tecnologia sempre più affidabile, prevede di rendere disponibili al pubblico i suoi veicoli entro dieci anni, stimando un mercato USA di 50.000 veicoli/anno a partire dal 2020.

## Hyundai Motor Co. / Kia Motors

La Hyundai, che ha iniziato le attività di ricerca e sviluppo in questo settore nel 1998, per la costruzione dei suoi prototipi si è avvalsa della collaborazione delle società statunitensi UTC Power ed Enova Systems.

Il primo veicolo realizzato, la Santa Fe, era stato presentato nel novembre 2000 in occasione di un evento della California Fuel Cell Partnership, di cui la società coreana è membro effettivo.

L'anno successivo era stata mostrata una versione rinnovata di questa vettura su cui era installata una unità da 75 kW fornita dalla UTC Power. L'auto impiegava serbatoi di idrogeno a 350 bar e veniva dichiarata un'autonomia di circa 400 km.

Attualmente Hyundai con la consociata Kia Motors ed in collaborazione con Chevron Texaco e UTC Power sta partecipando al Controlled Hydrogen Fleet and Infrastructure Demonstration and Validation Project, promosso dal DoE. Il progetto è finalizzato a validare la tecnologia dei veicoli a celle a combustibile attraverso test su strada ed a supportare lo sviluppo di infrastrutture di rifornimento idrogeno.

Nell'arco dei cinque anni del programma, in California e nel Michigan dovrebbero entrare in circolazione 16 veicoli Hyundai Tucson e 16 Kia Sportage ed essere costruite sei stazioni idrogeno per il loro rifornimento.

Le attività del progetto sono state avviate nel febbraio 2005 con l'apertura da parte della Chevron della prima stazione di rifornimento idrogeno presso il Centro tecnico Hyundai-Kia America a Chino, in California. Le prime Hyundai Tucson sono state consegnate alla società di trasporto pubblico AC Transit (Oakland, California) per l'esercizio su strada.



**2000 - Hyundai Santa Fe FCEV**  
Potenza: 75 kW (stack UTC Power)  
Autonomia: 160 km  
Velocità max: 124 km/h  
Combustibile: idrogeno (250 bar)



**2001 - Hyundai Santa Fe FCEV**  
Potenza: 75 kW (stack UTC Power)  
Autonomia: 400 km  
Combustibile: idrogeno (350 bar)



**2004 - Hyundai Tucson FCEV**  
Potenza: 80 kW (stack UTC Power)  
Autonomia: 300 km  
Velocità max: 150 km/h  
Combustibile: idrogeno



**2004 - Kia Sportage**  
Potenza: 80 kW (stack UTC Power)  
Autonomia: 300 km  
Velocità max: 150 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)

## Mitsubishi Motors Corp.

La Mitsubishi ha presentato un veicolo alimentato con celle a combustibile nel 2003. Il veicolo, derivato dal minivan Grandis, era stato sviluppato nell'ambito di una collaborazione con la Daimler Japan. Con questo veicolo, che aveva ricevuto la certificazione del Ministero dell'Economia, del Commercio e dell'Industria (METI) per le prove su strada, Mitsubishi ha partecipato alla prima fase del Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project.

**2003- Mitsubishi FCV**  
 Potenza: stack Ballard 68 kW/  
 batteria  
 Autonomia: 150 km  
 Velocità max: 140km/h  
 Combustibile: idrogeno (350 bar)



## Nissan Motor Co.

La Nissan ha iniziato attività di ricerca e sviluppo di veicoli a celle a combustibile nel 1996. Quest'attività portava tre anni più tardi ad avviare le prove su strada di un primo prototipo, la FCV R'Nessa, un ibrido dotato di un reformer per la produzione di idrogeno da metanolo. Molte delle soluzioni tecniche adottate, dal motore elettrico alle batterie, erano state ricavate dall'esperienza acquisita sviluppando altri veicoli elettrici, come la R'nessa EV.



**1999 - Nissan FCV R'Nessa**  
 Potenza cella: 10 kW  
 Velocità max: 70 Km/h  
 Combustibile: metanolo



**2000 - Nissan FCV XTERRA**  
 Potenza cella: 75 kW  
 Autonomia: 160 km  
 Velocità max: 120 km/h  
 Combustibile: idrogeno compresso

A questo era seguito (2000) un secondo prototipo, basato su una Xterra SUV alimentata a idrogeno compresso. Con questa vettura, la Nissan ha partecipato alle prove della CaFCP. Della Xterra sono state costruite due versioni una alimentata con uno stack Ballard ed una seconda su cui era stato installato uno stack UTC Power.



**2002 - Nissan X-Trail FCV**  
 Potenza cella: 58 kW (stack UTC)  
 Autonomia: 160 km  
 Velocità max: 120 km/h  
 Combustibile: idrogeno (350 bar)

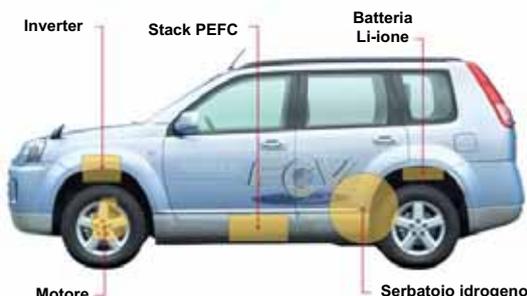


**2003 - Nissan X-Trail FCV**  
 Potenza cella: 63 kW (stack UTC)  
 Autonomia: 350 km  
 Velocità max: 145 km/h  
 Combustibile: idrogeno (350 bar)

Nel dicembre 2003 era stata presentata la X-Trail a idrogeno (350 bar), versione ottimizzata rispetto al modello del 2002, che aveva ottenuto dal Ministero delle Infrastrutture e Trasporti giapponese i permessi necessari per la circolazione su strada. La X-Trail FCV 2003 era un veicolo ibrido, sul quale erano montate batterie al litio ad alte prestazioni. Il propulsore era costituito da una cella combustibile da 63 kW della UTC Power.

Il veicolo era stato sottoposto una serie di test su strada in Giappone, dove tra l'altro nel 2004 alcune vetture erano state fornite in leasing alla compagnia energetica Cosmo Oil, alla prefettura di Kanagawa e alla municipalità di Yokohama.

Rispetto al precedente modello, la X-Trail FCV del 2005 si distingue per un serbatoio a idrogeno a 700 bar (tecnologia Dynetek Industries) ed uno stack più compatto e di maggiore potenza (90 kW) sviluppato dalla stessa Nissan. Risultato di queste modifiche è stato un aumento dell'autonomia (oltre 500 km contro 350) e l'ottenimento di prestazioni che si avvicinano a quelle del modello a benzina. L'auto è progettata per rispondere agli standard di sicurezza giapponesi.



**2005 - Nissan X-Trail FCV**  
 Potenza: 90 kW (stack Nissan)  
 Batteria Li-ione  
 Autonomia: 500 km  
 Velocità max: 150 km/h  
 Combustibile: idrogeno (700 bar)

Ricordiamo che Nissan sta partecipando al Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project e che dal febbraio 2006 questa vettura è sottoposta a prove su strada anche in Canada, nell'area di Vancouver.

Lo sviluppo di auto con celle a combustibile rientra nel "Nissan Green Program 2010," un piano d'attività a medio termine che delinea gli impegni presi dalla casa giapponese in fatto di protezione dell'ambiente attraverso lo sviluppo di specifiche tecnologie e prodotti, la strategia per il riciclaggio e molte altre iniziative.

Nissan ha lanciato nel 2001, insieme a Renault, un progetto all'interno del quale la società francese si occupava dello sviluppo di veicoli con reformer del combustibile a bordo. Si sottolinea che Renault è rimasto l'unico costruttore automobilistico che continua a perseguire questa linea di ricerca.

## Psa Peugeot Citroën

Il gruppo PSA Peugeot Citroën è impegnato da diversi anni nello sviluppo di veicoli a celle a combustibile. Il primo prototipo è stato sviluppato all'interno di un progetto della Commissione Europea e risale al 2000. Il progetto Hydro-Gen, che vedeva la partecipazione di Nuvera Fuel Cells Europe, AirLiquide, CEA (Atomic Energy Commission), Renault e Solvay, aveva condotto alla realizzazione di un veicolo dimostrativo derivato della Peugeot Partner elettrica, su cui era installato uno stack PEFC da 30 kW alimentato a idrogeno compresso (350 bar).

Il gruppo ha costruito nel 2001 un secondo prototipo, un taxi ibrido (derivato ancora dalla versione elettrica della Peugeot Partner) sul quale era montato uno stack da 5,5 kW, che veniva utilizzato come unità di potenza ausiliaria. L'idrogeno era accumulato in bombole sistematiche in un rack, rimovibile al momento del rifornimento che avveniva quindi al di fuori del veicolo.



Nel gennaio 2002 è stata presentata una concept car, la H2O, un veicolo per i vigili del fuoco, che si differenziava dai prototipi che l'hanno preceduta in quanto alimentata con idrogeno ottenuto a bordo da sodio boridruro.

PSA, in collaborazione con il CEA, ha sviluppato il GENEPAC (GENERatore Elettrico a Pila A Combustibile) un sistema modulare per usi veicolari di potenza 80 kW (costituito da 4 moduli PEFC da 20 kW).



GENEPAC 80 kW (1,4 kW/L)

Una versione da 20 kW del GENEPAC è stata installata sulla 207 Epure, una concept car ibrida mostrata al Salone di Parigi nell'ottobre 2006. La Epure, dotata di 5 bombole di idrogeno a 700 bar, presenta un'autonomia di 350 km e una velocità massima di 130 km/h.

Nel 2006 il gruppo ha annunciato una collaborazione con la Intelligent Energy, per integrare unità PEFC prodotte da quest'ultima in veicoli PSA.

L'attività viene promossa dal Ministero del Commercio e dell'Industria britannico, all'interno di un programma sulle energie rinnovabili.

### PSA Peugeot Citroën Hydro-Gen

Potenza: 30 kW PEFC /batteria NiHM  
Autonomia: 300 km  
Velocità max: 95 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)



### 2001- Taxi PAC

Potenza: 5,5 kW PEFC /batteria NiMH  
Autonomia: 200-300 km  
Velocità max: 95 km/h  
Combustibile: H<sub>2</sub> (350 bar)



2002 - Peugeot H2O (concept car)  
Combustibile: idrogeno da NaBH<sub>4</sub>



### 2006- 207 Epure

Potenza: 20 kW (GENEPAC CEA)  
50 kW batteria Li-ione  
Autonomia: 350 km  
Velocità max: 130 km/h  
Combust.: H<sub>2</sub> (5 bombole, 700 bar)

## Toyota Motor Co.

La Toyota sta lavorando allo sviluppo tecnologico di veicoli con celle a combustibile dal 1992. Nel novembre 1996 ha approntato un primo veicolo alimentato con uno stack PEFC da 20 kW, che mostrava prestazioni ed autonomia decisamente interessanti, a cui nel 1997 aveva fatto seguire una vettura di seconda generazione alimentata a metanolo, la RAV-4.

Nel corso del 2001 la Toyota ha presentato 3 diverse versioni del veicolo ibrido basato sulla Kluger V/Highlander. La potenza in questi veicoli viene generata da uno stack PEFC da 90 kW di produzione Toyota. Sulle auto è montata una batteria Ni-idruri metallici, che porta ad un aumento dell'efficienza totale del veicolo.

L'efficienza tank-to-wheel della FCHV-4, che utilizza idrogeno compresso, è circa tre volte superiore a quello di una vettura convenzionale della stessa classe ed 1,7 volte maggiore rispetto a quella di un veicolo ibrido. Toyota stima per un veicolo a celle a combustibile non ibrido, con idrogeno prodotto da gas naturale, un'efficienza totale (well-to-wheel) del 22%, più bassa quindi di quella di un ibrido a benzina, l'installazione sul veicolo di una batteria secondaria consente invece di raggiungere efficienze totali dell'ordine del 29%.

	Well-to-tank (%)	Tank-to-wheel (%)	Efficienza totale (Well-to-Wheel), %			
			10	20	30	40
Veicolo a benzina	88	18	14			
Prius (veicolo ibrido a benzina)	88	37			32	
FCV a idrogeno (idrogeno compresso)	58*	38	22			
Toyota FCHV-4 (idrogeno compresso)	58*	50	29			
Target FCHV	70	60				42

■ Ciclo Giapponese Mode 10-15 (stima Toyota)

\* Idrogeno prodotto da gas naturale



**Ottobre 1996-Toyota RAV4 FCEV**  
 Potenza: 20 kW (stack Toyota) / batteria  
 Autonomia: 250 km  
 Velocità max: 100 km/h  
 Combustibile: idrogeno in idruri metallici



**Settembre 1997-Toyota RAV4 FCEV**  
 Potenza: 25 kW (stack Toyota) / batteria  
 Autonomia: 500 km  
 Velocità max: 125 km/h  
 Combustibile: metanolo



**Marzo 2001 - Toyota FCEV-3**  
 Potenza: 90kW (stack Toyota) / batteria  
 Autonomia: 250 km  
 Velocità max: 150 km/h  
 Combustibile: idrogeno in idruri metallici



**Giugno 2001-Toyota FCEV-4**  
 Potenza: 90 kW (stack Toyota) / batteria  
 Autonomia: 250 km  
 Velocità max: 150km/h  
 Combustibile: idrogeno (250 bar)



**Ottobre 2001 - Toyota FCEV-5**  
 Potenza: 90 kW (stack Toyota) / batteria  
 Combustibile: benzina a basso contenuto di zolfo



**Dicembre 2002 - Toyota FCHV**  
 Potenza: 90kW (stack Toyota) / batteria  
 Autonomia: 290 km  
 Velocità max: 155 km/h  
 Combustibile: idrogeno (350 bar)

Toyota, che ha condotto un'intensa attività di ricerca sui possibili combustibili (benzina, gas naturale, idrogeno liquido e gassoso) da utilizzare per l'alimentazione dei suoi veicoli, sviluppando anche vetture con sistema di reforming a bordo, è arrivata a concludere che nonostante ogni soluzione presenti vantaggi e svantaggi, la strada da percorrere sia quella dell'idrogeno immagazzinato direttamente a bordo. Ricordiamo che la FCEV-5, presentata nel 2001, era un veicolo alimentato con idrogeno ottenuto da una benzina a basso tenore di zolfo.

Nel 2002, alcune FCHV-4 sono state sottoposte ad una serie di test su strada in Giappone e California per studiarne prestazioni e comportamento in condizioni di funzionamento reale. Queste auto erano state fornite in leasing a quattro organismi di governo giapponesi (Ufficio del Primo Ministro, Ministero dell'Economia, del Commercio e dell'Industria, Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, Ministero dell'Ambiente) e alle Università di Irvine e Davis, in California. I risultati ed i dati raccolti nel corso di quest'esperienza erano serviti per sviluppare la FCHV, auto che è stata prodotta in un numero limitato di esemplari, che sono stati consegnati ad istituti di ricerca, amministrazioni pubbliche e aziende energetiche in Giappone e Stati Uniti. Finora hanno circolato su strada 21 veicoli, i quali hanno percorso in totale oltre 210.000 km.



**Ottobre 2007 - Toyota FCHV**  
 Potenza: 90kW (stack Toyota) / batteria NiMH  
 Autonomia: 560 km (in condizioni reali)  
 Combustibile: idrogeno (700 bar)

Recentemente è stata presentata una versione ottimizzata della FCHV. La vettura, rispetto alla precedente, monta uno stack più efficiente del 25%, un miglior sistema di controllo e usa idrogeno a 700 bar che le consente una notevole autonomia. A scopo dimostrativo la vettura ha percorso il tratto Osaka-Tokyo (circa 560 km) senza bisogno di alcun rifornimento.

Al Motorshow di Tokyo del 2003, era stata esposta una concept-car, la Toyota FINE-N (Fuel cell INnovative Emotion Next generation), una vettura ibrida a celle a combustibile di nuova concezione con motori elettrici su ciascuna ruota. La FINE-N utilizza la tecnologia by-wire, così come il prototipo mostrato due anni dopo sempre a Tokyo la FINE-X. Questi veicoli sono la dimostrazione di come viene intesa la futura vettura a cella a combustibile, cioè interamente costruita intorno al sistema cella e non ottenuta dall'adattamento di un'auto di tipo tradizionale.



**Toyota FINE-N e FINE-X (Concept car)**

I prototipi realizzati da Toyota impiegano stack PEFC e serbatoi di idrogeno progettati e realizzati presso i suoi centri di ricerca. Toyota, in collaborazione con Hino Motors, come vedremo sviluppa autobus per il trasporto pubblico.

## Volkswagen

Volkswagen a novembre 2000 ha presentato il primo prototipo a celle a combustibile alimentato a idrogeno liquido, la Bora HyMotion, con la quale ha partecipato alle attività del programma della California Fuel Cell Partnership.

Da questa vettura è nata la Bora Hy-Power, mostrata al salone di Ginevra nel marzo 2002 e realizzata in collaborazione con il Paul Sherrer Institute (PSI), la Federal Technical University (ETH) e il FEV Motortechnik. In questa vettura le batterie erano state sostituite con supercondensatori e veniva usato l'idrogeno compresso (350 bar).

Un'ulteriore evoluzione della tecnologia ha portato a realizzare la Touran Hy-Motion, vettura con il quale Volkswagen a Berlino sta prendendo parte alle attività della Clean Energy Partnership.

**2000 - VW Bora Hy-Motion**  
Potenza: 75 kW PEFC /batteria  
Autonomia: 350 km  
Velocità max: 140 km/h  
Combustibile: idrogeno liquido

**2002 - VW Bora Hy-Power**  
Potenza: 25 kW PEFC (PSI)  
60 kW supercondensatore  
Autonomia: 150 km  
Velocità max: 115 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)

**2004 - VW Touran Hy-Motion**  
Potenza: 66 kW PEFC (Ballard)  
Batteria NiMH 1,9 kWh  
Autonomia: 160 km  
Velocità max: 140 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)



Le attività di sviluppo di veicoli a celle a combustibile condotte da società italiane saranno illustrate successivamente.

## AUTOBUS A CELLE A COMBUSTIBILE

### Ballard Power Systems / NuCellSys

La Ballard Power Systems è stata la prima società a sviluppare autobus alimentati con celle ad elettrolita polimerico. Il primo autobus (125 CV, 90 kW) è apparso nel 1993 e due anni più tardi è stato completato un prototipo ingegnerizzato, per il trasporto urbano, che forniva una potenza di 275 CV (205 kW). Il veicolo presentava un'autonomia pari a 400 km e caratteristiche simili a quelle dell'analogo veicolo a combustione interna.

Tra il dicembre 1997 e la prima metà del 1998 sei autobus di questo tipo erano stati consegnati alla **Chicago Transit Authority** e alla **Coast Mountain Bus Company** (allora British Columbia Transit) per dimostrazioni su strada, rispettivamente nelle città di Chicago e Vancouver.

Da questa sperimentazione sono state tratte informazioni che hanno portato ad una evoluzione della tecnologia e alla realizzazione dello ZEBus (Zero Emission Bus, 1999).

L'autobus era stato affidato alla **SunLine Transit**, a Thousand Palms (California), che all'interno del programma della California Fuel Cell Partnership, lo aveva sotto-posto ad una serie di prove su strada.



**Flotta CTA (Chicago, USA)**  
Programma dimostrativo 1998-2000: 5.000 ore di esercizio, 49.700 km percorsi, trasportati 100.000 passeggeri



**Flotta CMBC (Vancouver, Canada)**  
Programma dimostrativo 1998-2000: oltre 6.000 ore di esercizio, 80.000 km percorsi, trasportati oltre 110.000 passeggeri



**ZEBus - Programma dimostrativo 1999-2002:**  
collaborazione con SunLine Transit (California):  
24.000 km percorsi



**Citaro Fuel Cell Bus - Programmi dimostrativi HyFLEET:** CUTE, ECTOS e STEP



**NuCellSys HY-205**  
Potenza netta:  
Dimensioni: 250 x 160x 133 cm

Nel 1997, nell'ambito della collaborazione con Daimler era stato realizzato un altro prototipo, il NEBUS, già citato in precedenza. L'autobus era alimentato con idrogeno accumulato in sette bombole da 150 litri a pressione di 350 bar collocate sul tetto; il combustibile era sufficiente per un'autonomia di circa 250 km, più di quanto richiesto per servizi di linea giornalieri.



**2004 - Autobus Gillig alla Santa Clara VTA**  
Potenza: 205 kW (stack Ballard)  
Combustibile: idrogeno (350 bar, 55 kg)

Sistemi NuCellSys da 205 kW sono installati sugli autobus Mercedes-Benz Citaro che stanno circolando in diverse città europee, a Perth in Australia e a Pechino in Cina.

Sistemi dello stesso tipo sono stati montati su tre autobus realizzati dalla **Gillig Corporation**, nel quadro delle attività della California Fuel Cell Partnership. Agli inizi del 2005 questi autobus sono stati consegnati alla Santa Clara Valley Transportation Authority (VTA) per la sperimentazione. Durante il periodo di prova i dati relativi al funzionamento e alle prestazioni degli autobus sono stati analizzati dal National Renewable Energy Laboratory (NREL), all'interno dell'Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program del DoE. A giugno 2007, dopo 32 mesi di esercizio, la flotta della VTA aveva percorso circa 105.600 km.

A Londra entro il 2009 entreranno in servizio cinque autobus realizzati in collaborazione con la ISE Corp., su quali saranno montati moduli HD6 da 75 kW di nuova generazione.

### Georgetown University

La Georgetown University (Washington, DC) ha avviato lo sviluppo e la dimostrazione, di autobus alimentati con celle a combustibile, con supporto da parte dell'US Federal Transit Administration (FTA) e del Department of Energy nella prima metà degli anni Novanta. Dopo aver realizzato alcuni prototipi alimentati con celle ad acido fosforico (tecnologie Fuji e UTC Power), nel 2001 ha costruito un autobus a metanolo su cui aveva installato un'unità PEFC Ballard da 100 kW. Il veicolo, era stato realizzato in configurazione ibrida, con batterie che fornivano ulteriore potenza per l'accelerazione e nelle salite e consentivano il recupero dell'energia dissipata nelle frenate.

La Georgetown, in collaborazione con NuCellSys, EPRI e ZSW (Centro di Ricerca sull'Energia Solare e l'idrogeno, Baden-Württemberg, Germania) sta lavorando ad un programma che la porterà a costruire autobus di terza generazione. Obiettivo della prima fase di questo programma, che si concluderà nel 2008, è quello di sviluppare un sistema avanzato (60 kW) a metanolo che servirà da modulo base per l'unità di potenza superiore a 100 kW da installare sul futuro veicolo.



#### 2001 - Georgetown University X1 Bus

Potenza: 186 kW (Stack Ballard 100 kW / 30 kW batteria al piombo)

Autonomia: 560 km

Velocità max: 105 km/h

Combustibile: Metanolo

### Hydrogenics Corporation

A fine 2004 Hydrogenics ha integrato un modulo HyPM12 ad idrogeno su un autobus elettrico modello Gulliver della azienda italiana Tecnobus. L'autobus, realizzato con il sostegno finanziario del Ministero dei Trasporti della regione tedesca della Westfalia-Nord Reno e dell'Unione Europea, è stato presentato all'H2-Expo che si è tenuta ad Amburgo nel 2005. Il primo servizio con passeggeri a bordo è avvenuto nel novembre dello stesso anno in occasione della Conferenza Europea sull'Idrogeno di Saragozza (Spagna).



#### 2005 - Midibus Hydrogenics

Potenza: 25 kW (12kW HyPM12 Hydrogenics + batteria Ni-Cd)

Autonomia: 200 km

Velocità max: 33 km/h

Combustibile: idrogeno (200 bar / 5,8 kg)

L'autobus, alimentato con idrogeno accumulato in due serbatoi da 200 bar collocati sul tetto, aveva ottenuto l'omologazione per la circolazione su strada dal TÜV, ente di certificazione tedesco. Grazie alla configurazione ibrida, il bus presenta un'autonomia di 200 km, contro i 60-80 km dello stesso modello azionato con sole batterie (batterie al piombo).

L'autobus, adatto per applicazioni di nicchia nel settore del trasporto pubblico, è stato concepito principalmente per usi nei centri urbani. Nel 2006 il veicolo è stato usato in diverse occasioni pubbliche (Fiera di Hannover, Campionati Mondiali di Calcio in Germania, Conferenza Mondiale sull'Energia di Lione, H<sub>2</sub> Roma 2006). Dieci

midibus di questo tipo saranno dimostrati all'interno del Progetto HyChain Minitrans, finanziato dalla Commissione Europea e altri tre saranno impiegati in occasione dell'Esposizione internazionale EXPOAGUA che si terrà a Saragozza (Spagna) nell'estate 2008.

Un'unità Hydrogenics è integrata su un autobus ibrido, realizzato in collaborazione con la Enova Systems, entrato in esercizio nella base militare dell'Air Force USA di Hickam (Honolulu, Hawaï) nell'estate del 2004. Il progetto è promosso dal Hawaii



#### 2004 - Autobus ibrido Hickam AFB

Potenza: 20 kW stack Hydrogenics + batterie al Pb)

Autonomia: 200 km

Velocità max: 100 km/h

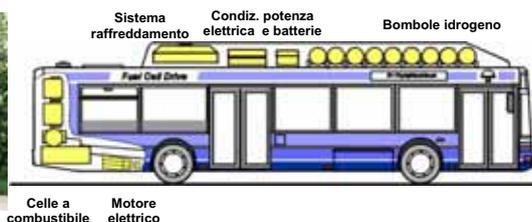
Combustibile: idrogeno (10 kg @ 350 bar)

Center for Advanced Transportation Technologies e dall'Air Force Advanced Power Technology Office. La cella installata sul veicolo, di potenza non elevata (20 kW), è usata principalmente per ricaricare le batterie ed aumentare l'autonomia del veicolo.

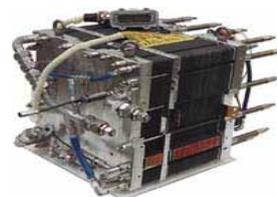
Infine nel progetto promosso dal Natural Resources Canada, Hydrogenics e New Flyer Industries, hanno sviluppato un autobus ibrido su cui è installato un sistema PEFC da 180 kW (tre moduli HyPM da 65 kW). L'autobus, realizzato in collaborazione con la Dynetek (serbatoi idrogeno), Maxwell Technologies (supercondensatori) ed ISE Research (sistema di controllo ed integrazione del sistema di azionamento sul veicolo), è attualmente in fase di sperimentazione a Winnipeg (Manitoba, Canada).

## MAN Nutzfahrzeuge AG

La MAN, all'interno di un programma di sviluppo di veicoli che usano combustibili alternativi, sta realizzando autobus ad idrogeno alimentati sia con celle ad elettrolita polimerico, che con motori a combustione interna.



Unità PEFC (120 kW) - Siemens



**MAN - Progetto Fuel Cell Bus**  
Potenza: 120 kW stack Siemens/ batteria  
Autonomia: 250 km  
Velocità: 80 km/h  
Combustibile: idrogeno (250 bar)

La società, in collaborazione con Siemens e Linde, ha messo a punto un primo autobus a celle a combustibile che ha prestato regolare servizio di linea nelle città di Erlangen, Norimberga e Fürth nel periodo ottobre 2000 - aprile 2001. L'autobus aveva dimostrato la sua idoneità all'uso con circa 8.000 km percorsi. Sul veicolo era installato un modulo PEFC Siemens, di potenza 120 kW (4 stack da 30 kW).

Il sistema di accumulo dell'idrogeno, posto sul tetto del mezzo, era costituito da nove bombole da 250 bar, per un volume complessivo di 1.548 litri. La quantità di gas era sufficiente ad assicurare un'autonomia di 250 chilometri in servizio urbano. Oltre alle bombole, sul tetto erano alloggiati i componenti necessari per il raffreddamento della cella a combustibile ed i convertitori per l'elettronica di potenza, il sistema celle invece era posto sul retro del veicolo.

La sperimentazione di questo autobus in condizioni reali è stata curata dall'azienda di trasporto pubblico di Norimberga (VAG Nürnberg), nella cui sede Linde aveva allestito una stazione di rifornimento idrogeno.

**MAN - Fuel Cell Bus**  
Potenza: 68 W stack Ballard  
Batteria NiMH 13 kWh  
Autonomia: 300 km  
Combustibile: idrogeno (350 bar)



A maggio 2004 era stato presentato un prototipo di 2ª generazione sviluppato nel quadro del Progetto "Idrogeno per l'Aeroporto di Monaco" (Progetto ARGEMUC). Sul veicolo, realizzato in configurazione ibrida, è installata un'unità PEFC da 68 kW fornita da Ballard. La cella ed il pacco batterie (idruri metallici) forniscono una potenza complessiva di 150 kW ai due motori di trazione.

## Neoplan / Proton Motor

La Neoplan ha progettato e realizzato nel 1999 un minibus ibrido celle/batteria ad idruri metallici, nell'ambito di attività promosse dal Ministero dell'Ambiente della Baviera.

Il veicolo era azionato da un'unità PEFC della Nuvera Fuel Cells Europe (3 stack per una potenza totale di 55 kW) ed alimentato a idrogeno. Il gas, fornito dalla Linde, era accumulato in quattro bombole da 147 litri a 200 bar, poste sul tetto del veicolo. Il prototipo ha iniziato a circolare nell'ottobre 1999 nella cittadina di Oberstdorf (Germania), dove è rimasto in servizio per circa due anni.

**Neoplan - Autobus di Oberstdorf**  
Potenza: 55 kW PEFC (Nuvera)  
21 kW batteria  
Autonomia: 600 km  
Velocità max: 50 km/h



A Monaco, era stato quindi presentato (2000) il Bayernbus II, veicolo tecnologicamente più avanzato su cui era installata una cella da 80 kW (18 stack) della **Proton Motor Fuel Cell GmbH**.

Proton Motor di recente ha realizzato un midibus ibrido in Germania, entrato in servizio nella città di Barth. L'autobus usa un'unità PEFC (PM Basic A 50 costituita da 6 stack) che fornisce



**2006- Midibus Proton Motors**  
Potenza: 80 kW (45 kW PEFC + batterie NiMH)  
Autonomia: 180 km  
Velocità max: 70 km/h  
Combustibile: Idrogeno (200 bar)

45 kW di potenza e un pacco batterie NiMH impiegato come sistema di accumulo elettrico per il recupero di energia in frenata.

### Toyota / Hino Motor Co

Toyota, parallelamente allo sviluppo di vetture a celle a combustibile, sta portando avanti la realizzazione di autobus ibridi per il trasporto pubblico, in collaborazione con la Hino Motors e con il supporto del Governo giapponese.

Il primo prototipo l'FCHV-BUS1 realizzato nel 2001, sperimentato su pista, presentava una autonomia di 300 km ed una velocità massima di 80 km/h.



#### 2001- FCHV-BUS1

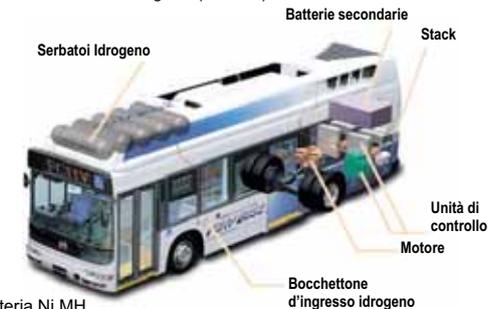
Potenza: 160kW (stack Toyota) / batteria Ni MH  
Autonomia: 300 km  
Velocità max: 80 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)

A settembre dell'anno successivo era stato presentato l'FCHV-BUS2. L'autobus, ottenuta l'omologazione da parte del Ministero del Territorio, Trasporto ed Infrastrutture, era stato sottoposto ad una serie di prove su strada:



#### 2002 - FCHV-BUS2

Potenza: 180kW (2 stack Toyota) / batteria Ni MH  
Autonomia: 300 km  
Velocità max: 80 km/h  
Combustibile: idrogeno (350 bar)



- il veicolo è stato provato nell'area di Tokyo su due diversi tragitti, nel periodo agosto 2003 - dicembre 2004 (percorsi in totale 17.400 km);
- otto FCHV-BUS2 sono stati usati all'Esposizione Mondiale che si è tenuta a Aichi in Giappone nel 2005, come mezzi di collegamento tra i centri espositivi di Nagakute e Seto. Gli autobus sono rimasti in servizio per l'intera durata dell'Expo (185 giorni) percorrendo in totale 124.500 km e trasportando circa 1 milione di passeggeri;
- da marzo 2006, al Central Japan International Airport (Centrair) di Nagoya, tre autobus vengono impiegati per trasferimenti all'aeroporto e per il trasporto passeggeri dal terminal alle piste.

Parte di queste attività rientrano nel quadro del Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project del METI.

### UTC Power / Sun Line Transit e AC Transit

La SunLine (Thousand Palms) dopo aver sperimentato il ZeBus, nell'ottobre 2002 ha preso in consegna un autobus, il ThunderPower, alimentato con un'unità PEFC da 75 kW prodotta dalla UTC Power. Il veicolo, realizzato dalla Thor Industries in collaborazione con l'ISE Research, era alimentato ad idrogeno compresso (250 bar), presentava un'autonomia di 320 km e una velocità massima di 105 km/h. Si trattava di un veicolo in configurazione ibrida in cui la cella era affiancata da un pacco batterie.



Thor ThunderPower Bus della SunLine Transit

A dicembre 2005, la SunLine ha posto in servizio un secondo prototipo ibrido realizzato utilizzando come base un veicolo della società belga Van Hool. Sull'autobus è montato un modulo PureMotion da 120 kW della UTC Power integrato in un sistema di azionamento elettrico realizzato dalla ISE Corporation.

Le attività della SunLine sono svolte in stretta connessione con quelle della Alameda Contra Costa Transit (AC Transit, Oakland), che nel marzo 2006 ha messo in servizio tre autobus dello stesso tipo. Le due aziende stanno partecipando alle attività della California Fuel Cell Partnership. Quest'ultima che ha posto precisi obiettivi per gli autobus a celle a combustibile, richiede il raggiungimento, entro il 2010-2015, di costi pari a due volte quelli dei veicoli tradizionali ed una durata degli stack di sei anni.

I risultati dei test su strada condotti dalla AC Transit e dalla SunLine sono stati raccolti ed analizzati dal NREL per DoE ed erano relativi a:

- Costi, autonomia e consumi di combustibile
- Affidabilità dello stack
- Disponibilità del mezzo (ore di esercizio)
- Attività di formazione del personale
- Accettabilità da parte del pubblico e aspettative in termini di prestazioni
- Sicurezza.



#### 2005 - Autobus AC Transit e SunLine Transit

Potenza: 120 kW (sistema PureMotion 120 UTC Power)  
95 kW batteria ZEBRA (3 batterie NiNaCl da 32 kW)  
Autonomia: 480 km  
Combustibile: idrogeno (350 bar, 50 kg)

Si ricorda che NREL si occupa di monitorare anche le attività dimostrative eseguite dalla Santa Clara VTA che, come abbiamo visto, ha in corso test su autobus Gillig che utilizzano sistemi

Ballard e quelle condotte presso la Base Hickam dell'Air Force nelle Hawaii dove opera un autobus realizzato da Hydrogenics ed Enova.

La UTC Power in collaborazione con la Van Hool ha infine realizzato un autobus ibrido che ha consegnato alla DeLijn, agenzia di trasporto belga. L'autobus, dello stesso tipo di quelli in servizio alla AC Transit e alla SunLine, opererà in Belgio per sei mesi poi sarà consegnato ad altre aziende di trasporto in Europa. Un sistema della UTC Power è stato installato anche sul autobus realizzato dal Centro Ricerche Fiat nell'ambito del Progetto Irisbus, che sarà descritto in seguito.

**Autobus a celle a combustibile - Quadro riassuntivo delle principali attività dimostrative**

Progetto	Sito / Operatore	No autobus	Costruttore cella	Potenza PEFC	Costruttore autobus	Combustibile	Data di avvio	Stato dimostrazione
<b>STATI UNITI</b>								
California Fuel Cell Partnership	Santa Clara / Santa Clara VTA	3	Ballard	205 kW	Gillig	Idrogeno (350 bar)	2004	In corso
	Oakland / AC transit	3	UTC Power	120 kW	Van Hool	Idrogeno (350 bar)	2005	In corso
	Palm Springs / Sunline Transit	1	UTC Power	120 kW	Van Hool	Idrogeno (350 bar)	2005	In corso
Federal Transit Administration - Automotive Based Fuel Cell Hybrid Bus	Honolulu / Hickam Air Force Base	1	Hydrogenics	65 kW	El Dorado	Idrogeno (350 bar)	2004	In corso
Federal Transit Administration - Washington Metropolitan Area Transit Authority Project	Washington, D.C WMATA	4	UTC Power	120 kW		Idrogeno	2006	
Federal Transit Administration - Georgetown FC Bus Programme	Washington, D.C	1	Ballard	100 kW	NovaBus	Metanolo	2001	In corso
	Washington, D.C	1	Ballard	100 kW		Metanolo		(Sviluppo unità PEFC)
ISE Research / UTC Power	Thousand Palms Sunline Transit	1	UTC Power		ThunderPower	Idrogeno (250 bar)	2002	Completato
<b>CANADA</b>								
Natural Resources Canada Fuel Cell Program	Winnipeg / Winnipeg Transit	1	Hydrogenics	180 kW	New Flyer	Idrogeno	2004	Completata
	Whistler / BC Transit	20	Ballard	130 kW	New Flyer	Idrogeno (350 bar)	2008	Flotte in servizio dal 2009
<b>BRASILE</b>								
United Nations Development Program Global Environment Facility (GEF) – Fuel Cell Bus Demonstration Project	São Paulo / São Paulo Metropolitan Urban Transport Co.	5	Ballard	130 kW	Marcopolo	Idrogeno	2006	Primo autobus in esercizio dal novembre 2007
<b>ASIA</b>								
Japan Fuel Cell Bus Programme (JHFC Project)	Tokyo	1	Toyota	180 kW	Hino Motor	Idrogeno (350 bar)	2003	Completata
	Aichi	8	Toyota	180 kW	Hino Motor	Idrogeno (350 bar)	2005	Completata
	Nagoya – Central International Airport (Centrair)	3	Toyota	180 kW	Hino Motor	Idrogeno (350 bar)	2006	In corso
Programma 863 (MOST)	Pechino	2	Shanghai Shen-Li High Tech, Dalian Sunrise Power	150 kW		Idrogeno	2005	In corso
	Olimpiadi 2008			150 kW				Flotte in servizio nel 2008
United Nations Development Program Global Environment Facility (GEF) – Fuel Cell Bus Demonstration Project	Pechino, Shanghai	3	Ballard	205 kW	Daimler EvoBus	Idrogeno (350 bar)	2006	In corso
<b>AUSTRALIA</b>								
Sustainable Transport Energy for Perth (STEP)	Perth Central Area Transit	3	Ballard	205 kW	Daimler EvoBus	Idrogeno (350 bar)	2004	Prosegue in HyFLEET
<b>EUROPA</b>								
Clean Urban Transport for Europe (CUTE)	9 città in Europa – vari operatori	27	Ballard	205 kW	Daimler EvoBus	Idrogeno (350 bar)	2004	Completata
Ecological City Transport System (ECTOS)	Reykjavik, Islanda / Icelandic New Energy	3	Ballard	205 kW	Daimler EvoBus	Idrogeno (350 bar)	2004	Prosegue in HyFLEET
Progetto HyFLEET:CUTE	7 città europee + Pechino e Perth	27	Ballard	205 kW	Daimler EvoBus	Idrogeno (350 bar)	2006	In corso
Progetto ARGEMUC (II fase)	Aeroporto di Monaco	1	Ballard	65 kW	MAN	Idrogeno (350 bar)	2004	In corso
Progetto HyCHAIN-Minitrans	Nord Reno – Westfalia	10	Hydrogenics	12 kW	Tecnobus	Idrogeno	2006	In corso
(Programma ZIP - Ministero dell'Economia e del Lavoro)	Berlino	2	Proton Motor	77 Kw	Mercedes	Idrogeno liquido	2006	Prototipo autobus
Irisbus – CityCell Project	Torino	1	UTC Power	75 kW	Irisbus	Idrogeno (250 bar)	2002	Completata
Proton Motor	Barth	1	Proton Motors	50 kW	Neoplan	Idrogeno (200 bar)	2006	In corso
ISE Research/ UTC Fuel Cells / Van Hool	Belgio / DeLijn	1	UTC Power	120 kW	Van Hool	Idrogeno	2007	In corso
ISE Research/ Ballard Power Systema London Hydrogen Transport Program	Londra	5	Ballard	75 kW	Wrightbus,	Idrogeno compresso		Flotta in servizio dal 2009
Hydrogenics	Saragozza /Esposizione internaz.EXPOAQUA	3	Hydrogenics	25 kW	Tecnobus	Idrogeno compresso		Flotta in esercizio nel 2008

## PRINCIPALI PROGETTI DIMOSTRATIVI

### California Fuel Cell Partnership (CaFCP)

Nell'aprile 1999 si è costituita la California Fuel Cell Partnership, fondata da California Air Resources Board, California Energy Commission, South Coast Air Quality Management District, DaimlerChrysler, Ford, Ballard Power Systems, BP, ChevronTexaco e Shell. La Partnership, finalizzata a promuovere la commercializzazione di veicoli a celle a combustibile alimentati a idrogeno, conta oggi 21 membri effettivi e 13 membri associati tra costruttori automobilistici, produttori di celle a combustibile, società petrolifere e di trasporto, fornitori di idrogeno ed agenzie governative.

Obiettivo del gruppo è quello di:

- provare la tecnologia dei veicoli a celle a combustibile nelle condizioni reali di guida
- dimostrare la fattibilità di un'integrazione di combustibili alternativi, come l'idrogeno, nelle attuali infrastrutture di distribuzione
- definire i passi necessari ad avviare la commercializzazione di questi veicoli, identificando potenziali problemi e studiando le soluzioni
- creare condizioni per conquistare consenso da parte dell'opinione pubblica.

Finora sono stati provati su strada circa 175 veicoli tra cui nove autobus, sono operative 25 stazioni di rifornimento di idrogeno ed altre 14 sono in fase di costruzione. Obiettivo è quello di portare in circolazione 300 veicoli entro il 2012.

Si ricorda che, in California, i Clean Air Act Amendments del 1990 avevano stabilito normative molto restrittive per le emissioni inquinanti al fine di ridurre l'immissione nell'aria di sostanze come ossidi di azoto, ossido di carbonio ed idrocarburi incombusti. L'Air Resources Board della California, autorità responsabile della qualità dell'aria dello stato, aveva varato lo Zero Emission Vehicle Mandate. Il mandato imponeva alle aziende automobilistiche che una parte di autovetture e veicoli commerciali venduti nello stato fosse ad "emissioni zero", al 2003 la percentuale di questi veicoli doveva essere pari al 10%. Limiti tecnologici ed elevati costi hanno ostacolato l'introduzione di questo tipo di veicoli e hanno portato a modificare la normativa e a renderla più realistica.

All'iniziativa legislativa dello stato della California va comunque riconosciuto il merito di aver sollecitato le maggiori case automobilistiche ad investire in tecnologie di propulsione alternative al motore a combustione interna, e di aver favorito l'avvio di ampi programmi di ricerca e sviluppo di veicoli a celle a combustibile.

### Controlled Hydrogen Fleet and Infrastructure Demonstration and Validation Project

Il Controlled Hydrogen Fleet and Infrastructure Demonstration and Validation Project, che rientra tra le attività del HFCIT Programme promosso dal DoE, prevede la dimostrazione di infrastrutture idrogeno e di veicoli a celle a combustibile. Saranno provati su strada circa 130 veicoli e costruite 26 stazioni di rifornimento.

Nel 2004 sono stati avviati quattro sottoprogetti, di durata quinquennale, che vedono la partecipazione delle principali aziende automobilistiche ed energetiche che operano nel settore.

Per quanto riguarda le prestazioni, sono stati stabiliti specifici obiettivi da raggiungere entro il 2009, questi saranno impiegati per valutare i progressi fatti dalla tecnologia e le informazioni ottenute saranno utilizzate dal DoE per focalizzare meglio le future attività di ricerca e sviluppo, per arrivare ad ottenere prodotti con requisiti adatti all'entrata nel mercato, prevista intorno al 2015.

Gli obiettivi fissati sono i seguenti:

- Al 2009, veicoli con oltre 400 km di autonomia e 2.000 ore di durata dello stack; costo dell'idrogeno alla stazione di servizio 3 \$/kg (escluse tasse)
- Al 2015, veicoli con 480 km di autonomia e 5.000 ore di durata dello stack (corrispondenti a circa 160.000 km di percorrenza); costo dell'idrogeno alla stazione di servizio 2-3 \$/kg (escluse tasse).

A ottobre 2007 risultavano operativi 77 veicoli e 14 stazioni di rifornimento; la flotta aveva percorso in totale circa 1.287.500 km.



#### Membri

- Daimler AG
- Chrysler
- Ford
- General Motors
- Honda
- Hyundai
- Nissan
- Toyota
- Volkswagen
- Ballard Power Systems
- UTC Power
- California Air Resources Board
- California Energy Commission
- National Automotive Center
- South Coast Air Quality Management District
- U.S. Department of Energy
- U.S. Department of Transportation
- U.S. Environmental Protection Agency
- BP
- Chevron
- Shell Hydrogen

#### Membri associati

- AC Transit
- Air Products and Chemicals
- Hydrogenics Corporation
- ISE Corporation
- Pacific Gas & Electric
- Praxair
- Proton Energy Systems
- Powertech Labs
- Santa Clara VTA
- Sunline Transit Agency
- ZTEK Corp.
- UC Davis Institute of Transportation Studies
- NFCRC- UC davis

#### Partecipanti al progetto

##### Daimler AG \*

- 30 veicoli (27 F-Cell, 3 Sprinter van)

##### BP, DTE, NextEnergy

- 8 stazioni di rifornimento (California e Michigan)

##### Ford Motor \*

- 26 veicoli (Focus FVC)

##### BP

- 7 stazioni di rifornimento (California, Florida e Michigan)

##### General Motors \*

- 40 veicoli (Hydrogen3)

##### Shell Hydrogen LLC

- 5 stazioni di rifornimento (Washington D.C., New York, California e Michigan)

##### Hyundai Motor- Kia Motors

- 32 veicoli (Hyundai Tucson e Kia Sportage)

##### Chevron Technology Ventures LLC \*

- 6 stazioni di rifornimento (California)

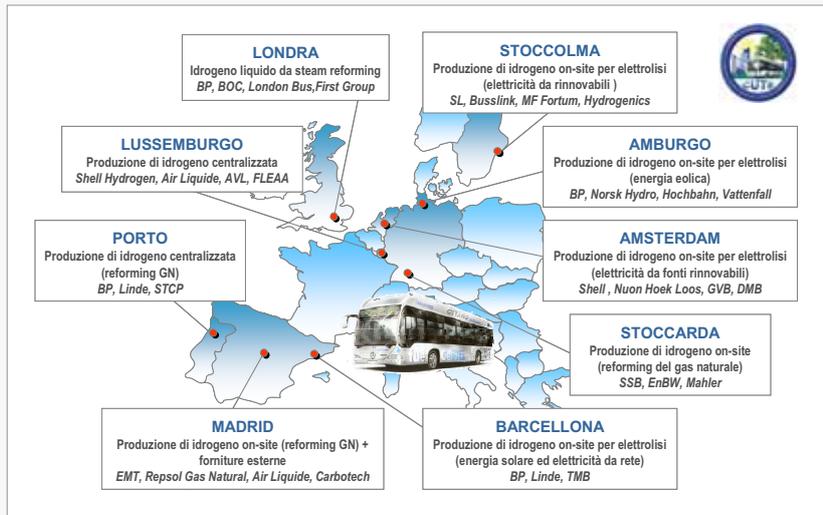


\* Coordinatore del progetto

## Clean Urban Transport for Europe (CUTE) Project

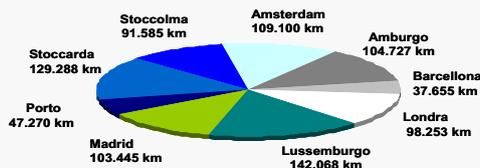
Il progetto Clean Urban Transport for Europe (CUTE), promosso dall'Unione Europea e finalizzato a dimostrare le potenzialità dell'idrogeno e della tecnologia delle celle a combustibile nel settore del trasporto, ha portato ad operare nel trasporto pubblico di nove città europee (Amsterdam, Amburgo, Barcellona, Londra, Lussemburgo, Madrid, Porto, Stoccarda e Stoccolma) ventisette autobus Mercedes Benz Citaro. Le attività avviate nel febbraio 2002 e si sono concluse nel 2006.

Nelle diverse città sono state realizzate le infrastrutture necessarie per la produzione e la distribuzione dell'idrogeno. Quest'ultimo era prodotto con modalità differenti, a partire sia da fonti fossili che rinnovabili, al fine di consentire una comparazione dei vantaggi e degli svantaggi delle diverse soluzioni in esame.

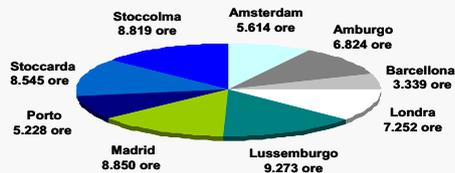


Gli autobus, valutati in città con condizioni climatiche, topografiche e di traffico profondamente differenti, nei due anni di esercizio hanno percorso in totale oltre 860.000 km ed operato per circa 63.700 ore, durante le quali hanno trasportato più di 4 milioni di passeggeri. Tutti gli autobus hanno dimostrato buona affidabilità e prestazioni superiori alle aspettative, anche se la tecnologia richiede ulteriori miglioramenti, così come le tecnologie di rifornimento che vanno rese più efficienti.

Chilometri percorsi nelle diverse città



Ore di esercizio nelle diverse città



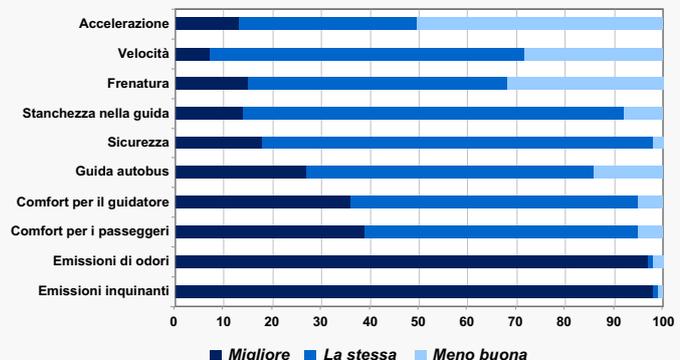
Alcuni risultati del progetto CUTE

	Velocità media (km/h)	Consumo medio idrogeno (kg/100km)	Equivalenti diesel (L/100km)	Disponibilità (%)
Amsterdam	18,1	21,6	71,8	86,3
Amburgo	16,2	20,4	67,8	78,7
Barcellona	12,9	27,4	91,0	60,1
Londra	13,9	24,0	79,7	88,2
Lussemburgo	17,9	20,9	69,4	79,7
Madrid	13,8	28,8	95,7	79,4
Porto	8,9	30,0	99,7	80,3
Stoccarda	11,4	22,1	73,4	99,6
Stoccolma	9,7	26,6	88,4	89,9
<b>Media CUTE</b>	<b>13,6</b>	<b>24,6</b>	<b>81,9</b>	<b>82,5</b>

Sono state inoltre valutate le opinioni dei guidatori degli autobus, relativamente a prestazioni, modalità di guida, sicurezza, comfort, praticità del veicolo. Le risposte raccolte nelle città di Amburgo, Londra, Lussemburgo e Stoccolma, hanno indicato, che a parte l'accelerazione, le caratteristiche degli autobus sono percepite simili, se non migliori di quelle degli autobus tradizionali.

E' stato inoltre provato che i rischi collegati all'idrogeno possono essere convenientemente gestiti, dal momento che durante i due anni di dimostrazione non si sono verificati incidenti correlati alla sicurezza.

Opinioni dei guidatori relative ad alcune caratteristiche degli autobus



Il progetto CUTE è stato svolto in parallelo ed in stretta connessione con il progetto comunitario ECTOS (Ecological City Transport System) e con il progetto STEP (Sustainable Transport Energy). Alcune delle città che hanno partecipato al Progetto CUTE hanno proseguito la sperimentazione degli autobus nel quadro del progetto HyFLEET:CUTE.

### Ecological City Transport System (ECTOS) Project

Nel febbraio 1999, l'Islanda aveva annunciato un ambizioso piano a lungo termine volto a trasformare la propria economia nella prima al mondo basata sull'idrogeno per liberarsi dalla dipendenza dalle fonti fossili. Per la realizzazione di questo programma era stata creata la Icelandic New Energy, joint-venture composta da VistOrka, Daimler, Shell Hydrogen e Norsk Hydro. Obiettivo del gruppo era quello di giungere, nell'arco di 20 anni, ad una completa gestione dell'economia del Paese con idrogeno.

Il progetto ECTOS s'inseriva nella prima fase di questo programma e prevedeva la sperimentazione a Reykjavik di tre autobus (corrispondenti al 4% di tutta la flotta di autobus della città) dello stesso tipo di quelli utilizzati nel progetto CUTE. All'interno del progetto la Shell Hydrogen ha realizzato una stazione di rifornimento, in cui l'idrogeno è prodotto localmente per elettrolisi (elettrolizzatore alcalino della Norsk Hydro).

Parallelamente a quest'attività sono stati effettuati studi di carattere socio-economico, che dovevano consentire di porre le basi per una graduale sostituzione dell'intera flotta di autobus del Paese. Le fasi successive del programma prevedono la sperimentazione di auto ad idrogeno per poi introdurli nel trasporto privato ed infine la dimostrazione e valutazione di battelli con propulsione ad idrogeno, in vista della sostituzione dell'attuale flotta di pescherecci.

Le attività del progetto ECTOS si sono chiuse formalmente nell'agosto 2005, i tre autobus hanno tuttavia continuato ad operare all'interno del progetto HyFLEET:CUTE. Gli autobus hanno:

- percorso oltre 125.000 km in 7.250 ore di esercizio;
- consumato circa 25.000 kg di idrogeno;
- ridotte le emissioni di gas serra di oltre 200 tonnellate e risparmiati circa 700.000 litri di diesel.



### Sustainable Transport Energy (STEP) Project



Il Progetto STEP promosso dal governo australiano nel quadro delle iniziative finalizzate ad incoraggiare lo sviluppo di combustibili a basso impatto ambientale per il trasporto, prevedeva la dimostrazione di tre autobus Citaro nel trasporto pubblico della città di Perth. Gli autobus sono stati in servizio, dall'autunno 2004, per cinque giorni a settimana (8-10 ore al giorno) su tre diversi percorsi. Il programma di prove si è concluso nel settembre 2007. L'attività ha avuto lo scopo di raccogliere informazioni e dati relativi al funzionamento degli autobus, delle celle a combustibile e delle infrastrutture di distribuzione idrogeno, e di confrontarli con quelli di progetti simili svolti in altre parti del mondo.

Il progetto includeva anche analisi volte a valutare l'opinione corrente sull'idrogeno e l'atteggiamento degli utenti rispetto alla possibilità di impiego delle celle a combustibile nel settore del trasporto pubblico.

### HyFLEET:CUTE Project

Il progetto HyFLEET:CUTE è inserito nell'ambito dell'iniziativa *Hydrogen for Transport*, promossa dalla Commissione Europea, che porterà in circolazione circa duecento veicoli a idrogeno nell'arco di tre anni. L'iniziativa, include oltre a HyFLEET anche i progetti Zero Regio, HYCHAIN, PREMIA e HyLights.

All'interno del progetto HyFLEET:CUTE, in dieci città distribuite su tre continenti si stanno provando 47 veicoli a idrogeno, alimentati sia con celle a combustibile che con motore a combustione interna. Nello specifico le attività del progetto riguardano:

- la dimostrazione di 33 autobus Mercedes Benz Citaro con sistema di propulsione a celle a combustibile nelle città di Amburgo, Amsterdam, Barcellona, Londra, Lussemburgo, Madrid, Reykjavik, Pechino e Perth;

Le flotte utilizzate nelle città europee sono quelle poste in servizio nell'ambito dei progetti CUTE ed ECTOS. I veicoli delle città (Porto e Stoccarda) che hanno deciso di non proseguire nella dimostrazione sono stati trasferiti ad Amburgo, dove la flotta è quindi costituita da nove autobus;

- la dimostrazione a Berlino di 14 autobus a idrogeno della MAN, alimentati con motore a combustione interna che saranno inseriti nella flotta dell'azienda di trasporti pubblici Berliner BVG. I primi due autobus sono entrati in servizio in occasione dei Mondiali di Calcio 2006;
- il miglioramento delle stazioni di rifornimento idrogeno esistenti e la realizzazione a Berlino di una nuova struttura in grado fornire idrogeno prodotto da reforming del GPL (sostituito in seguito da dimetiletere prodotto da biomasse);
- la progettazione e realizzazione di autobus a idrogeno di nuova generazione, che saranno di tipo ibrido, in cui la cella sarà affiancata da batterie litio-ione.



- Daimler AG, DE  
(Coordinatore del progetto)
- Autobus de la Ville de Luxembourg, LU
- BVG Berlin, DE
- Empresa Municipal de Transportes de Madrid, ES
- GVB, NL
- Hamburger Hochbahn AG, DE
- London Bus Services Ltd., UK
- Transports de Barcelona S.A., ES
- EvoBus GmbH, DE
- MAN Nutzfahrzeuge AG, DE
- NEOMAN Bus, DE
- Air Liquide, FR
- BP Gas Marketing Ltd., UK
- Icelandic New Energy, IS
- Norsk Hydro ASA, NO
- Repsol YPF, ES
- Shell Hydrogen B.V., NL
- Hydrogenics Europe N.V., BE
- TOTAL Deutschland GmbH, DE
- China FCB Demonstr. Project Management Office, CHN
- Department for Planning and Infrastructure, Government of Western Australia, AU
- Euro Keys, BE
- Instituto Superior Técnico Univ. Técnica de Lisboa, PT
- MVV Consulting GmbH, DE
- PLANET, DE
- Technische Universität Berlin, DE
- Universität Stuttgart, DE
- University of Iceland, IS
- Vattenfall Europe Berlin, DE
- Vattenfall Europe Hamburg, DE

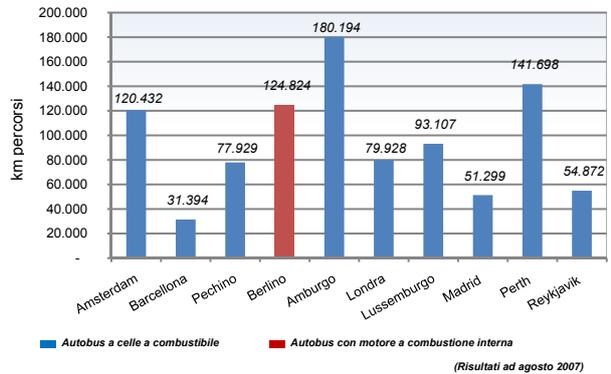
Durata: gen.2006 - sett.2009  
Costo: 43,16 M€ (Contributo CE: 19 M€)



La flotta di autobus a celle a combustibile, nel periodo gennaio 2006 - agosto 2007 aveva percorso in totale 830.850 km, la disponibilità media degli autobus è risultata del 91,6%. In Europa, le città di Amburgo ed Amsterdam hanno deciso di estendere la sperimentazione fino a gennaio 2008, così come Pechino e Perth.

La durata degli stack, includendo anche le ore di esercizio accumulate in CUTE, in molti casi ha superato le 4.000 ore che erano state fissate come obiettivo

**HYFLEET:CUTE - Chilometri percorsi nelle diverse città**



### Progetto Zero Regio

Il Progetto Zero Regio (Zero Emission Regional Project) è cofinanziato dalla Commissione Europea all'interno del Sesto Programma Quadro, ed è finalizzato allo sviluppo di veicoli a idrogeno e di infrastrutture per il loro rifornimento in due regioni europee: la Rhein-Main in Germania presso Francoforte e la Lombardia nell'area di Mantova.

La prima fase del progetto era rivolta alla costruzione delle strutture per il rifornimento di idrogeno, la successiva prevede la prova su strada di piccole flotte di veicoli. A Francoforte saranno sperimentate cinque Daimler F-Cell, mentre a Mantova opereranno tre FIAT Panda.

A Francoforte, per il rifornimento delle auto l'AGIP Deutschland ha realizzato una stazione di rifornimento del tipo MultiEnergy (attiva da novembre 2006). La stazione fornisce sia idrogeno compresso (350 e 700 bar) che idrogeno liquido, oltre che carburanti tradizionali. L'idrogeno arriva alla stazione attraverso un gasdotto che la collega al sito di produzione (presso uno stabilimento chimico della Hoechst).

Nella stazione di rifornimento di Mantova, aperta a settembre 2007, l'idrogeno nei primi mesi di esercizio verrà rifornito al distributore mediante pacchi bombole, successivamente sarà prodotto on-site da gas naturale, attraverso un reformer di piccole dimensioni. Come stabilito dal progetto nelle due stazioni gli erogatori per l'idrogeno sono stati integrati in stazioni di servizio di tipo tradizionale, dove è possibile rifornirsi anche di GPL e metano.



Infraserv GmbH & Co. Hoechst KG (Coordinatore del progetto)

- Regione Lombardia, I
- Città di Mantova, I
- Centro Ricerche FIAT, I
- EC-JRC, Ispra, I
- EniTecnologie, I
- Sapio, I
- Università Bocconi, I
- Agip Deutschland, DE
- Daimler AG, G
- Fraport A Frankfurt, DE
- Linde AG, DE
- TÜV Essen, DE
- Lund University, SE
- Roskilde University, DK
- Saviko Consultants, DK

Durata: 11 nov. 2004 - 10 nov 2009  
Costo: 21,39 M€ (Contributo CE: 7,46 M€)



Nell'ambito del progetto sono previste inoltre valutazioni socio-economiche e ambientali dell'uso di idrogeno come carburante alternativo per trasporti, saranno approfonditi gli aspetti di sicurezza ed individuati strumenti e modalità per una più rapida penetrazione in grandi aree urbane da parte dell'idrogeno.

### Clean Energy Partnership

La Clean Energy Partnership (CEP) è un consorzio, sostenuto dal governo federale tedesco, che vede diversi partner industriali impegnati nello sviluppo di tecnologie per l'utilizzo dell'idrogeno nel campo dell'autotrazione. Partecipano al progetto società petrolifere come Aral e Total, aziende interessate alla produzione, trasporto ed accumulo di idrogeno, quali Linde, Hydro/GHW e Vattenfall Europe, nonché le principali case automobilistiche tedesche (BMW Group, Daimler AG, Ford, GM/Opel e Volkswagen) e la Berliner Verkehrsbetriebe (BGV), azienda di trasporto pubblico di Berlino.



Scopo dell'iniziativa è di acquisire informazioni sull'idrogeno e sulle sue potenzialità come vettore energetico e di dimostrare la possibilità di un suo utilizzo come carburante nell'uso quotidiano. La durata del progetto CEP era inizialmente limitata alla fine del 2007, le attività, comunque, proseguiranno oltre questa data.

Nell'ambito dell'iniziativa a Berlino sono state poste in circolazione 17 autovetture a idrogeno, alimentate sia con motore a combustione interna, che con celle a combustibile. Le auto (dieci F-Cell della Daimler, tre Ford Focus FCEV, una HydroGen3 della Opel e una Touran HyMotion della Volkswagen e due Serie-7 con motore a combustione interna della BMW) sono state affidate a grandi società come Vattenfall, Ikea, Telecom e Hermes Logistik Group e all'Ufficio della Cancelleria.

La General Motors ha già annunciato che dalla metà del 2008 dieci veicoli Hydrogen4, prenderanno parte ad un programma di prove nell'ambito della seconda fase progetto, persone con differenti stili di guida utilizzeranno ogni giorno queste auto per valutarne l'adattabilità all'uso quotidiano.

Un altro aspetto importante dell'attività è quello di acquisire informazioni sulle modalità pratiche di approvvigionamento dell'idrogeno. A questo scopo a Berlino sono state costruite due stazioni di rifornimento pubbliche, la prima realizzata nel novembre 2004 dalla Aral a Messerdamm nell'area di Charlottenburg, l'altra costruita dal gruppo petrolchimico della Total operativa dal marzo 2006 a Berlino-Spandau. Quest'ultima viene utilizzata dalla BVG anche per alimentare gli autobus a idrogeno messi in servizio nell'ambito del progetto HyFLEET:CUTE.

### Progetto HYCHAIN-Minitrans

Il progetto HyChain-Minitrans finanziato dalla Commissione Europea, è quello di dimostrare il funzionamento di 158 veicoli a celle a combustibile di piccole dimensioni (midibus, utility vehicle, sedie a rotelle, scooter e tricicli) in quattro diversi paesi europei (Francia, Spagna, Germania e Italia), al fine di provare la fattibilità tecnica ed economica dell'utilizzo dell'idrogeno come carburante alternativo.

Scopo del progetto è quello di mettere i veicoli a disposizione del maggior numero possibile di utenti finali, al fine di creare un impatto rilevante in termini di esperienza e consenso sociale.

Il progetto, che si sviluppa nell'arco di cinque anni, è articolato in varie fasi: i primi due anni sono dedicati all'ottimizzazione ed omologazione dei veicoli e alla realizzazione delle infrastrutture necessarie al loro funzionamento; dal gennaio 2008 avranno inizio le prove in condizioni di utilizzo reale.

L'alimentazione dei 158 veicoli sarà assicurata da oltre 2.000 serbatoi di idrogeno realizzati da Air Liquide (cartucce idrogeno da 20 litri a 300 bar e bombole da 2 litri a 700 bar). Gli utenti non dovranno far altro che recarsi in uno dei punti di rifornimento previsti e sostituire i serbatoi vuoti con altri pieni, in modo semplice e sicuro grazie ad una tecnologia sviluppata e brevettata dalla stessa Air Liquide (denominata "Clip on").



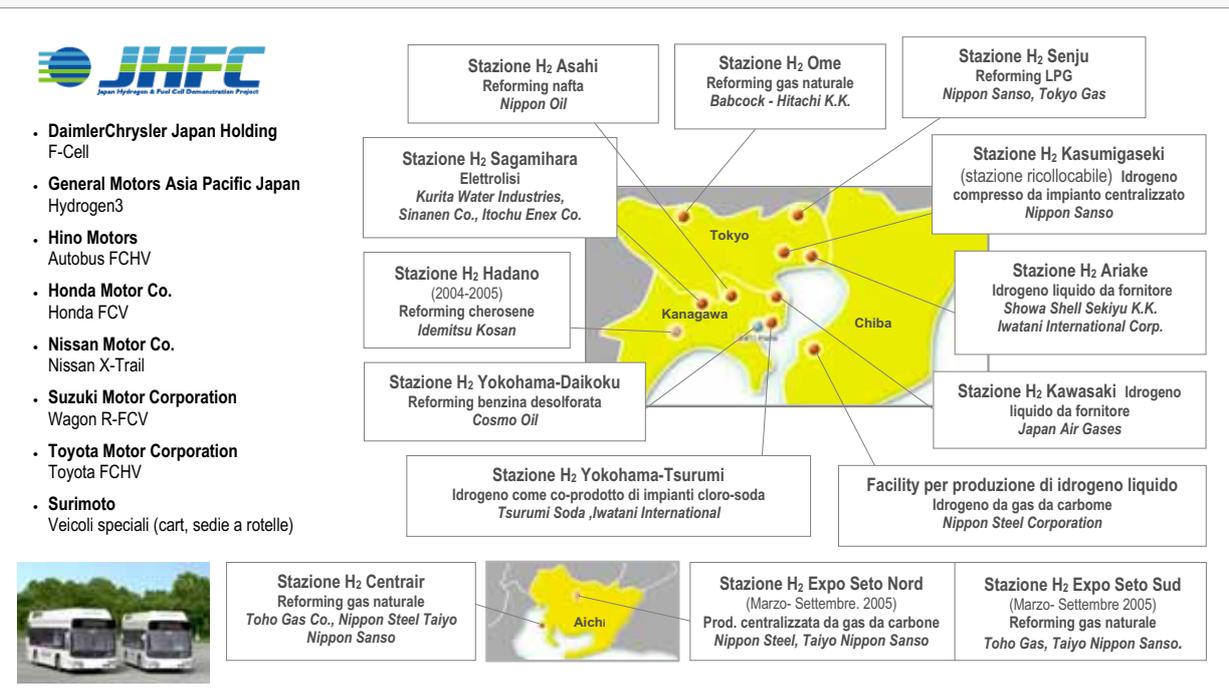
Durata: 2006 - 2010  
Costo: 37,65 ME (Contributo CE: 17 ME)

- 10 Midibus (PEFC Hydrogenics da 10 kW) in Germania
- 44 delivery van (PEFC Axane da 2,5 kW) in Italia
- 30 scooter (PEFC MES-DEA da 1 kW) in Spagna
- 34 sedie a rotelle (PEFC Axane da 350 W) in Germania Spagna e Italia
- 40 tricicli (PEFC Masterflex da 250 W) in Germania

Partecipanti: Axane (coordinatore), Air Liquide Germania, Air Liquide Italia, Air Liquide Spagna, Association de Surveillance et de Contrôle de la Pollution Atmosphérique, Besel S.A., CEA, Ediciones y servicios escolares Domenech SA, CIEMAT, Enkat GmbH, FAST, Iberdrola SA, Hydrogenics, Institut National de l'Environnement et des Risques, Institut National Polytechnique de Grenoble, Masterflex AG., Moroni Autoservicem, Nacional Motor S.A.U., PaxiTech S.A.S, Universidad San Pablo-CEU, Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie, WiN

### Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project (JHFC)

Il Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project, finanziato dal Ministero dell'Economia, del Commercio e dell'Industria Giapponese (METI) e sostenuto dal Japan Automobile Research Institute (JARI) e dall'Engineering Advanced Association of Japan (EAAS), ha lo scopo di promuovere lo sviluppo di veicoli a celle a combustibile alimentati idrogeno, dimostrandone potenzialità e affidabilità attraverso una serie di prove su strada.



Al progetto partecipano case automobilistiche (Daimler AG, General Motors, Hino, Honda, Nissan, Suzuki e Toyota) e diverse società che operano nel settore delle forniture di energia. Queste ultime hanno realizzato una serie di stazioni di rifornimento per l'uso dei veicoli nell'area di Tokyo e Yokohama. L'idrogeno, fornito in forme liquida o come gas compresso, viene prodotto con modalità diverse e a partire da combustibili differenti (GPL, benzina, metanolo nafta).

Durante la prima fase del progetto (2002-2005) sono circolati su strade pubbliche circa 60 veicoli. Nei 3 anni di esercizio su strada le flotte di autovetture e autobus hanno percorso in totale rispettivamente 84.339 km e 147.830 km e sono state raccolte informazioni relative a prestazioni di guida, affidabilità, consumi di energia ed impatto ambientale, nonché dati utili a stabilire normative e standard di sicurezza sia per i veicoli che per le stazioni di rifornimento.

La seconda fase del progetto (JHFC2) è stata avviata nel 2006 e avrà una durata di cinque anni. In questa fase le attività, inizialmente concentrate nell'area metropolitana di Tokyo, al JHFC Park di Yokohama e nelle prefettura di Aichi, saranno estese anche alle regioni di Chubu e Kansai. La dimostrazione sarà inoltre estesa a veicoli speciali, come piccoli motocicli e sedie a rotelle alimentati con celle a combustibile, e a veicoli a idrogeno con motore a combustione interna (BMW Hydrogen 7 e Mazda RX-8 Hydrogen RE).

Dopo la chiusura dell'Esposizione Universale che si è tenuta ad Alchi nel 2005 gli autobus usati per spostamenti all'interno dell'area espositiva sono stati trasferiti all'aeroporto internazionale Centrair di Nagoya dove stanno operando dal luglio 2006. La stazione di rifornimento dell'aeroporto è stata costruita utilizzando i componenti di una delle stazioni realizzate per l'Expo.

### **SINERGY Project**

Nel quadro del programma SINERGY (Singapore Initiative in Energy Technology), che è gestito dall'EDB (Economic Development Board) del Ministero dell'Ambiente e dalla Land Transport Authority ed è finalizzato allo sviluppo di nuove tecnologie nel campo dell'energie alternative, a Singapore sono state sperimentate su strada (lug. 2004 - lug. 2006) sei vetture F-Cell. Le auto erano state consegnate al Ministero dell'Ambiente, alla BP Singapore, Lufthansa, Michelin, al Conrad Hotel ed alla Daimler di Singapore.

Per alimentazione di questi veicoli, la BP, in collaborazione con la società Air Products, aveva realizzato due stazioni di rifornimento, la prima forniva idrogeno inviato da un impianto di reforming del gas naturale di tipo centralizzato, nell'altra era ottenuto localmente per elettrolisi dell'acqua.



**Stazione idrogeno BP (Singapore)**

### **GEF Fuel Cell Bus Demonstration Project**

Un'iniziativa dell'UNDP (Programma delle Nazioni Unite per lo Sviluppo) e del GEF (Global Environment Facility, fondo globale dell'ambiente) costituito dalla Banca Mondiale, promuove in grandi metropoli di paesi in via di sviluppo (Cina e Brasile) l'adozione di autobus alimentati con celle a combustibile allo scopo di abbassare il livello di inquinamento dell'aria e delle emissioni dei gas ad effetto serra.

Il programma, di durata quinquennale, prevede la dimostrazione di autobus alimentati a idrogeno nelle città di Pechino, Shanghai e San Paolo, al fine di valutarne l'efficienza dal punto di vista tecnologico. Le attività sono condotte in collaborazione con industrie private e organizzazioni governative nazionali e locali. Inizialmente erano state previste attività dimostrative anche a Il Cairo, Nuova Delhi e Città del Messico, queste sono state in seguito cancellate con diverse motivazioni.

In Cina, il progetto è iniziato alla fine del 2003, in seguito è stato siglato un accordo con la Daimler per la fornitura di tre autobus Mercedes Benz Citaro. Gli autobus, che sono stati presentati ufficialmente a Pechino nel novembre 2005 in occasione del "4th International Clean Vehicle Technology Conference and Exhibition", sono stati quindi affidati all'azienda di trasporto pubblico Beijing Public Transport Corp.. I tre veicoli sono entrati in servizio di linea nel giugno 2006, un mese dopo a Pechino è divenuta operativa una stazione di rifornimento idrogeno costruita da Beijing SinoHytec, BP e Beijing Tongfang Co.

In una seconda fase che si concluderà nel 2010, le attività dimostrative saranno estese alla città di Shanghai. Oltre alle attività svolte all'interno di questo progetto a Shanghai si sta lavorando per creare una rete di infrastrutture idrogeno per rifornire una serie di autobus che saranno utilizzati nel corso dell'Esposizione Universale che si terrà in questa città nel 2010.

In Brasile, le attività del progetto UNDP/GEF, che è cofinanziato dal Ministero dell'Energia e dalla società di trasporti pubblici di San Paolo EMTU/SP, sono condotte da un consorzio di aziende che comprende: NuCellSys, Ballard Power Systems, Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo, EPRI International, Marcopolo S.A., Petrobras Distribuidor., Hydrogenics e Tuttotrasporti Comércio de Veículos e Implementos Rodoviários. Il primo prototipo dovrebbe entrare in servizio entro il 2007. Si tratta di un veicolo ibrido da 12 metri alimentato da un sistema PEFC da 210 kW e con un'autonomia di 300 km.

## PROSPETTIVE DI MERCATO DEI VEICOLI A CELLE A COMBUSTIBILE

Le stime delle dimensioni del mercato dei veicoli a celle a combustibile sono significativamente diverse tra loro. Analisi condotte in questo settore fanno comunque prevedere che, anche in presenza di una penetrazione molto graduale, considerata l'ampiezza del mercato automobilistico, potrebbero raggiungersi nell'arco di pochi anni livelli di produzione interessanti.

Studi condotti dall'Allied Business Intelligence (ABI) società americana che effettua analisi di mercato, indicano che dal 2012 potrebbero entrare in circolazione 800.000 veicoli con celle a combustibile. La Daimler ha dichiarato che sarà in grado di vendere 100.000 veicoli per anno dal 2015.

Il gruppo General Motors ha annunciato che la divisione ricerche FCA (Fuel Cell Activities), cui fanno capo oltre 600 impiegati, sarà integrata nell'organizzazione per lo sviluppo dei modelli di serie. Un primo passo verso la produzione in serie di veicoli a celle combustibile. Oltre 400 ingegneri seguiranno lo sviluppo nell'ambito dell'organizzazione Powertrain ed altri 100 inizieranno invece a studiare l'integrazione delle celle sui futuri modelli che verranno proposti. GM ritiene di poter avviare la commercializzazione entro il 2010-2015 e di poter raggiungere la piena commercializzazione dal 2025.

Nonostante i recenti progressi ottenuti dalle maggiori case automobilistiche, occorreranno comunque diversi anni prima che auto con celle a combustibile divengano prodotti di ampio consumo. È necessario, infatti, risolvere diversi problemi di ordine tecnico ed economico: occorre creare una diffusa rete di distribuzione e rifornimento d'idrogeno e tecnologie idonee a accumularlo in modo affidabile e sicuro a bordo del veicolo, raggiungere durate dello stack dell'ordine delle 5.000 ore e non ultimo arrivare ad ottenere costi compatibili con il mercato dei trasporti.

Il costo di un motore a combustione interna è di 25-35 \$/kW, per i sistemi con celle a combustibile il DoE fissa obiettivi di costo di 45 \$/kW dal 2010 e di 30 \$/kW dal 2015. Attualmente, con bassi volumi di produzione e componenti fabbricati con tecniche manuali, si riportano costi superiori a 4.000 \$/kW. Ballard dichiara che con la sua tecnologia, e per produzioni di 500.000 unità/anno, si potrebbero ottenere costi dell'ordine di 103 \$/kW.

Organizzazione	Anno di commercializzazione	Note
<b>Daimler AG</b>	2012 2015-2020	Primo mercato (10.000 veicoli/anno) Produzione di massa
<b>General Motors</b>	2010-2015 2025	Primo mercato Piena commercializzazione
<b>Ford Motors</b>	2015-2020	Veicoli pronti per la commercializzazione
<b>Honda Motor</b>	2015 2020	Precommercializzazione Produzione di 50.000 veicoli/anno in USA
<b>Toyota</b>	2015	

## LA SCELTA DEL COMBUSTIBILE

Il combustibile da utilizzare in un veicolo a celle a combustibile deve possedere caratteristiche tecniche e di sicurezza, tali da consentire prestazioni e funzionalità almeno analoghe a quelle di un veicolo convenzionale. Si richiede:

- densità di energia più elevata possibile, in modo che pesi ed ingombri a bordo del veicolo risultino ridotti al massimo;
- facilità di produzione, accumulo e distribuzione;
- larga disponibilità e costi ragionevoli;
- tossicità e pericolosità equivalente a quella dei combustibili tradizionali.

Bisogna osservare che la scelta è determinata, oltre che da fattori tecnici, anche da valutazioni di politica energetica.

Combustibile ideale per le celle ad elettrolita polimerico è l'**idrogeno**, che assicura alle stesse le migliori prestazioni e consente di realizzare sistemi di propulsione relativamente semplici ed in grado di garantire un impatto ambientale praticamente nullo nel punto d'uso. Attualmente l'utilizzo dell'idrogeno su ampia scala presenta problemi connessi con la sua disponibilità a costi contenuti, l'accumulo a bordo del veicolo, la creazione di adeguate infrastrutture di distribuzione ed aspetti di sicurezza ed accettabilità da parte degli utenti.

In un veicolo elettrico a celle a combustibile, l'idrogeno può essere accumulato a bordo o prodotto da altri combustibili (metanolo, benzina, distillati leggeri) attraverso un reformer installato sul veicolo. Esperti del settore ritengono che l'utilizzo diretto di idrogeno sia al momento la soluzione da preferirsi, poiché i progressi ottenuti nello sviluppo di reformer da impiegare a bordo non sono quelli sperati.

Tra le industrie automobilistiche solo Renault, in collaborazione con la Nuvera Fuel Cells, prosegue studi in questo settore. Il DoE ha smesso di finanziare lo sviluppo di reformer a benzina nel 2004, quando è divenuto chiaro che non si sarebbero ottenuti benefici in termini di prestazioni e di riduzione delle emissioni, rispetto a quanto ottenibile da veicoli ibridi con motore a combustione interna e che i sistemi sarebbero risultati comunque più complessi e costosi. Il solo vantaggio connesso ad una simile scelta sarebbe stato quello di poter utilizzare infrastrutture di distribuzione esistenti.

**Sistema di reforming da 50 kW (benzina)**  
Stato della tecnologia nel 2004, criteri Go/No-Go ed obiettivi finali del Programma DoE

Caratteristica	Criteri Go/No-Go 2004	Stato tecnologia feb. 2004	Obiettivo finale	Probabilità di raggiungimento obiettivo finale
Durata, h	2.000	1.000	5.000 (20.000 start-up)	Alta
Densità di potenza, W/L	700	700	2.000	Media
Efficienza, %	78	78	> 80	Alta
Energia di avviamento, MJ/50 kW	< 2	7	< 2	Bassa
Tempo di start-up (+20°C)	< 60 al 90% della potenza	600	< 30 a 90% < 2 a 10%	Bassa
Risposta nei transitori, s (10%- 90% potenza max)	< 5	10	< 1	Bassa
Contenuto di zolfo, ppb	< 50	130	< 10	Media
Costo, \$/kW	na	65	< 10	Bassa

Altra soluzione presa in esame è stata quella rappresentata dal **metanolo**. Rispetto alla benzina, quest'ultimo mostra una serie di vantaggi, importante soprattutto il fatto che può essere convertito in idrogeno a temperature notevolmente più basse (250-300 °C contro 800-900 °C); caratteristiche importanti dal punto di vista della sicurezza sono una più bassa volatilità ed un più alto limite d'infiammabilità inferiore. Il metanolo è inoltre un prodotto chimicamente stabile, facile da trasportare, che presenta una buona densità di energia, il che consentirebbe al veicolo un'autonomia simile a quella dei veicoli tradizionali. Tuttavia bisogna ricordare che si tratta di un prodotto tossico e che la sua natura corrosiva lo rende incompatibile con le infrastrutture di distribuzione esistenti.

**Caratteristiche chimico-fisiche di idrogeno, metanolo e benzina**

	Idrogeno	Metanolo	Benzina
Peso molecolare	2,016	32,04	100-105
Densità del liquido (g/L <sup>-1</sup> )	71	791	73
Punto di ebollizione, °C	-253	64,7	27-225
Energia minima per l'ignizione, mJ	0,02	0,14	0,24
Coefficiente di diffusione, cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	0,61	0,0042	0,05
Limiti d'infiammabilità in aria, %vol	4-75	6-36,5	1-7,6
Intervallo di detonabilità in aria, %vol	18,3-59	6-36	1,1-3,3
Temperatura di ignizione, °C	585	464	257
Temperatura di fiamma, °C	2045	1870	2030
Velocità di galleggiamento in aria, m/s	1,2-9,0		nessuna

Con il metanolo c'è la possibilità di sviluppare celle in grado di utilizzarlo direttamente (celle a metanolo diretto); i risultati finora ottenuti in questo settore fanno comunque ritenere che questa soluzione sia al momento non praticabile o comunque valida solo a lungo termine.

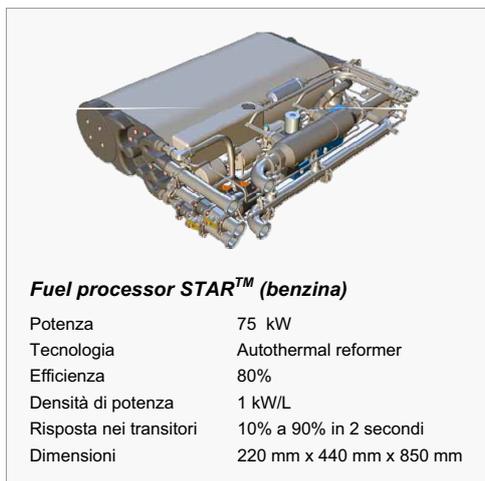
La produzione e distribuzione dell'idrogeno richiedono infrastrutture specifiche oggi inesistenti, si ritiene, quindi, che l'idrogeno sia proponibile nel breve-medio termine principalmente per flotte di veicoli e che rappresenti il combustibile ideale per tutte le tipologie di veicoli solo nel lungo termine. In attesa di una massiccia penetrazione di questa tecnologia sulle auto private, la scelta di puntare inizialmente su mezzi di trasporto pubblici appare strategica, non solo perché mezzi di questo tipo, date le dimensioni, hanno minori problemi per quanto riguarda l'accumulo dell'idrogeno a bordo, ma soprattutto

perché le aziende pubbliche sono in grado di dotarsi di proprie stazioni di produzione e rifornimento idrogeno superando così uno di quelli che al momento rappresenta un ostacolo all'introduzione del veicolo a idrogeno. Sarebbe inoltre più semplice fornire finanziamenti ed incentivi da parte di governi nazionali o amministrazioni locali per acquisto di veicoli; questo

concorrerebbe ad avviare la produzione di serie e quindi sfruttando le economie di scala si potrebbero raggiungere più facilmente costi in equilibrio con il mercato.

La generazione di idrogeno a bordo di un veicolo richiede unità di reforming leggere, compatte, in grado di avviarsi rapidamente e di rispondere dinamicamente alle variazioni di carico.

I processi utilizzati per la conversione di combustibili di tipo idrocarburico in idrogeno sono lo steam reforming, l'ossidazione parziale o una combinazione dei due processi (autothermal reforming). Il primo (più impiegato nei sistemi con celle a combustibile per applicazioni stazionarie) ha un'efficienza più elevata, mentre il secondo, a parità di combustibile, è più flessibile (tempo di avviamento più basso, maggiore capacità di rispondere in tempi brevi alle variazioni del carico) ed è in grado di utilizzare una gamma più ampia di combustibili. In entrambi i casi, il sistema comprende uno o più stadi successivi di purificazione dell'idrogeno prodotto, basati su processi come l'ossidazione selettiva del CO, la metanazione oppure la separazione su membrane.



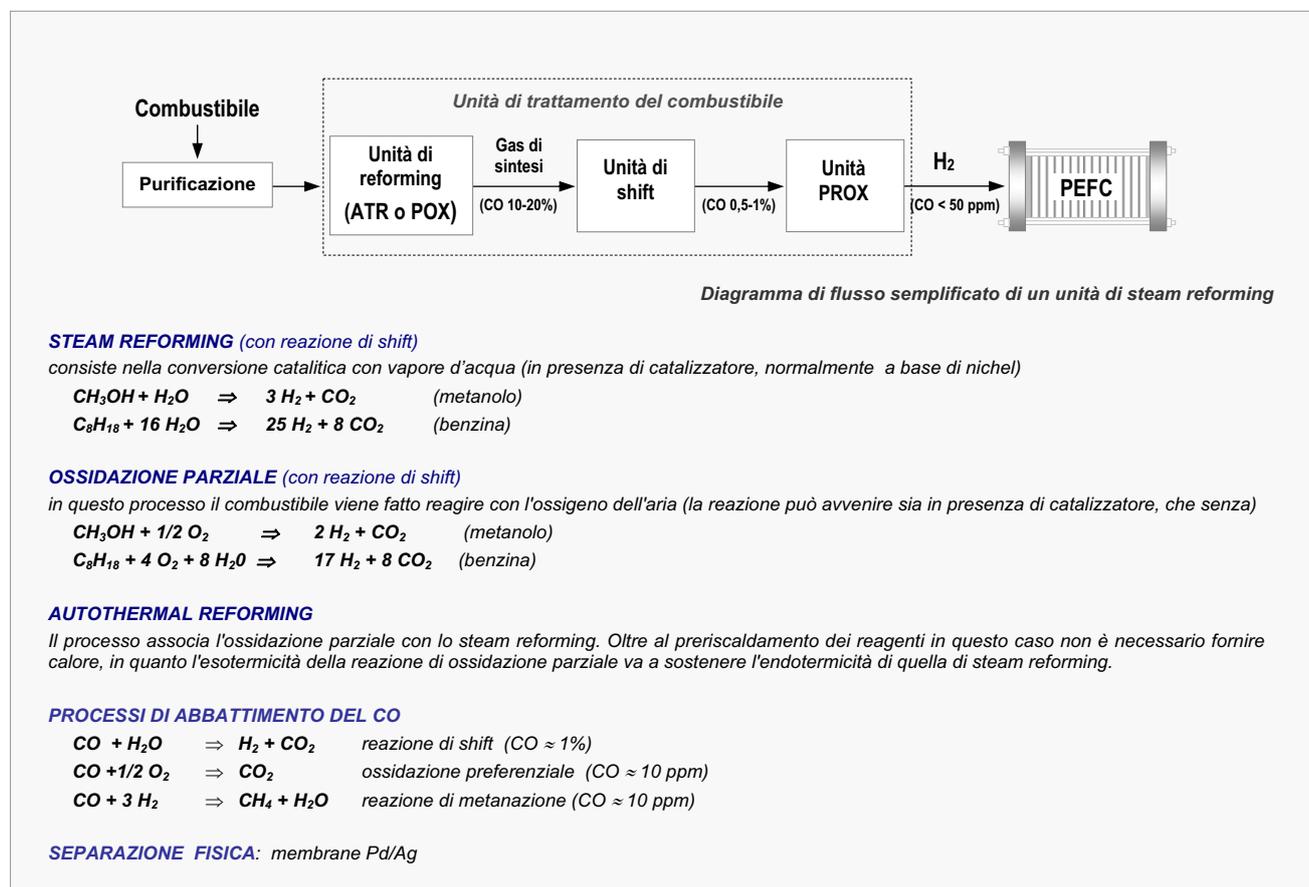
Sistemi di reforming capaci di operare su benzina o metanolo sono stati sviluppati e provati in passato da Johnson Matthey, McDermott Technology, UTC Power e da gruppi come Daimler/Shell, Ford/Mobil, e General Motors, oggi attività di sviluppo di sistemi di trattamento del combustibile per usi nel trasporto stanno proseguendo solo presso la **Nuvera Fuel Cells**.

Le attività Nuvera, svolte nell'ambito di una collaborazione con Renault, sono orientate allo sviluppo di un sistema in grado di operare con benzina, etanolo e diesel, lo STAR™ (Substrate Transportation Autothermal Reformer). Il prototipo è attualmente in fase di sperimentazione in scala laboratorio e si prevede di provarne il funzionamento a bordo di veicoli a partire dal 2010.

L'unità di reforming comprende un bruciatore, un reformer autotermico, reattori di shift ad alta e bassa temperatura ed un'unità di abbattimento del CO (reattore di ossidazione preferenziale, PROX). Secondo quanto dichiarato da Renault in occasione della presentazione dell'unità alla World Hydrogen

Energy Conference tenutasi a Lione del 2006, il gas in uscita contiene il 40% di idrogeno e 100 ppm di CO, il rimanente è costituito da acqua, azoto e anidride carbonica.

Le attività Nuvera nel quadro dei programmi DoE, dopo la chiusura da parte di quest'ultimo dei progetti indirizzati allo sviluppo di sistemi di trattamento del combustibile per usi veicolari, sono dirette alla realizzazione di unità da integrare con celle a combustibile per generazione di potenza stazionaria.



## ACCUMULO E DISTRIBUZIONE DELL'IDROGENO

### SISTEMI DI ACCUMULO

Tra i principali ostacoli ad un diffuso uso dell'idrogeno come vettore energetico, particolarmente nel settore dei trasporti, è certamente da annoverare la mancanza di adeguati sistemi di accumulo dell'idrogeno a bordo dei veicoli.

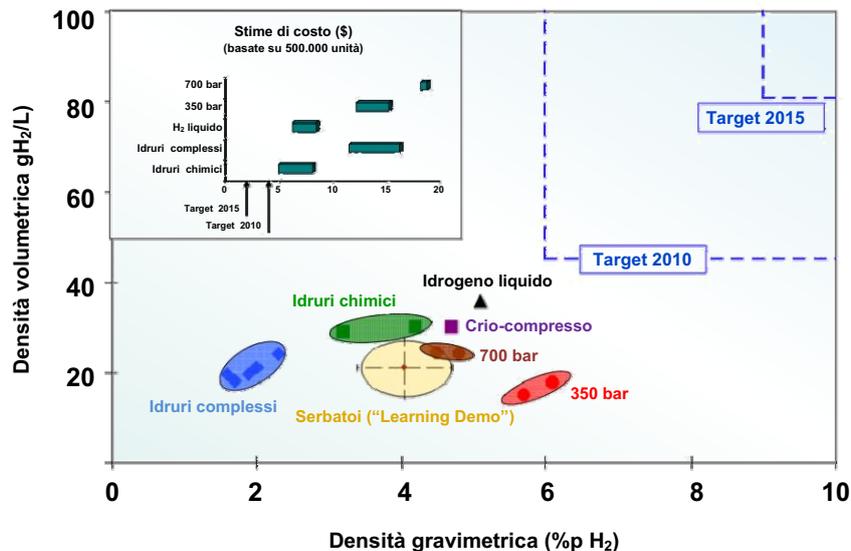
L'idrogeno può essere accumulato in forma gassosa, liquida oppure adsorbito in materiali solidi; ogni forma presenta aspetti favorevoli e limiti e tutte, se pur in gran parte già impiegate, richiedono ancora significativi sforzi di ricerca e sviluppo.

La scelta della tecnologia dipende dall'applicazione considerata e rappresenta un compromesso tra le varie caratteristiche fisiche, tecnologiche, economiche e di sicurezza che le diverse soluzioni sono in grado di offrire. I requisiti richiesti ad un sistema di accumulo da installare a bordo di un veicolo, dove pesi ed ingombri dei serbatoi costituiscono un limite all'autonomia del veicolo, sono ovviamente molto più stringenti rispetto a quelli di sistemi destinati ad usi stazionari.

Le problematiche connesse con l'accumulo dell'idrogeno derivano dalle sue caratteristiche chimico-fisiche: esso è un combustibile che presenta un'elevata densità energetica riferita alla massa, ma è anche quello con la minima densità energetica riferita al volume, sia allo stato gassoso che liquido. Da questo deriva il fatto che un accumulo di idrogeno risulta molto più voluminoso, se gassoso o liquido, di un accumulo di pari energia realizzato con un altro combustibile.

Un veicolo a combustione interna con consumi contenuti percorre oggi circa 500 km con circa 24 kg di benzina. La stessa percorrenza con un'auto a celle a combustibile richiede circa 5 kg di idrogeno. Alla pressione di 200 bar l'idrogeno occuperebbe circa 5 bombole tradizionali per un peso complessivo pari a 250-300 kg ed un rapporto in peso tra combustibile e contenitore pari a circa 1.5%.

L'obiettivo è immagazzinare idrogeno con un rapporto in peso pari almeno al 6% (densità gravimetrica) ad un costo del sistema di circa 120 €/kgH<sub>2</sub> e con tempi di rifornimento contenuti. Al momento nessuna delle opzioni disponibili o allo studio soddisfa i tutti requisiti richiesti, come si nota dalla figura in cui si riporta lo stato dell'arte delle diverse tecnologie, confrontato con gli obiettivi fissati dal DoE.



Stato delle diverse tecnologie di accumulo relative a prestazioni e costi del sistema

Fonte: Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan, DoE 2007

### Idrogeno compresso

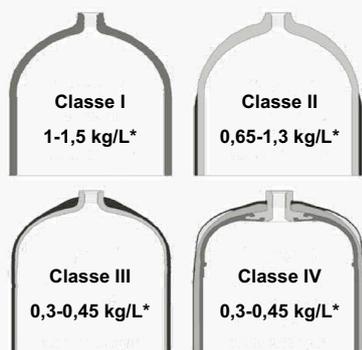
L'accumulo in forma gassosa è il metodo più semplice per immagazzinare idrogeno a bordo di un veicolo, tuttavia la tecnologia tradizionale finora utilizzata, con serbatoi in acciaio che operano a pressioni inferiori a 200 bar, risulta improponibile a causa della bassa energia specifica (0,4-0,5 kWh/kg), che costituisce un limite all'autonomia e alla capacità di carico del veicolo.

Lo sviluppo e l'introduzione di serbatoi in composito ultraleggero, in grado di operare a pressioni più elevate (350-700 bar) ha consentito di fare notevoli progressi, al momento sono disponibili serbatoi con liner metallico o termoplastico rinforzati in fibre di carbonio, di vetro ed aramidiche, che pesano fino a 3-4 volte in



Serbatoi TriShield™, Quantum Technology (350 bar)

### Evoluzione dei serbatoi in pressione



**Classe I** - Serbatoio interamente metallico (acciaio)

1-1,5 kg/L\*

**Classe II**  
0,65-1,3 kg/L\*

**Classe II** - (*Hoop Wrapped*) - Serbatoi con corpo metallico rinforzato da una guaina composta da un filamento continuo impregnato con resina (avvolte in maniera circonferenziale)

**Classe III**  
0,3-0,45 kg/L\*

**Classe IV**  
0,3-0,45 kg/L\*

**Classe III** - (*Fully Wrapped*) - bombole con corpo metallico rinforzato da una guaina composta da un filamento continuo impregnato con resina (completamente avvolte)

**Classe IV** - Serbatoio interamente in materiale composito

\* Intervallo di peso di serbatoi a 200 bar

meno dei serbatoi completamente metallici e che consentono quindi di superare parte delle restrizioni legate all'uso delle bombole. Le caratteristiche di sicurezza sono in genere elevate, grazie alla robustezza dei serbatoi ed all'introduzione di fusibili antiscoppio in caso di incendio e di valvole di interruzione del circuito in caso di urto.

Stanno circolando diversi prototipi di veicoli con serbatoi in composito che operano a 350 bar realizzati dalla Dynetek Industries o dalla Quantum Technologies.

Il serbatoio a 700 bar sviluppato dalla Quantum, nell'ambito di una collaborazione con General Motors, ha ricevuto la certificazione dal TÜV (Technische Überwachung Verein) in accordo con le specifiche tecniche tedesche per i serbatoi in pressione. I test del TÜV tengono conto dello standard NGV-2000 dell'industria americana e dei requisiti richiesti dall'EIHP (European Integrated Hydrogen Project), che punta a creare le basi per l'armonizzazione della legislazione europea in materia di veicoli con propulsione ad idrogeno e dei relativi componenti ed infrastrutture, allo scopo di facilitarne l'introduzione e l'impiego in sicurezza.

L'elevato costo dei serbatoi in materiale composito è tra i problemi da risolvere, nel rapporto IEA "Prospects for Hydrogen and Fuel Cells" si riportano costi nell'intervallo 2.400-3.300 \$/kgH<sub>2</sub>, valori che con la produzione di massa si ridurrebbero a 350-600 \$/kgH<sub>2</sub>, cifre comunque ancora lontane dai valori fissati come obiettivo dal DoE per il 2010 pari a 134 \$/kg H<sub>2</sub> (4 \$/kWh).

Il costo delle fibre di carbonio, a seconda del tipo di materiale utilizzato, incide per il 40-70 % sul costo totale del serbatoio. La Quantum nel quadro del programma DoE sta studiando la possibilità di ridurre la quantità di fibre necessarie alla costruzione del sistema di accumulo, senza che si alterino i livelli di prestazioni e soprattutto di sicurezza del sistema.

Serbatoi a 700 bar sono stati installati sulla Hydrogen3 e sulla Equinox del gruppo GM/Opel, sulla versione 2005 della Nissan X-Trail e sulla FCHV della Toyota.

Sono oggi in corso attività di ricerca rivolte allo sviluppo di serbatoi conformabili e di tipo ibrido, che combinano le caratteristiche di accumulo dei serbatoi in pressione con quelle dei serbatoi criogenici.

Stato della tecnologia Quantum (settembre 2006)

Parametro	Tecnologia Quantum 2006 *	Obiettivi DoE		
		2007	2010	2015
Energia specifica, kWh/kg	1,3	1,5	2	3
Densità di energia, kWh/L	0,8	1,2	1,5	2,7
Costo del sistema, \$/kWh	10-17	6	4	2
Durata, cicli (riemp. 1/4 di serbatoio)	15.000	500	1.000	1.500
Tempo di rifornimento, min (5 kg H <sub>2</sub> )	10	10	3	2,5

\* Serbatoio da 160 L, 700 bar, volume di produzione 500.000 unità/anno

### Idrogeno liquido

L'idrogeno può essere accumulato allo stato liquido in serbatoi criogenici ad una temperatura di -253°C. Dal momento che l'idrogeno è immagazzinato ad una temperatura che corrisponde al suo punto di ebollizione, qualsiasi passaggio di calore attraverso il liquido ne comporta l'evaporazione, con conseguente perdita di prodotto. I serbatoi sono progettati in modo da evitare qualsiasi trasmissione di calore dalla parete esterna al liquido, per cui sono costituiti da un doppio rivestimento in lamiera d'acciaio in cui viene creato il vuoto per impedire il passaggio di calore per conduzione o convezione. Tra la parete interna ed esterna del contenitore vengono generalmente impiegati sottili film in alluminio e strati di fibre di vetro che riducono la radiazione del calore.

L'utilizzo di serbatoi criogenici per il trasporto di idrogeno liquido a bordo di veicoli è una tradizione ben consolidata in Germania, dove da oltre venti anni è utilizzato per le diverse generazioni di auto BMW alimentate a idrogeno. Recentemente le prestazioni dei serbatoi sviluppati per applicazioni veicolari dai diversi costruttori (Air Liquide, Linde AG, Messer-Griesheim e Magna Steyr) sono considerevolmente migliorate. Le perdite per evaporazione (note come boil-off,) si sono ridotte all'1% giornaliero e l'energia specifica ha raggiunto i 6 kWh/kg. Il nuovo serbatoio CoolH<sub>2</sub> realizzato dalla Linde, raffreddato attivamente, riesce a conservare l'idrogeno per circa 12 giorni prima che si verifichino perdite per boil-off.



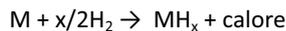
Serbatoio Linde per accumulo di idrogeno liquido (120 L)

Questa tecnologia dal punto di vista teorico è forse quella che meglio risponde alle esigenze dell'autotrasporto, ma a suo sfavore giocano la maggiore complessità del sistema, non solo a bordo del veicolo ma anche a terra, per la distribuzione ed il rifornimento, ed i maggiori costi ad esso associati, anche energetici. La liquefazione richiede infatti circa il 30% del contenuto energetico del combustibile, contro un valore compreso tra il 4% ed il 7% per l'idrogeno compresso.

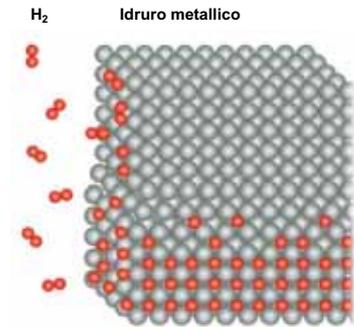
Oltre alle auto a idrogeno della BMW con motore a combustione interna, è alimentata ad idrogeno liquido una versione della HydroGen3 della GM/Opel (4.6 kg H<sub>2</sub>).

## Idruri

L'idrogeno può legarsi chimicamente con diversi metalli e leghe metalliche formando idruri, caratterizzati da interessanti proprietà come sistemi di accumulo. L'idrogeno penetra all'interno del reticolo cristallino del metallo, andando ad occuparne i siti interstiziali.



Affinché la reazione proceda verso destra e sia favorita la formazione dell'idruro, la pressione dell'idrogeno gassoso deve superare un valore di soglia, vale a dire una pressione di equilibrio. L'assorbimento dell'idrogeno (idrogenazione) nello spazio interatomico è un processo esotermico che richiede raffreddamento, mentre il suo rilascio (deidrogenazione) è un processo endotermico che richiede somministrazione di calore e diminuzione di pressione. La temperatura e la pressione di queste reazioni dipendono dalla composizione specifica dell'idruro.



Gli idruri a seconda della temperatura di assorbimento sono classificati in idruri ad alta e a bassa temperatura. I primi sono in genere materiali ad alto peso molecolare, in cui l'idrogeno viene legato attraverso un legame covalente, quelli a bassa temperatura sono invece materiali a basso peso molecolare, che legano l'idrogeno attraverso un legame ionico. Le temperature di assorbimento variano nell'intervallo 150-300 °C nel caso degli idruri ad alta temperatura e 20-90 °C per quelli a bassa temperatura. Le pressioni di assorbimento sono dell'ordine di 30-55 bar, quelle di desorbimento 0,7-10 bar.

Le percentuali in peso che si raggiungono per i soli materiali vanno dal 2 al 7%, mentre per i sistemi completi dipendono dalla complessità dei componenti ausiliari necessari. La tecnologia di accumulo mediante idruri risulta quindi potenzialmente promettente per le applicazioni nel settore del trasporto. L'impiego su veicoli con celle ad elettrolita polimerico richiede materiali in grado di lavorare in intervalli di temperatura di 25-100°C e pressioni di 1-10 bar.

Le attività si sono concentrate su composti intermetallici del tipo AB<sub>5</sub>, AB<sub>2</sub> e AB, materiali a base di magnesio ed alanati. Attualmente nessuno degli idruri noti risponde a tutte le richieste di un sistema di accumulo per usi veicolari. Le leghe del tipo LaNi<sub>5</sub>, assorbono e desorbono idrogeno a bassa temperatura (T<sub>amb</sub> o leggermente superiori) ma presentano una bassa percentuale di idrogeno in peso (meno di 1,5). Le leghe a base di magnesio (ad esempio Mg drogato con Ni/Fe/Co) mostrano densità gravimetriche molto alte (fino al 7,6% in peso nel caso di leghe di magnesio drogate con litio), operano però in condizioni piuttosto drastiche (230-400 °C e 1-4 bar di pressione). Gli alanati, del tipo NaAlH<sub>4</sub>, presentano capacità di accumulo attorno al 5%, ma hanno problemi di reversibilità e temperature di desorbimento superiori ai 150°C.

Gli sviluppi della tecnologia sono concentrati sull'aumento della capacità di accumulo, sul miglioramento della cinetica dei processi di assorbimento e desorbimento e sulla riduzione dei costi. Un punto debole della tecnologia è rappresentato dal peso del sistema, a parità di peso un veicolo che utilizza un serbatoio ad idruri presenta un'autonomia tre volte inferiore a quella ottenibile con idrogeno liquido o idrogeno compresso con serbatoi di tipo avanzato. Sono invece indubbi i vantaggi in termini di convenienza, compattezza, stabilità dell'accumulo e sicurezza intrinseca.

Un'altra famiglia è quella dei cosiddetti idruri chimici, rigenerabili e non, composti che presentano un'elevata percentuale di idrogeno in peso nella molecola (fino al 20% ed oltre). Fra questi negli ultimi anni ha ricevuto attenzione la tecnologia del sodio boridruro (NaBH<sub>4</sub>). Il limite di questa tecnologia è rappresentato oggi dall'elevato fabbisogno energetico (il rendimento totale è intorno al 5%) e dalla complessità dei sistemi e delle infrastrutture richieste sia per la sua distribuzione, che per la rigenerazione dei prodotti della reazione di produzione idrogeno (NaBO<sub>2</sub>), che deve necessariamente avvenire off-board. La tecnologia, molto interessante per sistemi portatili, al momento risulta improponibile per usi nel settore dell'autotrasporto.



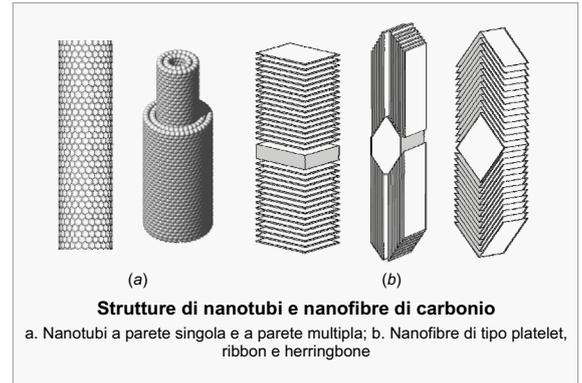
**2006 - Serbatoio Ovonic**  
(1500 psi, idruri metallici)  
Capacità: 3 kg H<sub>2</sub>  
Densità gravimetrica: 1,58 %p H<sub>2</sub>  
Volume: 50 L  
Peso: 190 kg

La tecnologia degli idruri è allo studio in Stati Uniti, Giappone ed Europa ed interessanti risultati sono stati ottenuti dalla Ovonic Hydrogen Systems e recentemente dalla Toyota Motors.

## Nanostrutture di carbonio

L'accumulo in nanostrutture di carbonio (nanotubi e nanofibre di carbonio) viene indicato tra le tecnologie potenzialmente più interessanti ed è oggetto di studio da parte di diversi gruppi. Le recenti sperimentazioni non hanno confermato le aspettative create alcuni anni or sono, quando era stato annunciato lo sviluppo di materiali capaci di accumulare tra il 30 ed 60% in peso di idrogeno, risultati già allora considerati inspiegabili ed oggetto di forti critiche da parte della comunità scientifica.

I risultati ottenuti dai vari laboratori sono spesso non confrontabili tra loro in quanto riferiti a campioni di materiali di diverso tipo, provati in condizioni operative molto diverse, in letteratura per i nanotubi oggi si riportano percentuali di accumulo tra il 3 ed il 10 % in peso a temperatura ambiente.



## I programmi in corso sui sistemi di accumulo di idrogeno

I principali programmi internazionali di ricerca, sviluppo e dimostrazione nel settore dell'idrogeno dedicano notevole attenzione alla messa a punto di sistemi di accumulo per le diverse applicazioni.

Negli **Stati Uniti**, il Department of Energy finanzia lo sviluppo di sistemi di accumulo nel Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Programme all'interno del quale sono in corso attività sui materiali (idruri, nanostrutture di carbonio), sui serbatoi e sulla validazione delle diverse tecnologie di accumulo. Le attività sono svolte in stretta connessione con quelle del FreedomCAR and Vehicle Technologies Programme.

Il programma include progetti indipendenti e tre "Centri di Eccellenza" dove vengono svolte ricerche esplorative sui materiali per accumulo, il Carbon-based Material Center al National Renewable Energy Laboratory, il Chemical Hydrogen Storage Center presso il Los Alamos National Laboratory ed il Metal Hydride Center al Sandia National Laboratory. A questi centri se ne aggiungerà a breve un quarto l'Hydrogen Storage Engineering Center focalizzato sullo sviluppo di sistemi di accumulo per usi a bordo di veicoli in grado di assicurare autonomie superiori ai 480 km.

Le attività del DoE sono finalizzate allo sviluppo di tecnologie di accumulo adatte per usi nel trasporto, ma anche per applicazioni stazionarie. Obiettivo del programma è quello di ottenere:

- dal 2010, a livello di sistema (materiale di accumulo, serbatoio e componenti del BoP) energie specifiche di 2 kWh/kg (6% in peso), densità di energia di 1,5 kWh/L e costi di 4 \$/kW.
- dal 2015, sistemi con energia specifica di 3 kWh/kg (9% in peso), densità di energia di 2,7 kWh/L e costi di 2 \$/kW.

In **Giappone** le attività di R&S sui sistemi di accumulo di idrogeno sono promosse dal METI attraverso il NEDO. Nella roadmap sulle celle a combustibile, presentata dal NEDO nel 2006, un'area tematica è rivolta allo sviluppo delle tecnologie relative all'idrogeno per usi veicolari. Per i diversi sistemi di accumulo sono stati individuati gli obiettivi da raggiungere nelle varie fasi di sviluppo.

In **Europa** le principali iniziative sono condotte nel quadro del VI Programma Quadro dell'Unione Europea. Sono attivi una serie di progetti tra cui possiamo citare i progetti *NessHy* e *StorHy*.

Il progetto *NessHy* (Novel Efficient Solid Storage for Hydrogen) è rivolto allo sviluppo di sistemi di accumulo di idrogeno in materiali allo stato solido; sono oggetto di studio idruri complessi (alanati e immidi) e composti intermetallici contenenti magnesio. Una volta identificati i materiali più promettenti, saranno realizzati sistemi completi da provare in condizioni reali.

**Roadmap NEDO (2006) –  
Fasi di sviluppo di sistemi di accumulo per veicoli a celle a combustibile**

		Idrogeno compresso	Idrogeno liquido	Idruri metallici ad alta pressione	Idruri metallici a bassa pressione
<b>Oggi</b>	a	35 MPa	3% - 6%/giorno / circa 30h	35 MPa	3 MPa
	b	4-5% peso	4 % peso	1 % peso (2,2%)	0,9% peso (2 %)
	c	3 kg	4,3 kg	7,3 kg	3 kg
	d	120L / 70kg	68L / 85kg	150L / 420kg	120L / 340kg
<b>2010</b>	a	70 MPa	1% -2%/giorno / circa 100h	35 MPa	3 MPa
	b	6 %peso	9 %peso	3 %peso (> 4 %)	3,5 %peso (6 %)
	c	5 kg	5 kg	5 kg	5 kg
	d	120L / 75kg	80L / 50kg	100L / 165kg	110L / 145kg
<b>2020</b>	a	70 MPa	0,5% - 1%/giorno / circa. 200h	35 MPa	3 MPa
	b	9 % peso	17% peso	4 % peso (> 6%)	4,5 %peso (9%)
	c	7kg	7kg	7kg	7kg
	d	170L / 80kg	110L / 35kg	115L / 175kg	110L / 155kg

a: Pressione di accumulo (Boil-off / Start-up time valvole di sicurezza)  
b: Densità gravimetrica del serbatoio (il numero in parentesi è relativo al solo materiale)  
c: Peso di idrogeno nel serbatoio  
d: Volume di idrogeno / Peso serbatoio

Il progetto StorHy (Hydrogen storage systems for automotive applications, coordinato dalla Magna Steyr), vede coinvolti fornitori di idrogeno, aziende automobilistiche e diversi istituti di ricerca ed è indirizzato alla messa a punto di sistemi di accumulo idrogeno robusti, efficienti e sicuri, per usi a bordo di veicoli a celle a combustibile o con motori a combustione interna. StorHy si articola in tre sottoprogetti in cui vengono presi in esame rispettivamente l'accumulo in forma gassosa, liquida ed in idruri metallici.

Nella fase iniziale del progetto sono stati definiti i requisiti a cui il sistema di accumulo deve rispondere, i quali risultano in linea con quelli dell'Agenda Strategica di Ricerca (SRA) preparata nell'ambito della Piattaforma Europea sull'Idrogeno e sulle Celle a Combustibile.

In **Italia**, attività di ricerca su materiali per l'accumulo dell'idrogeno sono in corso da alcuni anni presso organizzazioni di ricerca ed università, con limitati coinvolgimenti da parte industriale (SAES Getters ed SGS Future che commercializzano idruri metallici e serbatoi in idruri).

L'ENEA ha svolto in passato attività di ricerca di base su diversi materiali per accumulo nel quadro di due progetti FISR (Fondo Integrativo Speciale per la Ricerca) promossi dal Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica. Un progetto, coordinato da ENEA conclusosi nel 2005, era finalizzato allo sviluppo di idruri metallici ed all'acquisizione di competenze di ingegneria sui sistemi di accumulo. Le attività svolte, in stretta collaborazione con l'Istituto Nazionale di Fisica dei Materiali, la Saes Getters e l'Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia (ITAE) del CNR di Messina, hanno riguardato in particolare:

- lo sviluppo di leghe metalliche a base di Mg innovative e dei relativi processi di preparazione, in particolare sono state studiate leghe a base di magnesio opportunamente drogate con piccole quantità di metalli di transizione (per es. nichel e ferro) e/o relativi ossidi e ottimizzate procedure di preparazione di leghe metalliche convenzionali (del tipo  $AB_2$ );
- la progettazione e realizzazione di un prototipo ingegnerizzato di sistema di accumulo di idrogeno in leghe metalliche convenzionali (del tipo  $LaNi_5$ );
- la definizione di procedure di prova per la verifica sperimentale delle proprietà delle leghe, dei sistemi di accumulo e dei sistemi dimostrativi (veicoli con celle a combustibile);
- un'analisi di normative, codici, standard e studi di fattibilità ed economici relativi alla sicurezza ed alle infrastrutture di rifornimento.



Prototipo di serbatoio ad idruri metallici e relativa stazione di prova (ENEA)

Nello stesso periodo ENEA ha condotto studi su idruri chimici (in particolare sodioboro idruro) all'interno di un progetto sulle microcelle a combustibile per usi portatili, coordinato dal **CNR-ITAE**.

Le attività ENEA relative allo sviluppo di materiali innovativi per l'accumulo stanno proseguendo, nell'ambito di una collaborazione con il Ministero della Difesa e di una delle linee di attività del Progetto "Tecnologie e processi per affrontare la transizione e preparare il futuro sistema idrogeno", inserito nel Programma Strategico "Nuovi sistemi di produzione e gestione dell'energia" finanziato attraverso FISR. Queste ultime attività sono svolte, in collaborazione con l'Università di Trento, su tre temi distinti:

- stabilizzazione di leghe idrurabili mediante inglobamento o compounding con materiali polimerici
- sintesi e caratterizzazione di compositi e nanocompositi a base di materiali leggeri con microstruttura controllata
- desorbimento di idrogeno dall'idruro irreversibile sodio boroidruro.

Il primo tema, con ricadute applicative più vicine, propone di migliorare le prestazioni di idruri classici che presentano caratteristiche di desorbimento a bassa temperatura ( $LaNi_5$  e  $FeTi$ ) anche se con limitate capacità di accumulo, esplorando soluzioni innovative basate sul loro inglobamento in adatte matrici polimeriche.

Il secondo tema, che riguarda alcune classi di materiali leggeri compositi e nanocompositi, ha come obiettivo un avanzamento delle conoscenze per esplorare la possibilità di modificare l'equilibrio termodinamico fra idrogeno e materiale solido e la sua influenza sulla temperatura di desorbimento.

Progetto StorHy - Obiettivi sistemi di accumulo per usi veicolari

Parametro	Unità	Obiettivi StorHy 2010	Obiettivi SRA 2015
Autonomia	km	600	> 500
H <sub>2</sub> accumulato	kg	6-10	6-10
Energia specifica	kWh/kg	2,0	
	% peso	6	H <sub>2</sub> compr 4-6 H <sub>2</sub> liq. 9 Idruri 7
Densità di energia	kWh/L	1,5	H <sub>2</sub> compr 1,1 H <sub>2</sub> liq. 1,2
Temperatura operativa	°C	-40 / +85	-40 / +85
Velocità di rifornimento	kg H <sub>2</sub> /min	1,2 H <sub>2</sub> compr. 2 H <sub>2</sub> liq.	-
Velocità di consegna (max)	g H <sub>2</sub> /s	2,0 FC 5,5 ICE	-
Pressione min	bar	6	-
Velocità di permeazione	Ncm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /h	1	-
Boil-off idrogeno	g/h per kg H <sub>2</sub>	1	1 % /giorno

L'ultimo tema, infine riguarda l'impiego del sodio boroidruro ( $\text{NaBH}_4$ ) per l'accumulo di idrogeno. In particolare si propone di approfondire le conoscenze relative al processo di dissociazione di  $\text{NaBH}_4$  in soluzione acquosa, ai sistemi di catalisi per il controllo della reazione di dissociazione ed all'utilizzo del calore prodotto dalla reazione per il condizionamento della miscela gassosa a base idrogeno.

All'interno dello stesso Programma Strategico, attività di sviluppo di sistemi per l'accumulo di idrogeno, sono incluse nei progetti:

- "Produzione e stoccaggio di idrogeno in nanomateriali", coordinato dal **Consorzio Interuniversitario per lo Sviluppo dei Sistemi a Grande Interfase** (GSGI), finalizzato alla progettazione e realizzazione di un prototipo di serbatoio per l'accumulo dell'idrogeno allo stato solido da integrare con un sistema cella a combustibile/elettrolizzatore.
- "Sistemi innovativi di produzione di idrogeno da energie rinnovabili", coordinato dal **Consorzio Ingegneria per l'Ambiente e lo Sviluppo Sostenibile** (IPASS, Perugia). Una linea del progetto, incentrata allo sviluppo di sistemi innovativi per lo accumulo di idrogeno, prevede attività esplorative su diverse classi di materiali (leghe e compositi intermetallici, nanotubi di carbonio, zeoliti).

Presso l'**Università degli Studi di Padova** (Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Fisica) da alcuni anni sono attivi gruppi di lavoro che svolgono sintesi e caratterizzazioni di materiali per l'accumulo dell'idrogeno allo stato solido (idruri a base di magnesio).

Attività sperimentali su un sistema di accumulo in idruri metallici (leghe a base di nichel e lantanio) sono state condotte anche presso il **CESI Ricerca**, dove è stata progettata e realizzata un'unità di accumulo ( $6,3 \text{ Nm}^3$  di idrogeno) sulla quale sono state eseguite una serie di prove funzionali finalizzate all'accoppiamento con una cella a combustibile ad elettrolita polimerico. Come materiale di accumulo viene usato un idruro metallico a base di nichel e lantanio ( $\text{LaNi}_{4,65}\text{A}_{0,35}$ ).

Infine **HySyLab**, centro che svolge attività sulle tecnologie dell'idrogeno con sostegno da parte della regione Piemonte e della Provincia e della Città di Torino, si occupa della caratterizzazioni di materiali per l'accumulo e conduce prove su sistemi commerciali a idruri metallici.



Il prototipo del sistema di accumulo in idruri metallici HS-6500 in prova presso i laboratori del CESI Ricerca

### INFRASTRUTTURE DI RIFORNIMENTO IDROGENO

Uno dei maggiori ostacoli all'utilizzo dell'idrogeno come combustibile per autoveicoli è la mancanza di infrastrutture per la sua produzione e distribuzione, questa rappresenta una sfida tecnico-economica tale da richiedere uno sforzo congiunto di amministrazioni pubbliche e industrie per essere risolto positivamente.

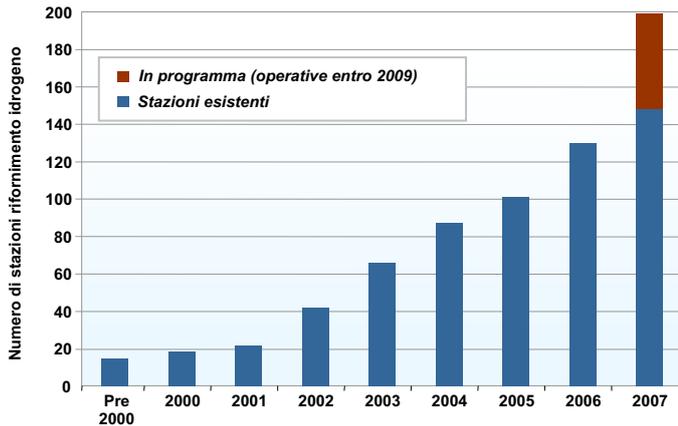
Impiegando tecnologie già disponibili industrialmente, sono possibili diverse opzioni per realizzare una stazione di rifornimento per veicoli ad idrogeno:

- produzione di idrogeno locale per via elettrolitica o per steam reforming con accumulo in diverse forme (idrogeno gassoso, liquido, idruri);
- produzione in impianti centralizzati e consegna tramite camion alla stazione di rifornimento, dove può essere accumulato in forma liquida o come gas compresso;
- produzione in impianti centralizzati, distribuzione attraverso gasdotto e stazione di compressione locale (come per il gas naturale per trazione).

Tranne l'ultima opzione, che necessita di una rete idrogeno di cui ancora non esistono esempi dedicati alla trazione, le tecnologie da utilizzare sono già mature industrialmente ed i problemi maggiori risiedono più nelle condizioni normative e nella standardizzazione dei componenti. Per la realizzazione di stazioni di rifornimento idrogeno la poca familiarità con questo vettore porta normalmente ad applicare condizioni particolarmente restrittive. Enti normativi e di certificazione internazionali stanno lavorando per emettere normative ad hoc, utilizzando anche informazioni raccolte dai maggiori produttori di idrogeno (AirLiquide, Air Products, Linde, ecc.) e dalle diverse compagnie petrolifere (Chevron, Shell Hydrogen, Total, BP, ecc.).

Infrastrutture idrogeno	
Principali organizzazioni coinvolte in attività di R&S	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Air Liquide</li> <li>• Air Products and Chemical</li> <li>• BP / Aral</li> <li>• BOC</li> <li>• Chevron Texaco</li> <li>• Cosmo Oil</li> <li>• ENI / AGIP</li> <li>• General Hydrogen</li> <li>• Honda R&amp;D/Plug Power</li> <li>• Hydrogenics</li> <li>• Linde</li> <li>• Nippon Oil</li> <li>• Praxair</li> <li>• Sapio</li> <li>• Shell Hydrogen</li> <li>• Showa Shell Sekiyu KK</li> <li>• TotalFinaElf</li> </ul>	<p><b>Unità di reforming (usi on-site)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Babcock-Hitachi K.K.</li> <li>• H<sub>2</sub>Gen</li> <li>• HyGear</li> <li>• HyRadix</li> <li>• ZTek</li> </ul>
	<p><b>Elettrolizzatori (usi on-site)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• AccaGen</li> <li>• Avalance</li> <li>• Hydrogenics</li> <li>• NorskHydro</li> </ul>
	<p><b>Unità di accumulo ed altri componenti</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynetec</li> <li>• HERA</li> <li>• Quantum Technologies</li> <li>• Pdc Machine</li> <li>• QuestAir</li> </ul>

Per quanto riguarda la progettazione e standardizzazione dei vari componenti (es. connettori dei serbatoi dei veicoli) non esistono orientamenti precisi ed ogni esperienza fa caso a se, dipendendo in larga misura dagli standard di produzione delle singole industrie coinvolte.



Ad oggi (novembre 2007), risultano costruite più di 150 stazioni di rifornimento ed è prevista l'apertura di oltre 50 impianti nel quadro di progetti dimostrativi per la sperimentazione di piccole flotte di veicoli (un elenco delle stazioni di rifornimento è fornito in Appendice A). Le stazioni operative si trovano principalmente in Nord America, Europa e Giappone, di queste oltre l'80% distribuiscono idrogeno compresso, dal momento che la maggior parte dei veicoli realizzati sono alimentati con combustibile in questa forma.

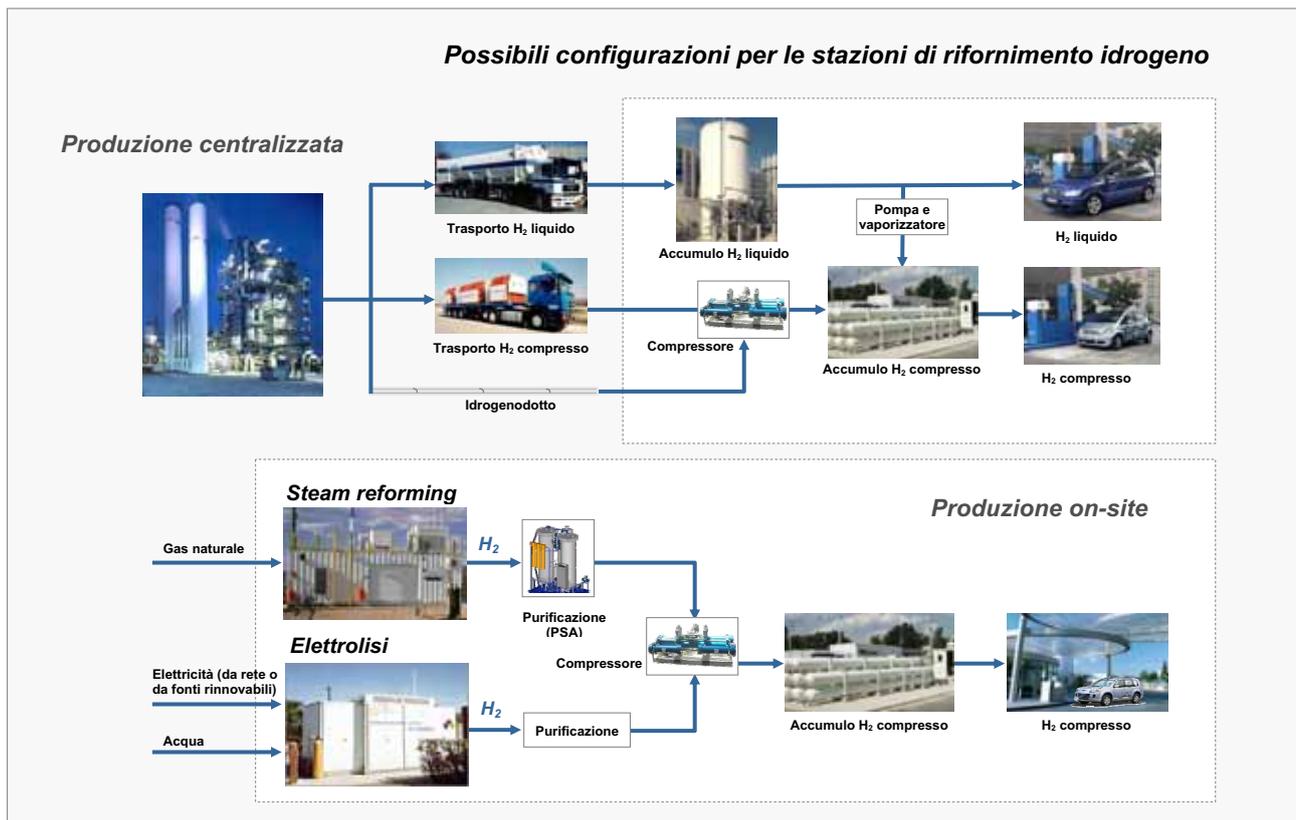
### Tipologie di stazioni di rifornimento di idrogeno

Le configurazioni che si possono adottare per la realizzazione di una stazione di rifornimento di idrogeno sono molteplici e variano in funzione della tipologia dell'approvvigionamento (produzione on-site o centralizzata), della fonte primaria utilizzata (idrogeno prodotto da combustibili fossili o da rinnovabili), della forma in cui l'idrogeno è erogato (idrogeno compresso e/o liquido), della modalità di immagazzinamento presso la stazione. La scelta è determinata tra l'altro dal numero di utenti e quindi dalla quantità di idrogeno che l'impianto deve essere in grado di fornire nell'arco della giornata, nonché nel caso di fornitura dall'esterno dalla distanza dal punto di produzione.

- **Stazione di rifornimento con produzione centralizzata**

L'idrogeno viene prodotto in impianti centralizzati e trasferito alla stazione di rifornimento in forma gassosa o liquefatto. Al momento i processi maggiormente utilizzati per la produzione di idrogeno sono lo steam reformer o l'ossidazione parziale di idrocarburi. Alternativa, interessante per il medio-lungo termine, è quella di ottenere idrogeno per elettrolisi usando energia elettrica da fonti rinnovabili.

Una volta prodotto, l'idrogeno viene trasportato come gas compresso o allo stato liquido con carri bombolai o autocisterne. Nel primo caso presso la stazione di rifornimento è presente un'unità di compressione ed un sistema di accumulo



intermedio che lo mantiene ad una pressione superiore a quella a bordo del veicolo che lo utilizza, per contenere i tempi di rifornimento.

L'idrogeno liquido, invece, una volta consegnato alla stazione di servizio è immagazzinato in un serbatoio criogenico e da qui mandato alla colonnina di rifornimento in forma liquida oppure vaporizzato ed inviato ad un serbatoio intermedio ad alta pressione dal quale viene in seguito prelevato per essere distribuito in forma gassosa.

Negli impianti che prevedono colonnine per l'erogazioni di idrogeno sia in forma liquida che gassosa, l'idrogeno che evapora dal serbatoio criogenico, a seguito di fenomeni di boil-off, viene recuperato ed immesso nel serbatoio di accumulo ad alta pressione, ottimizzando in questo modo l'efficienza complessiva dell'impianto. Una stazione di questo tipo è quella di Ariake (Tokyo) realizzata, nel quadro del Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project, da Showa Shell Sekiyu e dalla Iwatani International.



Stazione idrogeno Ariake (Tokyo)

Rispetto all'idrogeno gassoso, quello allo stato liquido, grazie al maggior contenuto energetico per unità di volume che lo caratterizza, a parità di volume immagazzinato consente una maggiore autonomia alla stazione di rifornimento. Tuttavia occorre ricordare che la liquefazione è un processo energeticamente costoso e fortemente penalizzato dall'economie di scala.

Quando le quantità di idrogeno da trasportare alla stazione di rifornimento sono elevate e le distanze da percorrere notevoli è ragionevole pensare al trasporto di idrogeno gassoso tramite idrogenodotto, soluzione realizzabile solo a lungo termine, una volta che si potrà contare su una rete di distributori destinati a servire un numero elevato di veicoli. Alla stazione, l'idrogeno segue lo stesso iter di quello trasportato con carri bombolai. La tecnologia degli idrogenodotti è sufficientemente matura, anche se per trasporto di idrogeno per usi industriali. La rete degli idrogenodotti è ancora modesta: circa 720 km negli Stati Uniti e 1500 km in Europa.

Su piccola scala questa tecnologia ha trovato applicazione a Francoforte, nel parco industriale della Infracorps Höchst. Qui l'Eni nel novembre 2006 ha aperto una stazione di servizio del tipo multienergy alla quale arriva idrogeno attraverso un



Stazione di Francoforte - Progetto Zero Regio

gasdotto, lungo circa 1,7 km, che la collega allo stabilimento chimico della Höchst, dove l'idrogeno è presente come sottoprodotto. La stazione, costruita in collaborazione con la Linde all'interno del Progetto Zero Regio, è dotata di erogatori per il rifornimento di idrogeno compresso (350 e 700 bar) e di idrogeno liquido.

- **Stazione di rifornimento con produzione on-site**

Un'altra alternativa è quella che prevede la produzione di idrogeno presso la stazione di rifornimento. L'idrogeno è prodotto per via elettrolitica dall'acqua o con processi di reforming da combustibili fossili. L'idrogeno, dopo purificazione, viene compresso, quindi immagazzinato in un opportuno sistema ad alta pressione, dal quale viene poi prelevato per essere immesso nel mezzo da rifornire.

La tecnologia degli elettrolizzatori è industrialmente consolidata e sono ormai molte le aziende costruttrici presenti sul mercato. L'uso di un elettrolizzatore diventa interessante nel caso si preveda l'impiego di energia elettrica ottenuta da fonti rinnovabili. Esistono alcuni esempi di stazioni di questo tipo, tra cui quella di Collesalveti (Livorno) realizzata dalla divisione Refining & Marketing dell'Eni, con il contributo della Regione Toscana. L'idrogeno è prodotto da un sistema elettrolitico alimentato con energia elettrica prodotta dagli impianti fotovoltaico ed eolico e da una microturbina presenti presso la stazione.



Stazione Agip Multienergy di Collesalveti

La produzione di idrogeno on-site da combustibili fossili usa le stesse te-

cnologie della produzione centralizzata. Dal momento che veicoli alimentati con celle a combustibile esigono livelli di purezza dell'idrogeno piuttosto spinti (tenore di CO < 10 ppm), il sistema di produzione è integrato con un'unità di purificazione in genere di tipo PSA.

Negli Stati Uniti la maggior parte delle stazioni con produzione di idrogeno on-site sono dotate di unità elettrolitiche, in Giappone la tendenza è invece quella di utilizzare sistemi di reforming di idrocarburi (gas naturale, GPL, gasolio desolfurato e nafta), anche in Europa al momento sembra prevalere la scelta dell'elettrolisi.

Un caso particolare è quello delle "energy station", nelle quali la produzione locale di idrogeno è associata alla generazione di energia elettrica e calore (generalmente con sistemi con celle a combustibile). In questo modo, oltre a svincolare la taglia dell'impianto di produzione idrogeno dalle richieste della stazione di rifornimento, si permette anche un funzionamento a carico quasi costante del sistema di trattamento del combustibile, che viene quindi ad operare in condizioni ottimali. Teoricamente si possono utilizzare sia celle ad elettrolita polimerico, che celle ad alta temperatura (celle a carbonati fusi o ad ossidi solidi), a seconda delle caratteristiche delle utenze termiche ed elettriche ed alla taglia del sistema di generazione. Sebbene la configurazione che utilizza celle ad alta temperatura sembra economicamente promettente, questo tipo di stazioni sono ancora in fase di studio.

La prima stazione di tipo "total energy" è stata allestita a Las Vegas (Nevada) da Air Products e Plug Power nel 2002, qui l'idrogeno non utilizzato per il rifornimento di veicoli, va ad alimentare una cella ad elettrolita polimerico da 50 kW che genera energia elettrica che viene immessa nella rete pubblica.

Altro esempio di stazione "total energy" è quello della Home Energy Station della Honda, un impianto che partendo dal gas naturale fornito per usi domestici consente di produrre l'idrogeno necessario per l'alimentazione di un veicolo e di generare elettricità e calore per usi residenziali attraverso una cella a combustibile (unità PEFC 5-7 kW).



Energy station - Air Products/Plug Power (Las Vegas, NE, USA)



Home Energy Station IV - Honda / Plug Power (Torrance, CA, USA)

- **Stazioni di rifornimento mobili**

Per finire abbiamo le cosiddette "unità mobili", sistemi package che comprendono tutto quanto necessario per rifornire un veicolo a partire dal sistema di produzione o dall'accumulo di idrogeno montati su mezzo mobile. Queste unità integrano sistemi di compressione, sistemi di controllo ed un accumulo normalmente di piccola capacità e sono quindi adatti alle esigenze di flotte costituite da un limitato di veicoli.

Stazioni mobili sono state sviluppate da Air Products and Chemical e da Linde. L'unità di rifornimento mobile HF-150 dell'Air Products, che non richiede alcuna installazione presso l'utente, contiene ad esempio 150 kg di idrogeno a 450 bar e può erogare 80-90 kg di idrogeno.

In Giappone, ad Ome (Tokyo) la Babcock-Hitachi, in collaborazione con la QuestAir Technologies, ha realizzato una stazione mobile che produce idrogeno per reforming del gas naturale, che si integra con un sistema di accumulo sviluppato dalla Nippon Sanso Corp. installato su un secondo automezzo. La stazione è viene utilizzata nel quadro delle attività dimostrative del Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project (JHFC).



Unità Air Products HF-150



Stazione idrogeno Ome (Tokyo) - Progetto JHFC

Per far sì che i veicoli a celle a combustibile possano arrivare sul mercato nell'arco di 10-15 anni, occorre realizzare un'adeguata rete di distribuzione di idrogeno. Secondo alcune stime (Progetto HyNet, 2004) per coprire il fabbisogno di un'elevata percentuale della popolazione europea (Unione Europea, più Norvegia e Svizzera) si dovrebbero realizzare circa 10.000 stazioni di rifornimento, 7.500 delle quali costruite in città con oltre 20.000 abitanti e 2.500 lungo le autostrade (considerando una stazione ogni 50 km). La creazione di questa rete, che rappresenta solo l'8% delle stazioni di rifornimento esistenti in Europa (circa 135.000), comporterebbe costi d'investimento

#### Stime di costo per diverse tipologie di stazioni di rifornimento idrogeno

Tipologia stazione di rifornimento	Costo (migliaia di \$)
Steam reforming del metano, 100 kg/giorno	1.048
Steam reforming del metano, 1.000 kg/giorno	5.137
Elettrolisi (energia elettrica da rete), 30 kg/day	550
Elettrolisi (energia elettrica da rete) 100 kg/giorno	923
Elettrolisi (energia da rinnovabili, PV), 30 kg/giorno	616
Unità di rifornimento mobili, 10 kg/giorno	243
Idrogeno liquido da impianto centralizzato, 1.000 kg/giorno	2677
Energy Station (sistemi PEFC), 100 kg/giorno	1216
Idrogeno fornito attraverso gasdotto, 100 kg/giorno	583

Fonte: J. X. Weinert, T. E. Lipman, Rapporto UCD-ITS-RR-06-03 (2006)

dell'ordine di 7-15 miliardi di euro, da distribuire nell'arco di un decennio.

Studi analoghi, relativi agli Stati Uniti, eseguiti dalla Shell Hydrogen valutano che per garantire una copertura nazionale al primo milione di veicoli a idrogeno venduti occorrono circa 11.000 stazioni di servizio.

A titolo puramente indicativo in tabella si riportano costi di investimento previsti per stazioni di rifornimento di varie dimensioni, rifornite sia con idrogeno da impianto centralizzato che prodotto on-site, tratti da uno studio dalla Università di California di Davis (2006), al quale si rimanda per maggiori dettagli.

#### **Normative di sicurezza per le stazioni di rifornimento idrogeno**

A livello internazionale diverse organizzazioni (ISO, CEN, IEC, ASME, ecc.) stanno lavorando alla stesura di codici, standard e linee guida per l'uso in sicurezza dell'idrogeno. Il Comitato Termotecnico Italiano, ente federato all'UNI, che svolge attività normativa, ha al suo interno un Gruppo Consultivo dedicato all'idrogeno.

Oggi per le stazioni di rifornimento di idrogeno vengono in genere applicate normative e regole tecniche che disciplinano la costruzione ed esercizio degli impianti a gas naturale.

In Italia, il Ministero degli Interni ha approvato una regola tecnica che riguarda la "Prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione". Il decreto entrato in vigore il 3 ottobre 2006, è finalizzato a:

- rendere minime le cause di rilascio accidentale di idrogeno, di incendio e di esplosione;
- limitare, in caso di evento incidentale, danni alle persone;
- limitare, in caso di evento incidentale, danni ad edifici e/o locali contigui all'impianti;
- permettere ai soccorritori di operare in condizioni di sicurezza;

Il decreto precisa le ubicazioni consentite per gli impianti di distribuzione di idrogeno e definisce le modalità costruttive e le caratteristiche dei componenti e delle apparecchiature che le costituiscono. Si precisa tra l'altro che gli impianti per la produzione on-site dell'idrogeno, laddove previsti, debbano essere oggetto di specifica valutazione di rischio essendo molteplici le modalità e le tecniche adottabili per la loro realizzazione.

Il provvedimento consente la costruzione di impianti nell'ambito di stazioni di distribuzione stradale di altri carburanti, purché che siano rispettate precise distanze di sicurezza.

## ALTRE APPLICAZIONI NEL TRASPORTO

Per favorire un progressivo ingresso del mercato, in una prima fase le celle a combustibile potrebbero trovare applicazione, oltre che su veicoli di aziende di trasporto (autobus, furgoni), su mezzi di trasporto di piccola taglia oggi equipaggiati con sistemi di accumulo elettrico, come veicoli industriali (es. carrelli elevatori), scooter e biciclette, ma anche su imbarcazioni. Sfruttando questi mercati di nicchia, si riuscirebbe a ridurre il costo delle celle grazie alle economie di scala e al tempo stesso si agevolerebbe la progressiva creazione di un'adeguata rete di distribuzione dell'idrogeno.

Un mercato di notevoli dimensioni, guardato con molto interesse dalle industrie che sviluppano celle, è quello dei carrelli elevatori. Negli ultimi anni, Ballard, Hydrogenics, Nuvera Fuel Cells, Proton Motor e Toyota hanno realizzato sistemi per la propulsione di questo tipo di veicoli. Le celle garantiscono al mezzo una continuità di funzionamento superiore a quella consentita dagli accumulatori elettrici normalmente impiegati e sono installabili nello stesso vano occupato dalle batterie a cui si vanno a sostituire, per cui la loro adozione non richiede rilevanti modifiche al veicolo.

**General Hydrogen** (ora acquistata da Plug Power) ha ordinato alla Ballard stack Mark 9 SSL di potenza compresa tra 4.8 e 21 kW, da integrare in sistemi (Hydricity) per la propulsione di carrelli elevatori di diversa classe.



General Hydrogen - Veicoli industriali alimentati con moduli Hydricity Pack da 12,5 kW e 9 kW (unità Ballard)



Carrello elevatore Hyster alimentato con un unità HyPM da 12 kW

La **Hydrogenics** nel 2005 ha installato unità HyPM 12 su due carrelli elevatori della Hyster, usati in Canada all'interno di un impianto della General Motors (Oshawa, Canada) e alla FedEx per impieghi all'aeroporto di Toronto.

Questi veicoli, di tipo ibrido (cella/supercondensatore), alimentati con idrogeno (1,6 kg a 350 bar) hanno una autonomia di 12 ore e richiedono meno di 5 minuti per essere riforniti.

Unità Hydrogenics dello stesso tipo sono state recentemente consegnate alla Still International che, nel quadro del Progetto "Hamburg Airport mit Wasserstoff (H2) unterwegs", sta convertendo a celle a combustibile due veicoli elettrici per la movimentazione di bagagli all'interno dell'aeroporto di Amburgo. In precedenza la Still, in collaborazione con **Proton Motor** e Linde, aveva realizzato un carrello elevatore sempre alimentato con celle a combustibile che ha operato con successo all'aeroporto di Monaco, nel quadro del Progetto H2Argemuc (Idrogeno per l'Aeroporto di Monaco).

**Nuvera Fuel Cells** ha un accordo di collaborazione con la East Penn Manufacturing Co., per lo sviluppo di sistemi per carrelli elevatori di tipo ibrido, che includono unità PowerFlow integrate con batterie e un serbatoio di accumulo di idrogeno.

Infine la **Toyota Motors**, a gennaio 2007, ha mostrato un prototipo di forklift, il FCHV-F, sviluppato in collaborazione con la Toyota Industries Corporation. Sul veicolo realizzato in configurazione ibrida è installato uno stack PEFC da 30 kW e un supercondensatore (potenza di picco 20 kW) che è ricaricato dall'energia recuperata nei processi di frenata.



FCHV-F Toyota

Le celle a combustibile polimeriche possono trovare impiego in applicazioni navali, con sistemi che vanno dai pochi kW richiesti dalle imbarcazioni più piccole o nel caso di usi come unità di potenza ausiliaria (APU), fino alle centinaia di kW richiesti per la propulsione di navi di media taglia.



Siemens - Unità BZM 34 usate nel sottomarino HDW Classe U212

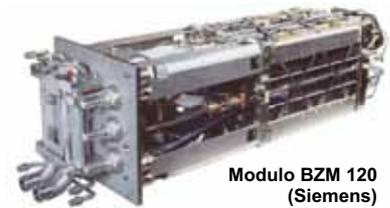
Ricordiamo che **Siemens** (Erlanger, D) ha in corso lo sviluppo di celle per applicazioni su sottomarini nel quadro di un programma con il Ministero della Difesa tedesco. Le prime PEFC (BZM34 da 34 kW) per la propulsione di sottomarini sono state consegnate alla Howaldtwerke-Deutsche Werft (HDW, Kiel, D) nel 1998.

I sottomarini sono equipaggiati con un sistema di propulsione ibrido costituito da un motore elettrico ed un motore diesel. L'energia per l'alimentazione del motore elettrico, che viene attivato durante le immersioni nelle fasi di andatura silenziosa, viene fornita da un'unità PEFC e da batterie. Il motore diesel genera l'energia necessaria per la propulsione, per la ricarica delle batterie e per la produzione di idrogeno.

Proprio per questo tipo di applicazioni, la Siemens ha messo successivamente a punto unità da 120 kW (BZM 120), che a parità di volume e peso consentono

prestazioni quattro volte superiori ai moduli usati in precedenza.

Sono stati costruiti quattro sottomarini per la Marina tedesca e ricevuti ordini dalla Marina Greca, Portoghese e Coreana (unità della classe 214). Infine in collaborazione con Fincantieri sono in corso di realizzazione due unità della classe 212 per la Marina Italiana.



**Modulo BZM 120**  
(Siemens)

Celle ad elettrolita polimerico (2 unità da 50 kW) della Proton Motors saranno installate su un battello ad uso turistico (progetto ZEMSHIP, Zero Emission Ship) che si sta realizzando nel quadro di un'iniziativa promossa dal comune di Amburgo, cofinanziata dall'Unione Europea nel programma Life. Il battello, che avrà una capienza di 100 passeggeri, entrerà in servizio nell'estate del 2008 nel bacino dell'Alster.

Diverse industrie ed organizzazioni di ricerca hanno in corso lo sviluppo di prototipi di scooter e biciclette alimentati con celle ad elettrolita polimerico. Tra le aziende che lavorano nel settore si ricordano **Honda, Masterflex, Palcan, Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Intelligent Energy** e **Vetrix**.



**ENV Intelligent Energy**  
Unità PEFC da 1 kW



**Scooter Vectrix VX-FCe** - Unità PEFC da 500 W (Protonex)

Per finire il **Fuel Cell Propulsion Institute** (consorzio internazionale costituito da organizzazioni industriali, accademiche e di governo con sede nel Colorado, USA), in passato ha convertito a celle a combustibile due veicoli per miniera con finanziamenti da parte del Dipartimento dell'Energia statunitense e del Natural Resources Canada, sta attualmente lavorando allo sviluppo di una locomotiva per usi militari nel quadro di un'iniziativa promossa dal National Automotive Center (NAC) dell'Esercito statunitense.



**Locomotiva per miniere (2002)**

Unità PEFC Nuvera da 17 kW  
Idrogeno accumulato in Idruri metallici  
Coordinamento del progetto: Vehicle Projects LLC  
Partecipanti: CANMET, Hatch Associates, MSHA, Placer Dome, Sandia National Laboratories, Stuart Energy Systems (ora Hydrogenics), Nevada University / Reno.



**Veicolo per miniere Caterpillar-Elphinstone (2002-2006)**

Potenza: 160 kW (sistema ibrido PEFC 90 kW Nuvera / batteria NiMH)  
Idrogeno accumulato in idruri metallici (HERA)  
Coordinamento del progetto: Vehicle Projects LLC  
Altri partecipanti alla realizzazione del veicolo: AeroVironment, Caterpillar, DRS-Technologies, Hydrogenics, Modine Manufacturing

Sistema PEFC 1,2 kW

Sistema di accumulo idrogeno (H<sub>2</sub> in idruri metallici, 250 kg)



**Conceptual design della locomotiva**



**Locomotiva a celle a combustibile**

Potenza: 1,2 MW  
Idrogeno accumulato in idruri metallici (HERA)  
Coordinamento del progetto: Vehicle Projects LLC  
Altri partecipanti alla realizzazione del veicolo: AeroVironment, MesoFuel

## LE ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO IN ITALIA

In Italia la crescita d'interesse per le tecnologie dell'idrogeno ed i finanziamenti pubblici che il Ministero dell'Università e della Ricerca ed il Ministero dell'Ambiente hanno reso disponibili per le celle a combustibile attraverso il Fondo Integrativo Speciale per la Ricerca (FISR), hanno prodotto negli ultimi anni l'avvio di attività di ricerca e sviluppo nel settore delle celle ad elettrolita polimerico da parte di diverse organizzazioni pubbliche e private. Attività di tipo industriale rimangono comunque fondamentalmente concentrate in Nuvera Fuel Cells ed Exergy Fuel Cells, società che dispongono di una propria tecnologia di cella.

### Nuvera Fuel Cells

Le attività di Nuvera Fuel Cells (al quel tempo De Nora), avviate nel 1989 con il contributo dell'ENEA, sono rivolte allo sviluppo a fini commerciali di sistemi a idrogeno per applicazioni industriali, sistemi a gas naturale per generazione di potenza distribuita e cogenerazione e di componenti (stack e unità di reforming) di sistemi per applicazioni automobilistiche.

Nuvera, società nata nel 2000 dalla fusione della De Nora Fuel Cells e dell'Epyx Corp. (divisione dell'Arthur D. Little), appartiene oggi all'azienda energetica Amerada Hess Corporation, che detiene la maggioranza delle azioni, al Gruppo De Nora e alla Renault e ha sedi in Italia e negli Stati Uniti. A seguito di una recente riorganizzazione sono state trasferite negli Stati Uniti (Bilberica, Massachusetts), le attività di sviluppo e produzione della tecnologia e lasciate in Italia quelle relative allo sviluppo del "Forza", sistema progettato per l'utilizzo di idrogeno ottenuto da impianti industriali (impianti cloro-soda, di cui il gruppo De Nora è uno dei leader mondiali), ma che può trovare applicazione anche su mezzi di trasporto di grossa taglia (locomotive, navi). Restano all'interno del Gruppo De Nora lo sviluppo e produzione di catalizzatori ed elettrodi. La divisione Ricerca e Sviluppo della Industrie De Nora, come vedremo, è uno dei partecipanti del progetto FISR coordinato da ENEA.

Nuvera dispone di una tecnologia che le consente di realizzare stack con buone prestazioni e caratteristiche adatte alla produzione di serie. Gli stack Nuvera si distinguono per l'uso di piatti bipolari in materiale metallico non rivestito e di un sistema di raffreddamento ed umidificazione della cella, basato su iniezione diretta di acqua nel lato catodico (tecnologia *Cathode Water Injection*). In pratica entrando in cella l'acqua evapora producendo un raffreddamento della stessa e il vapor d'acqua generato garantisce un giusto grado di umidificazione alla membrana. Questa tecnologia conduce ad una semplificazione dei componenti del balance-of-plant necessari al funzionamento del sistema, riducendo pesi ed ingombri di quest'ultimo.

La società, che nell'ambito di programmi dimostrativi è in continuo contatto con strutture di ricerca pubbliche e private, ha preso parte a numerosi progetti su idrogeno e celle a combustibile, collaborando in Europa con partner industriali come Renault, PSA-Peugeot, Air Liquide ed altri. Sistemi di potenza inferiori a 5 kW a gas naturale ed a idrogeno sono stati sperimentati in Stati Uniti ed in Giappone.

Nell'ambito di un accordo tra Nuvera, Uhdenora e Caffaro, nel 2006, presso gli stabilimenti di quest'ultima a Brescia, è entrato in funzione il primo modulo Forza™ da 120 kW, alimentato con l'idrogeno proveniente da un impianto elettrochimico. Il sistema, prima dell'installazione presso la Caffaro, era stato validato presso il laboratorio che Nuvera ha realizzato all'interno del sito Siad di Osio (Bergamo), dove aveva operato producendo oltre 185.000 kWh, con una disponibilità del 95%. Il laboratorio di qualifica di Osio, che è stato potenziato con nuove apparecchiature di prova, consente a Nuvera di verificare la funzionalità dei suoi sistemi per lunghi periodi e avendo a disposizione una fornitura continua di idrogeno, che viene ottenuto con elevato grado di purezza (fino al 99,9995%) da un innovativo impianto di steam reforming.

### Sistemi Nuvera Fuel Cells e relative applicazioni

#### PowerFlow™ - Applicazioni su veicoli industriali (carrelli elevatori)

Potenza nominale	2.5 - 5 kW
Efficienza	52%
Funzionamento	Automatico
Combustibile	Idrogeno
Rumore	66 dBA a 1 m
Volume	81 litri *

\* esclusi radiatore ed elettronica



#### Forza™ - Sistemi modulari a idrogeno per usi industriali e applicazioni nel trasporto ferroviario e navale

Potenza	125 kW
Efficienza	52%
Combustibile	Idrogeno
Dimensioni	165 m x 125 cm x 150 cm
Peso	1500 kg



#### Avanti™ - Unità CHP a gas naturale per generazione distribuita

Potenza	2.3-4,6 kW
Potenza termica	6,9 -7,6 kW
Efficienza totale	> 75 %
Combustibile	Gas naturale
Temperatura oper.	-20°C - 40 °C
Dimensioni	120 m x 56 cm x 140 cm



#### Andromeda™ II - Unità per usi veicolari

Potenza	85 kW
Densità di potenza	1.3 kW/L (a bassa pressione) 1.6 kW/L (ad alta pressione)
Dimensioni	90 cm x 55 cm x 21 cm
Peso	140 kg





**Impianto Forza da 120 kW  
presso i laboratori di Osio**

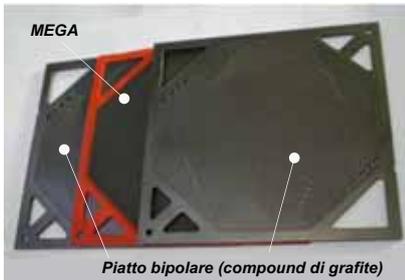
Un secondo modulo Forza™, come accennato in precedenza, è stato installato in Canada dalla Sacré-Davey Innovations (Vancouver, BC) ed è alimentato, anche in questo caso, con idrogeno proveniente da un impianto elettrolitico.

In Italia, Nuvera ha un accordo di collaborazione con il Centro Ricerche Fiat (CRF) e Fiat Powertrain Technologies per lo sviluppo di sistemi di propulsione per veicoli a celle a combustibile. Il modulo HDL-82 messo a punto nell'ambito dell'accordo integra lo stack Andromeda II, con un compressore ad alta efficienza, sistemi di umidificazione e raffreddamento dei gas reagenti e una serie di componenti ausiliari, tutti sviluppati all'interno del Gruppo Fiat.

Questo sistema, già utilizzato sulla Panda Hydrogen, sarà integrato su un autobus a idrogeno che un gruppo di aziende, tra cui la ISE Corporation, sta realizzando negli Stati Uniti nell'ambito di un progetto finanziato dalla Federal Transit Authority.

## Exergy Fuel Cells

Exergy Fuel Cells (Sasso Marconi, Bologna), nota come Arcotronics Fuel Cells fino a novembre 2007 quando è stata acquisita dalla svedese Morphic, ha iniziato la attività nel settore delle celle a combustibile come Roen Est, società nata nel 2000 con il supporto dell'ENEA.



**Componenti di cella  
(Exergy Fuel Cells)**

La società ha sviluppato, nell'ambito di una collaborazione con ENEA, una configurazione di cella nella quale si utilizza il cosiddetto MEGA (Membrane Electrode Gasket Assembly). Il MEGA, che riunisce in un unico componente l'assemblato membrana/elettrodo e le guarnizioni, ha suscitato un forte interesse per i vantaggi che è in grado di offrire rispetto ai sistemi tradizionali che utilizzano tenute in viton o in tessuti gommati. La rapidità di esecuzione sia nella preparazione che nell'inserimento in cella di questi componenti, la possibilità di conservarli tal quali e già pronti per l'utilizzo e di un riutilizzo degli stessi più volte, nonché il risparmio di membrana polimerica che permette di ottenere, sono tutti fattori che risultano fondamentali per la messa a punto di prodotti industrializzabili.

Negli stack sono stati utilizzati sia piatti bipolari in compound a base di grafite, che in materiale metallico. I piatti in compound di grafite sono realizzati con una tecnologia di produzione per stampaggio (protetta da brevetto), che consente una notevole riduzione dei costi (<5 €/piatto anche per bassi volumi di produzione) e dei tempi di lavorazione di questi componenti.

Obiettivi della società, che ha ormai acquisito una posizione consolidata nel panorama delle celle ad elettrolita polimerico stabilendo collaborazioni con diversi partner, sono lo sviluppo di:

- sistemi di cogenerazione per usi residenziali da 3-5 kW, alimentati a metano, e di generatori da 1 kW a GPL (per barche, camper, ecc.);
- sistemi con celle a combustibile nella fascia 500 W -50 kW, sia per usi stazionari che per il trasporto.

Exergy Fuel Cells sta collaborando con la ICI Caldaie (Verona) allo sviluppo del Siderea 30, un sistema a gas naturale di potenza 30 kW per cogenerazione. La società partecipa inoltre a diversi progetti dimostrativi, tra cui ricordiamo:

- le iniziative promosse dalla Regione Piemonte, che vedono la partecipazione di Environmental Park - HySyLab e Politecnico di Torino (Progetti Micro-CHP e Celco Yacht, realizzazione dello scooter Hysyrid);
- il progetto Idrogeno per Arezzo, nel quale è prevista l'installazione di quattro unità Penta da 5 kW, presso utenti del distretto orafino aretino che già impiegano

### Sistemi Exergy Fuel Cells

#### Electrum H2 - Unità UPS

Potenza 1 kW  
Efficienza 42%  
Combustibile Idrogeno



#### Penta - Unità CHP 5 kW

Potenza 5 kW  
Efficienza 35%  
Combustibile Gas Naturale  
Rumore 45 dBA a 1 m

#### Unità PEFC da 25 kW per applicazioni nel trasporto



#### SIDERA 30 - Unità CHP sviluppata da ICI Caldaie con stack Exergy Fuel Cells

Potenza elettrica 30 kW (4 stack PEFC)  
Potenza termica 45 kW  
Voltaggio 312 V  
Corrente 75 A  
Combustibile Gas naturale  
Efficienza elettrica 31-33 %  
Efficienza totale 80 %  
Dimensioni 85 cm x 245 cm x 222 cm



idrogeno per i loro fabbisogni industriali, e di due generatori Electrum da 1 kW. Questi ultimi saranno provati da HydroLab, laboratorio per l'idrogeno e le energie rinnovabili della Fabbrica del Sole, costituito con finanziamenti della Regione Toscana;

- alcuni progetti finalizzati allo sviluppo di veicoli ibridi ad idrogeno, quali il veicolo ZEV1, lo scooter ZEV2 e il NEO (No Emission Outfit), realizzato nel quadro di una collaborazione con la Micro-Vett e Sapio.

La collaborazione di Exergy Fuel Cells con ENEA sta proseguendo all'interno del Progetto FISIR "Sviluppo delle tecnologie delle celle a combustibile e dei sistemi per le loro applicazioni" (2005-2009) coordinato da quest'ultimo e descritto nel seguito.

**ZEV1**  
(Zero Emission Vehicle)  
Potenza: 20 kW  
Autonomia: 80 km  
Velocità max.: 50 km/h  
Combustibile: idrogeno (200 bar)



**Scooter**  
Potenza: 4 kW  
Autonomia: 80 km  
Velocità max.: 45 km/h  
Combustibile: idrogeno (200 bar)

## ENEA

L'ENEA lavora nel settore delle celle a combustibile ad elettrolita polimerico dalla fine degli anni '90, svolgendo attività di ricerca presso i suoi laboratori, collaborando con le principali industrie (Nuvera Fuel Cells, Exergy Fuel Cells) e strutture di ricerca (CRF, Istituti del CNR e Università) e coordinando progetti nazionali per conto dei Ministeri.

Le attività svolte presso i laboratori ENEA riguardano in particolare:

- sviluppo di materiali e componenti di cella (catalizzatori elettrodici, membrane, materiali per piatti bipolari) e dei relativi metodi di fabbricazione
- ingegneria di stack (studio di soluzioni innovative per sistemi di raffreddamento, umidificazione, alimentazione dei gas)
- progettazione, realizzazione e sperimentazione di prototipi per diverse applicazioni.

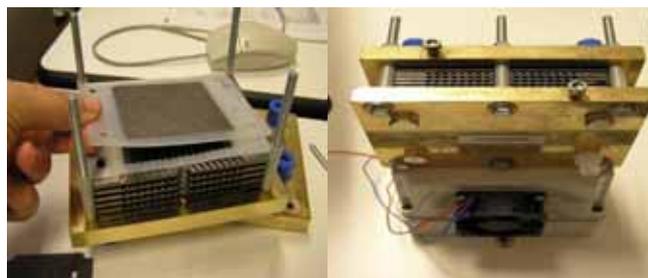
Negli ultimi anni le azioni di maggior rilievo sono state svolte all'interno di due progetti finanziati dal Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica attraverso il Fondo Integrativo Speciale per la Ricerca.

Il progetto FISIR "Sviluppo di tecnologie e componenti per sistemi con celle a combustibile ad elettrolita polimerico", relativo al periodo 2003-2005, riguardava lo sviluppo di competenze e tecnologie su due componenti critici del sistema, lo stack ed l'unità di trattamento del combustibile. In particolare era prevista la progettazione e realizzazione, con tecniche innovative, di uno stack con piatti in grafite di potenza inferiore a 1 kW in grado di operare a bassa pressione e lo sviluppo di catalizzatori specifici per i diversi stadi di conversione del combustibile in idrogeno con purezza adatta ad impieghi in cella.

Il progetto oltre ad ENEA, che svolgeva anche il ruolo di coordinatore, vedeva il coinvolgimento di Exergy Fuel Cells (allora Arcotronics Fuel Cells), Istituti del CNR (Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia, Istituto Motori, Istituto di Ricerca sulla Combustione), della società Ponte di Archimede, del Politecnico di Torino e delle Università di Genova, Messina e Salerno.

Le attività della linea relativa allo sviluppo stack si sono concluse con la realizzazione presso i laboratori ENEA ed in Exergy Fuel Cells, rispettivamente di uno ministack in grado di operare a bassa pressione ed di uno stack da 20 celle di potenza inferiore a 1 kW, che adottavano una ingegneria di sistema e materiali differenti, pur impiegando entrambi la tecnologia del MEGA.

In parallelo alle attività di sviluppo stack, presso i diversi istituti del CNR e le strutture di ricerca universitarie, venivano eseguiti studi indirizzati allo sviluppo di catalizzatori per i diversi stadi del processo di conversione del combustibile, attività che doveva portare ad individuare i materiali catalitici più promettenti per l'ossidazione parziale e per il reforming autotermico del GPL e quelli specifici per i diversi stadi del processo di purificazione del gas di sintesi prodotto.



Ministack ENEA da 5 celle

Le attività stanno proseguendo all'interno di un nuovo progetto FISIR "Sviluppo delle tecnologie delle celle a combustibile e dei sistemi per le loro applicazioni" (Progetto TECSA, lug. 2005 - gen. 2009), sempre coordinato da ENEA, che si propone lo sviluppo sia di celle polimeriche che a carbonati fusi. Nel progetto, su linee diverse, sono impegnate le principali strutture industriali nazionali (Exergy Fuel Cells e Industrie De Nora per le celle ad elettrolita polimerico, Ansaldo Fuel Cells per quelle a carbonati fusi). Per entrambe le tecnologie, le attività previste riguardano:

- aumento delle prestazioni e riduzione dei costi attraverso lo sviluppo di materiali, componenti e nuove configurazioni di cella;
- sviluppo di sistemi per diverse applicazioni e sperimentazione degli stessi con diversi combustibili.

## Programma Strategico "Nuovi sistemi di produzione e gestione dell'energia" - FISR

### Progetto "Sviluppo delle tecnologie delle celle a combustibile e dei sistemi per le loro applicazioni"

#### Linea 1. Celle a combustibile ad elettrolita polimerico

Il progetto, nella linea relativa alle celle ad elettrolita polimerico, che coinvolge ENEA, Exergy Fuel Cells e la Industrie De Nora R&D Division, prevede le seguenti attività:

##### A. Ricerca e sviluppo di materiali e componenti innovativi

In questa linea ci si propone di mettere a punto nuovi materiali e processi di produzione dei componenti attivi della cella (elettrodi, membrana e assemblati membrana/elettrodi), per superare i limiti attuali della tecnologia in termini di prestazioni (durata, resistenza agli inquinanti) e costi. Sono previste le seguenti azioni:

- sviluppo di catalizzatori innovativi, sia anodici che catodici, e di nuove tecniche per la preparazione di catalizzatori ed elettrodi (ENEA, Industrie De Nora)
- sviluppo di membrane polimeriche potenzialmente a basso costo e in grado di funzionare a temperature più alte (90-100 °C), attraverso la modifica delle strutture attualmente impiegate e lo studio di nuovi elettroliti (ENEA)
- studio di nuove tecniche di fabbricazione degli assemblati membrana/elettrodi, che consentano di ottimizzare la struttura degli stessi e siano potenzialmente adatte ad una produzione industriale (ENEA, Industrie De Nora).

I materiali e componenti sviluppati nel quadro del progetto saranno valutati sia fuori cella (caratterizzazioni chimiche e chimico-fisiche) che in cella.

##### B. Sviluppo stack e nuove configurazioni di cella

L'attività si pone, da un lato, l'obiettivo di migliorare la tecnologia di stack attualmente disponibile, sia dal punto di vista della durata che delle soluzioni adottate per i componenti e l'ingegneria, dall'altro di studiare nuove configurazioni di cella, promettenti sia per semplificare la gestione dello stack che per consentire il suo impiego in applicazioni specifiche.

Sono previste le seguenti azioni:

- progettazione e realizzazione con tecnologie di fabbricazione innovative, e caratterizzazione di componenti di cella (piatti, tenute, elettrodi) di superficie superiore a 500 cm<sup>2</sup> (ENEA, Exergy Fuel Cells)
- realizzazione e caratterizzazione di monocelle e stack (fino a 80 kW di potenza) con componenti, di area superiore a 500 cm<sup>2</sup>, messi a punto nell'ambito del Progetto e utilizzando le soluzioni più avanzate disponibili presso i partecipanti per quanto riguarda l'ingegneria dello stack (ENEA, ExergyFuel Cells)
- sviluppo e realizzazione di un prototipo da laboratorio di cella miniaturizzata alimentata con sodioboridruro (NaBH<sub>4</sub>) da utilizzare in prospettiva per l'alimentazione di dispositivi elettronici (ENEA)

##### C. Realizzazione e sperimentazione di sistemi 1-5 kW, con diversi combustibili

L'industria nazionale è impegnata, con il supporto dell'ENEA, nello sviluppo di sistemi con diversi combustibili e per diverse applicazioni (sistemi a idrogeno della potenza dell'ordine di 5 kW per applicazioni stazionarie e per trazione, sistemi a gas naturale da qualche kW per applicazioni stazionarie, sistemi da 1 kW a GPL per applicazioni diverse).

Nell'ambito del progetto è prevista la realizzazione di prototipi di stack e sistemi e la sperimentazione degli stessi, per verificarne le prestazioni ed individuarne i limiti e le necessità di ulteriori sviluppi. Nello specifico sono previste le seguenti azioni

- test comparativi, prestazionali e di durata, su stack di potenza di circa 1-5 kW, ad elevata area attiva, alimentati con idrogeno puro (Industrie De Nora)
- test comparativi, prestazionali e di durata, su stack da 4 kW nominali, alimentati con gas riformato (Industrie De Nora)
- progettazione, realizzazione e sperimentazione di un prototipo da 1 kW a GPL, per applicazioni portatili (Exergy Fuel Cells, ENEA).

## Progetto TECSA

Durata: luglio 2005 – gennaio 2009

Costo totale: 10,8 M€

### LINEA 1 CELLE A COMBUSTIBILE AD ELETTROLITA POLIMERICO ENEA, Exergy Fuel Cells, Industrie De Nora

- Ricerca e sviluppo di materiali e componenti innovativi
- Sviluppo stack e nuove configurazioni di cella
- Realizzazione e sperimentazione di stack e sistemi da 1-5 kW, con diversi combustibili

### LINEA 2 CELLE A COMBUSTIBILE A CARBONATI FUSI ENEA, Ansaldo Fuel Cells

- Ricerca e sviluppo di materiali e componenti innovativi
- Sviluppo di sistemi combinati cella/turbina attraverso sviluppo di un emulatore di un sistema MCFC da 500 kW
- Sperimentazione di un impianto da 125 kW con biocombustibili
- Analisi di impatto ambientale e ciclo di vita



Stazione di prova per celle da 500 cm<sup>2</sup>  
(ENEA, Laboratori C.R. Casaccia)

Nell'ambito dell'Accordo di Programma con il Ministero dello Sviluppo Economico afferente al Piano CERSE (Comitato degli Esperti per la Ricerca sul Sistema Elettrico), è stato approvato un progetto ENEA riguardante lo sviluppo di sistemi per cogenerazione con celle a combustibile. Nella linea del progetto relativa alle celle ad elettrolita polimerico è inserita la sperimentazione di un sistema PEFC di potenza 5 kW. L'attività viene condotta in collaborazione con Exergy Fuel Cells.

### CESI Ricerca

CESI Ricerca è una società a maggioranza pubblica (ENEA 51% - CESI "Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano Giacinto Motta" SpA 49%) che svolge attività finalizzate all'innovazione e al miglioramento del sistema elettrico nazionale dal punto di vista dell'economicità, della sicurezza e della compatibilità ambientale.

Al fine di contribuire alla dimostrazione delle potenzialità delle celle a combustibile nel campo della generazione di energia distribuita, il CESI Ricerca da oltre venti anni svolge attività di sviluppo e dimostrazione di celle di diversa tipologia (PEFC, MCFC, SOFC).

Per quanto riguarda la tecnologia PEFC, sono stati sperimentati sistemi alimentati con idrogeno accumulato in idruri metallici. È stato realizzato un impianto costituito da un sistema di accumulo da 6500 NL di idrogeno, sviluppato allo scopo, e da un sistema composto da tre moduli ReliOn Independence 1000 da 1 kW. L'impianto era completamente automatizzato ed in grado di pilotare le fasi di accumulo e rilascio dell'idrogeno in funzione delle richieste della cella.

Presso CESI Ricerca sono stati inoltre condotti studi di modellistica di cella, volti a descriverne il comportamento prevalentemente dal punto di vista termofluidodinamico.



Sistema PEFC presso i laboratori CESI Ricerca

### CNR - Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia "Nicola Giordano"

L'istituto ha una lunga esperienza nel settore delle celle a combustibile ad elettrolita polimerico, le attività di ricerca sono rivolte allo sviluppo di materiali e componenti di cella (catalizzatori, membrane, elettrodi), alla realizzazione di prototipi di stack di piccola taglia (fino a 1 kW) e alla sperimentazione e caratterizzazione di prototipi di stack (potenza superiore a 5 kW) e sistemi integrati PEFC di diversa tecnologia.

Parte di queste attività sono svolte nel quadro del Progetto FISR "Sviluppo di materiali innovativi e dimostrazione di sistemi basati su celle a combustibile per usi stazionari", coordinato dall'ITAE, nel quale sono inserite sia attività di ricerca sulle celle ad elettrolita polimerico che ad ossidi solidi. Il progetto è svolto in collaborazione con Nuvera Fuel Cells, Enitecnologie, ENEL, CNR-Istituto per l'Energetica e le Interfasi, ed il Consorzio Interuniversitario nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali (INSTM). Relativamente alle PEFC è previsto:

- lo sviluppo di materiali e componenti per PEFC di nuova generazione, che utilizzano MEA in grado di lavorare a più alta temperatura (da 90 °C a 120°C) e più tolleranti al CO;
- la dimostrazione ed ottimizzazione di stack e sistemi 1-5 kW, alimentati a gas naturale per generazione distribuita, sviluppati dai partner del progetto.

Presso l'ITAE è attivo da alcuni anni un gruppo di ricerca impegnato nello sviluppo di unità di generazione di idrogeno da 1-10 kW equivalenti da integrare con stack PEFC. Nel 2006 è stato realizzato, in collaborazione con la società Sirtis (Genova), un prototipo, denominato HYGEN II, in grado di convertire idrocarburi leggeri (metano, GPL, propano) in idrogeno con una produzione nominale di 5 Nm<sup>3</sup>/h. Il prototipo risulta costituito da reattore di reforming autotermico (ATR), un reattore di shift a temperatura intermedia e da un reattore di ossidazione preferenziale (PROX). L'unità ATR utilizza un catalizzatore sviluppato dall'ITAE a base di platino supportato su ossido di cerio, i catalizzatori dell'unità di shift e PROX sono invece di tipo commerciale.



Stack PEFC da 125 W (CNR-ITAE)



Unità HYGEN II (636 mm x 868 mm x 1350 mm)



Impianto TEA per la produzione elettrodi (Ponte di Archimede)

Si ricorda che nell'ambito del progetto TEA (Tecnologie Elettrochimiche Avanzate) avviato dall'ITAE alla fine degli anni '90, era stato realizzato, in collaborazione con la Società Ponte di Archimede di Messina, un impianto pilota per la produzione in serie di elettrodi a diffusione gassosa per celle polimeriche. Il progetto era stato cofinanziato dalla Regione Sicilia (nell'ambito del Programma Operativo Plurifondo Sicilia 1994-1999). L'impianto comprende due linee automatizzate separate, rispettivamente per la deposizione dello strato diffusivo e per quella dello strato catalitico.

Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, la Regione Siciliana ed il Consiglio Nazionale delle Ricerche hanno siglato un Accordo di Programma ed approvata la realizzazione a Messina di un "Centro per la Promozione dell'Innovazione ed il Trasferimento delle Tecnologie Energetiche". Una volta realizzato nel centro verranno

condotte attività di caratterizzazione, certificazione di prototipi di nuove tecnologie energetiche tra cui quelle basate sull'utilizzo di celle a combustibile. Il centro disporrà di una serie di stazioni sperimentali atte alla caratterizzazione e prova di diverse tipologie di celle a combustibile (PEFC, MCFC, SOFC).

## Environment Park - HySyLAB

Environment Park, in collaborazione con il gruppo SAPIO, il Politecnico di Torino e il Gruppo Torinese Trasporti e con finanziamenti da parte della Provincia di Torino, della Regione Piemonte e dell'Unione Europea, ha realizzato al suo interno HySyLab (Hydrogen System Laboratory), laboratorio per la ricerca e lo sviluppo delle tecnologie dell'idrogeno.

HysyLab, che è operativo dal 2003, svolge attività di ricerca di base su componenti (MEA) per celle di tipo polimerico, test su banco prova di monocelle e stack fino a 10 kW di potenza e caratterizzazioni di sistemi per cogenerazione (potenza < 5 kW).

Nel quadro del progetto MicroCHP, in collaborazione con Exergy Fuel Cells, Merloni Termo Sanitari, HySyTECH, IREM e Politecnico di Torino, HysyLab è impegnato nella realizzazione di un'unità CHP a metano da 4 kW adatta per usi domestici e piccole utenze del terziario (alberghi, ristoranti, uffici).

Altre attività sono in corso all'interno del progetto CELCO Yacht, che prevede lo studio, la realizzazione e la validazione di un sistema per la sperimentazione di un'unità di generazione APU con potenza 15 kW per l'alimentazione degli ausiliari di bordo di un'imbarcazione. Il sistema prevede la possibilità di usare idrogeno prodotto a bordo attraverso un processo di reforming a partire da un combustibile navale per motori diesel di facile reperibilità nei porti. Altre attività del progetto prevedono lo studio di fattibilità di un sistema basato su celle a combustibile (potenza nell'intervallo 600-1000 kW) da destinare alla propulsione di imbarcazioni da diporto fino a 18 metri.



Laboratori HysyLab

Tra le più recenti iniziative del laboratorio ricordiamo la realizzazione di uno scooter a celle a combustibile, HYSYRIDER®. Il veicolo è stato sviluppato da Environment Park, con il sostegno della Camera di Commercio Industria Artigianato e Agricoltura di Torino, Regione Piemonte e Comune di Torino e attraverso la collaborazione con Exergy Fuel Cells e Gruppo Sapio.



**HYSYRIDER**  
Potenza cella 300 W  
Batterie 7.2 Ah  
Velocità max 20 km/h  
Autonomia 2 ore  
Serbatoio 200 NL

HYSYRIDER® è basato su un'architettura ibrida: la cella a combustibile (300 W, 20 celle) lavora in parallelo con un pacco batterie (7.2 Ah) necessario per l'avviamento. Il funzionamento in parallelo è garantito da un convertitore DC/DC ed è utilizzato per incrementare e stabilizzare il voltaggio della cella. La propulsione è generata dalla cella, funzione della batteria è quella di sopperire a eventuali picchi di potenza.

L'idrogeno è accumulato in un serbatoio a idruri che garantisce quasi due ore di autonomia a pieno regime (20 km/h). L'energia termica generata dalla cella a combustibile è utilizzata per riscaldare il serbatoio così da ottimizzare il desorbimento dell'idrogeno.

## Electro Power Systems

Electro Power Systems, fondata a Torino nel 2005, sviluppa prodotti di potenza fino a 50 kW per cogenerazione e per generazione di potenza di back-up. La società sta mettendo a punto sistemi da 7 kW (Electro7) a idrogeno ed unità da 50 kW (Electro50) a gas naturale.

Nel 2007 un'unità Electro7 è entrata in esercizio presso una stazione di Telecom Italia e sono in corso studi per valutarne prestazioni ed affidabilità in condizioni reali.

	ELECTRO7 (UPS)	ELECTRO50
Potenza elettrica	7 kW	50 kW
Voltaggio	230 Vac	400 Vac
Corrente	22 A	60 A
Combustibile	Idrogeno	Gas naturale (20 Nm <sup>3</sup> /h)
Emissioni	Acqua > 4 L/h CO, NOx < 1 ppm	CO < 10 ppm
Dimensioni	596 x 818 x 1174 mm	-
Peso	300 kg	-



Attività di ricerca sulle celle a combustibile ad elettrolita polimerico sono in corso o anche presso diverse strutture universitarie, tra queste si segnalano il **Politecnico di Torino e di Milano** e le **Università di Genova, Roma, Messina**. Le diverse strutture sono per lo più impegnate in attività di ricerca di base su materiali e componenti di cella e nello sviluppo di modelli di cella o di stack.

In Italia accanto alle molte strutture coinvolte nello sviluppo della tecnologia PEFC e di sistemi per usi stazionari, operano industrie e gruppi di ricerca che sono attivi nella realizzazione e dimostrazione di prototipi di veicoli alimentati con celle ad elettrolita polimerico.

## Gruppo FIAT

FIAT Auto è impegnata dal 1998 nello sviluppo di veicoli a celle a combustibile con l'obiettivo di verificare la sostenibilità tecnico-economica di questa tecnologia. Con il contributo del Ministero dell'Ambiente, presso il Centro Ricerche Fiat (CRF) sono stati realizzati diversi veicoli a idrogeno alimentati con celle ad elettrolita polimerico.

La collaborazione del Centro Ricerche FIAT con la Nuvera ha portato alla realizzazione di tre prototipi di veicoli. Nel 2001 era stato realizzato il primo prototipo, la Seicento "Elettra H<sub>2</sub> Fuel Cell", veicolo derivato dalla Seicento Elettrica, della quale manteneva alcuni componenti, quali il motore elettrico asincrono trifase a corrente alternata e il pacco batterie, che era stato però ridimensionato. Il veicolo presentava una configurazione ibrida, con lo stack da circa 7 kW che fungeva da sorgente di potenza ausiliaria.

La cella era alimentata con idrogeno in pressione (200 bar), accumulato in sei bombole (9 litri ciascuna) sistemate nella parte posteriore della vettura, che riducevano gli spazi interni ai soli due posti anteriori.

Successivamente è stata presentata la Seicento "Hydrogen", veicolo in grado di superare i limiti di prestazioni ed abitabilità del prototipo precedente. Il veicolo era realizzato in configurazione ibrida, lo stack da 40 kW era collegato direttamente al motore di trazione che riceveva dal pacco batterie (Ni-idruri metallici) un'integrazione di potenza durante i transitori di accelerazione; le batterie erano utilizzate anche per il recupero dell'energia di frenata. Nella Seicento Hydrogen venivano adottate soluzioni innovative, come il particolare compressore sviluppato dal CRF che consentiva elevate dinamiche di risposta, bassa rumorosità ed elevata efficienza. La miniaturizzazione dei componenti e ad una loro migliore integrazione consentiva di ripristinare l'abitabilità del veicolo a quattro passeggeri, riducendone il peso di oltre 70 kg.

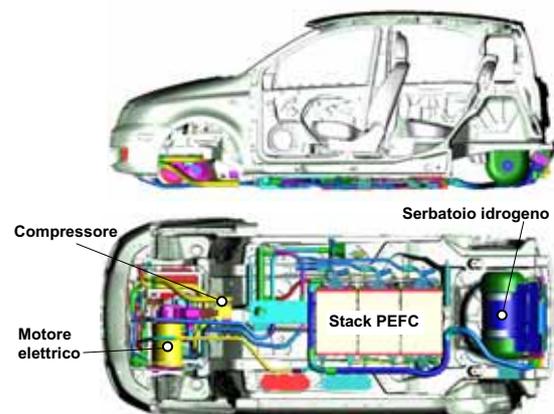
Con questo prototipo, FIAT nel 2004 ha partecipato a Montecarlo, alla prima gara di regolarità per veicoli alimentati a idrogeno, classificandosi al secondo posto tra i veicoli della sua categoria (celle a combustibile) e al primo posto tra quelli alimentati ad idrogeno compresso. La corsa era articolata in due tappe su un percorso di circa 410 chilometri attraverso Svizzera, Italia, Francia e Principato di Monaco.

L'ultimo prototipo realizzato, la Panda Hydrogen, è il risultato di un lavoro congiunto di Fiat Auto, del Centro Ricerche Fiat e di Fiat Powertrain Research & Technology (FPT), con il sostegno finanziario dei Ministeri dell'Università e Ricerca e dell'Ambiente.

Contrariamente ai prototipi presentati in passato, la Panda Hydrogen presenta un'architettura di tipo "full power" caratterizzata dall'assenza di batterie di trazione per l'accumulo dell'energia elettrica. La cella, collocata sotto il pianale, è in grado di fornire tutta la potenza necessaria al motore elettrico di trazione garantendo un'elevata guidabilità della vettura.

Il motore elettrico di trazione e la trasmissione sono collocati nel vano motore insieme ai vari ausiliari necessari al funzionamento dell'intero sistema. L'idrogeno è contenuto, alla pressione di 350 bar, in un serbatoio realizzato in composito, posto sotto il pianale posteriore della vettura.

A piena potenza, la cella eroga 60 kW, consentendo alla vettura di



Layout Panda Hydrogen (CRF/FPT)



**2001 - FIAT Elettra H<sub>2</sub> Fuel Cell**  
 Potenza: 30 kW (PEFC 6.7 kW + batterie al Pb)  
 Autonomia: 100 km (+ 40 km con batteria)  
 Velocità max: 100 km/h  
 Combustibile: idrogeno 200 bar



**2003 - FIAT Seicento Hydrogen**  
 Potenza: 40 kW PEFC + batteria NiMH  
 Autonomia: 210 km (ciclo UDC)  
 Velocità max: 130 km/h  
 Combustibile: idrogeno 350 bar



**2005- FIAT Panda Hydrogen**  
 Potenza: 75 kW (Stack PEFC)  
 Autonomia: 220 km  
 Velocità max: 130 km/h  
 Combustibile: idrogeno 350 bar

### Caratteristiche sistemi PEFC



Potenza: 6,7 kW (50 V @ 135A)  
 Volume: 17,3 litri  
 Pressione: 1,1 -1,4 bar ass  
 Temperatura oper.: 50 - 70 °C



Potenza: 49 kW (180 V @ 270)  
 Volume: 88 litri  
 Pressione: 1,05bar ass  
 Temperatura oper.: 50- 70 °C



Potenza: 75 kW (240 V @ 320 A)  
 Densità di potenza: 1.2 kW/L  
 Nessuna umidificazione  
 Pressione: 1,05 -1,6 bar ass  
 Temperatura oper.: 70 °C

raggiungere una velocità massima di oltre 130 km/h, con un'accelerazione da 0 a 50 km/h in 5 secondi. L'idrogeno accumulato a bordo assicura un'autonomia di oltre 200 km nel ciclo urbano. Il tempo di rifornimento è inferiore a 5 minuti, paragonabile a quello di una vettura a metano con motore a combustione interna.



Nel quadro del Progetto Zero Regio, tre Panda Hydrogen sono state affidate al Comune di Mantova che ne effettua la sperimentazione su strada su percorsi riservati fino al termine del progetto (novembre 2009). Le autovetture sono dotate di un sistema per la raccolta e trasmissione dati (chilometri percorsi, idrogeno consumato, velocità media, ecc) per monitorare le prestazioni del veicolo e verificare l'affidabilità delle celle. I dati vengono analizzati dal Centro Ricerche Fiat e dal Joint Research Centre di Ispra. La flotta si rifornisce alla stazione multienergy realizzata da ENI in località Valdaro, nell'immediata periferia di Mantova.

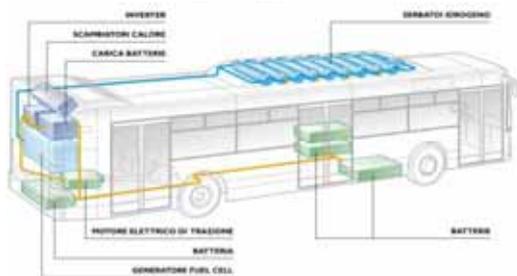
Le vetture sono intrinsecamente sicure perché omologate secondo le norme imposte dalla nuova direttiva europea ECE/ONU in via di approvazione (2008) e, come tali, provviste dei più avanzati dispositivi di sicurezza. Anche i componenti della linea idrogeno sono stati certificati dai produttori secondo le stesse norme.

La **Irisbus Italia**, società nata dalla fusione dei settori autobus di IVECO e Renault, ha sviluppato il primo autobus a celle a combustibile omologato in Italia. L'autobus, presentato ufficialmente nel maggio 2001 a Torino, era stato realizzato nell'ambito di una Associazione Temporanea di Imprese che oltre ad Iribus, responsabile dello sviluppo del veicolo, comprendeva: **GTT** (Gruppo Torinese Trasporti, esercizio in linea del prototipo), **Sapio** (accumulo e distribuzione idrogeno), **CVA** Compagnia Valdostana Acque (energia elettrica da fonti rinnovabili per la produzione di idrogeno), **ENEA** (valutazioni energetiche ed ambientali) ed **Ansaldo Ricerche** (azionamenti elettrici). Il **Centro Ricerche Fiat** nel progetto svolgeva il ruolo di consulente tecnico di Irisbus ed era responsabile del sistema di controllo e gestione dell'energia sul veicolo e del sistema informativo di bordo, che registrava i principali parametri e i dati più significativi dell'operatività del veicolo (consumi, rendimenti, autonomia, etc.).



**Progetto IRISBUS**  
Motore: 150 kW (PEFC 60 kW)  
Alimentazione: idrogeno 200 bar  
(9 bombole x 140 L)  
Autonomia: 12 ore di esercizio  
Velocità max: 60 km/h

Il veicolo era costruito sul telaio di un Cityclass da 12 metri a metano, per usufruire delle predisposizioni esistenti per l'installazione delle bombole sul tetto. La quantità di idrogeno accumulato in nove bombole (da 140 litri ciascuna) garantiva un'autonomia di circa 150 km.



L'architettura del sistema di propulsione era di tipo ibrido. Il modulo PEFC da 60 kW, fornito dalla statunitense International Fuel Cells (oggi UTC Power), era installato nel vano posteriore del veicolo. La presenza delle batterie garantiva la disponibilità di un contributo di potenza aggiuntiva necessario al veicolo durante le fasi di accelerazione e nelle salite. L'uso di batterie consentiva, inoltre, la possibilità di recupero dell'energia in frenata che, nel percorso urbano, rappresenta un contributo non trascurabile per estendere l'autonomia del veicolo.

Il contributo non trascurabile per estendere l'autonomia del veicolo.

Nel 2002, l'autobus è stato sottoposto a prove sperimentali di collaudo su pista (5.000 km percorsi, di cui 500 su pavè), che ne hanno consentito la messa a punto. L'esito positivo di queste prove ha permesso l'omologazione e l'immatricolazione del prototipo. Per ottenere l'omologazione dopo alcune verifiche con il TÜV, l'ente di controllo tedesco, si era operato a stretto contatto con gli enti titolari a rilasciare le necessarie autorizzazioni. L'attività aveva visto il coinvolgimento dei Ministeri dell'Ambiente, dei Trasporti (circolazione stradale e trasporti pubblici), degli Interni (Vigili del fuoco e sicurezza antincendi) e della Sanità (ISPESL, impianti e serbatoi in pressione), e del Politecnico di Torino.

Dopo omologazione, l'autobus ha circolato su strade pubbliche a Torino, simulando le condizioni del servizio di linea, per acquisire ulteriore esperienza nella gestione e manutenzione del veicolo e



**Midibus Europolis**  
Potenza: PEFC 60kW + batterie Ni-MeH  
Alimentazione: idrogeno  
Autonomia: > 200 km

misurarne le prestazioni energetiche ed ambientali. Il primo vero servizio pubblico è stato effettuato in occasione dei Giochi Olimpici invernali del 2006.

Nel quadro del Programma Europeo CityCell, un autobus simile, era stato consegnato a Madrid. Attualmente FIAT sta lavorando allo sviluppo di un midibus ibrido che sarà realizzato sulla base dell'autobus Iveco Europolis.

**Progetto HYTRAN – Obiettivi al 2008**

	Sistema FC 80 kW Idrogeno	APU 5 kW Diesel
Durata,	2.000 h	2.000 h
Temperatura operativa	-20 °C / +40 °C	-20 °C / +40 °C
Efficienza	50	37
Tempo di start-up a bassa temperatura	<10 s	< 2 min
Costo	188 €/kW	3.000
Peso	100 kg	136 kg
Volume	100 L	180 L

Il Centro Ricerche FIAT, oltre che al progetto Zero Regio, partecipa al Progetto HYTRAN, sempre cofinanziato dall'Unione Europea. Obiettivo di HYTRAN, coordinato da Volvo, è quello di portare la

tecnologia PEFC per usi veicolari, vicina alla commercializzazione e sviluppare due sistemi integrati a celle a combustibile: un sistema PEFC da 80 kW, per la trazione di un autoveicolo alimentato ad idrogeno; un sistema APU da 5 kW, costituito dall'integrazione di un reformer a gasolio ed di una cella polimerica, adatto ad applicazioni su veicoli industriali.

## Micro-vett

Micro-Vett, che opera dal 1987 nell'ambito della produzione di veicoli elettrici, ibridi e bimodali ed è una delle aziende leader in questo settore in Italia, in collaborazione con Exergy Fuel Cells e il Gruppo Sapio, ha sviluppato il NEO (No Emission Outfit), prototipo a celle a combustibile alimentato a idrogeno adatto per trasporti commerciali.

Il veicolo di tipo ibrido è derivato dal Daily 65 Iveco, già omologato e in produzione in versione elettrica, del quale conserva tutte le possibilità operative, a fronte soltanto di una piccola riduzione del carico utile.

Nella versione ad idrogeno, il veicolo è equipaggiato con uno stack PEFC da 5 kW, che produce sufficiente energia da raddoppiare la percorrenza del veicolo puramente elettrico. La cella e tutti gli ausiliari necessari al suo funzionamento sono contenuti in un'apposita struttura situata nel vano motore. A bordo l'idrogeno è accumulato a 350 bar, in bombole in materiale composito, alloggiato nella parte posteriore del veicolo. Le batterie (ZEBRA, nichel-cloruro di sodio), poste sotto la cabina di guida, vengono continuamente ricaricate dalla cella.

Prove finalizzate all'omologazione del veicolo saranno effettuate su un circuito di prova allestito presso il Centro ENEA di Brasimone.



Prestazioni veicolo NEO

	Daily 65 Idrogeno	Daily 65 elettrico
Potenza max	60 kW	60 kW
Capacità batterie	Da 34 a 42 kWh	Da 34 a 64 kWh
Velocità max	70 km/h	70 km/h
Autonomia	Da 150 a 250 km	Da 70 a 120 km
Peso totale	6500 kg	6500 kg
Portata	Fino a 3600 kg	fino a 3910 kg

## Aprilia

Aprilia ha realizzato una bicicletta e due prototipi di scooter a celle a combustibile alimentati a idrogeno. Il primo prototipo, era un ciclomotore derivato dalla bicicletta a pedalata assistita "Enjoy". Sul veicolo era installata una cella da 700 W sviluppata dalla **Manhattan Scientifics/NovArs**. Rispetto alla versione a batteria disponibile sul mercato, il modello con celle a combustibile pesava 6 kg in meno e consentiva un'autonomia circa doppia (75 km, con 2,2 litri di idrogeno contenuto in una bombola in fibra di carbonio, a 300 bar).



ENJOY Fuel Cell (2000)

Con lo stesso tipo di celle era stato in seguito realizzato il Mojito FC, uno scooter su cui era montata una cella da 3 kW.



Mojito FC (2002)

Infine alla Fiera di Hannover del 2004, era stato esposto l'Atlantic Zero Emission, evoluzione dei prototipi precedenti, progettato sempre in collaborazione con MES-DEA. Il veicolo era equipaggiato con un sistema PEFC ad idrogeno da 6 kW (2 stack).

Il sistema, collocato nel vano sottosella, consentiva un'autonomia di viaggio di 150 km ed una velocità massima di 85 km/h. Le bombole di idrogeno (3 unità da 6,8 litri ciascuna) erano integrate nel telaio che era stato appositamente modificato. Rispetto ai precedenti prototipi, in questo il sistema propulsivo era totalmente integrato nel corpo del veicolo.



Atlantic Zero Emission (2004)

In passato anche **ENEA** ha realizzato a scopi dimostrativi un prototipo di bicicletta elettrica a pedalata assistita alimentata da una cella ad elettrolita polimerico. La bicicletta era derivata da un modello elettrico commerciale, su cui era stato montato un sistema di generazione che utilizzava uno stack Nuvera da 300 W. Con una bombola da 5 litri a 200 bar (pari a 1 Nm<sup>3</sup>) di idrogeno si aveva un'autonomia di 100-130 km (variabile a seconda del tipo di percorso) a fronte dei 20-25 km della versione elettrica a batteria.

Sul prototipo era stato predisposto un sistema di controllo che consentiva il monitoraggio dello stack sia in fase di avviamento che durante il funzionamento e ai fini della sicurezza procedeva al blocco del sistema in caso di anomalie.

## CELLE AD ACIDO FOSFORICO

Le celle ad acido fosforico (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell) operano a temperature prossime a 200 °C con un elettrolita costituito da una soluzione concentrata di acido fosforico. I sistemi che utilizzano questo tipo di celle sono caratterizzati da un'efficienza elettrica tra il 37 ed il 42% e consentono di disporre di calore ad una temperatura tale da poter essere sfruttato sia all'interno dell'impianto, che per utenze esterne di cogenerazione.

La temperatura di funzionamento della cella è abbastanza elevata da non richiedere gas di alimentazione estremamente puri, ma non così alta da creare problemi legati ai materiali; è quindi possibile alimentare la cella con correnti gassose provenienti da processi di reforming di idrocarburi, senza la necessità di stadi di purificazione intermedi.

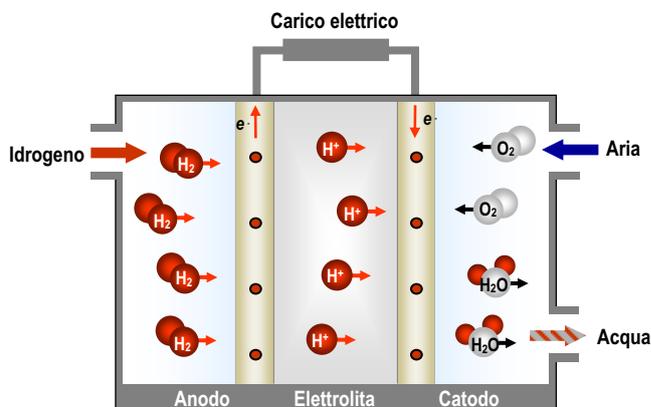
La tecnologia delle celle ad acido fosforico, sviluppata principalmente negli Stati Uniti e in Giappone, è ormai praticamente matura per la generazione elettrica e la cogenerazione di piccola-media taglia. Con celle ad acido fosforico sono stati realizzati ed eserciti sistemi ed impianti di diverse caratteristiche, con potenze che vanno da 50 kW fino agli 11 MW.

Costruttori impegnati nello sviluppo di impianti con celle ad acido fosforico sono oggi l'UTC Power e HydroGen negli Stati Uniti, Fuji Electric Advanced Technology e Toshiba International Fuel Cells in Giappone.

La tecnologia è sul mercato dal 1991 con un impianto da 200 kW, il PureCell™ (in precedenza noto come PC25), prodotto e commercializzato dall'UTC Power. Il sistema, in passato, è stato distribuito in Giappone dalla Toshiba Corp. e in Europa dalla società italiana Ansaldo.

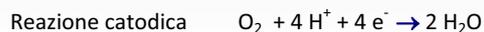
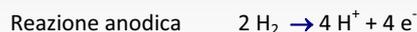
Le celle ad acido fosforico, prima del notevole sviluppo della tecnologia PEFC, avevano trovato applicazione anche nel trasporto (autobus urbani).

Il settore degli impianti di media taglia alimentati a gas naturale è quello più promettente nel medio termine per i sistemi con celle ad acido fosforico e quello su cui si punta per l'introduzione sul mercato di questi sistemi. Le applicazioni più promettenti per le PAFC si possono individuare in quei campi di utilizzo dove, oltre ad un'elevata efficienza elettrica, diventa rilevante sia la qualità dell'energia prodotta, che il ridottissimo impatto ambientale localizzato (ospedali, alberghi, edifici commerciali, società di telecomunicazione).



### REAZIONI ELETTROCHIMICHE

Le reazioni che avvengono in una cella ad acido fosforico sono:



Come nel caso delle PEFC, l'acqua si forma al catodo ed è espulsa, assieme all'aria in eccesso, nel gas di scarico del comparto catodico.

Al processo partecipa solo idrogeno; se si utilizza gas di sintesi, è necessario convertire tutto l'ossido di carbonio eventualmente presente in anidride carbonica ed idrogeno. La presenza di CO nel gas alimentato all'anodo, oltre che portare ad una diminuzione del rendimento di cella, comporta un avvelenamento dei catalizzatori elettrodi.

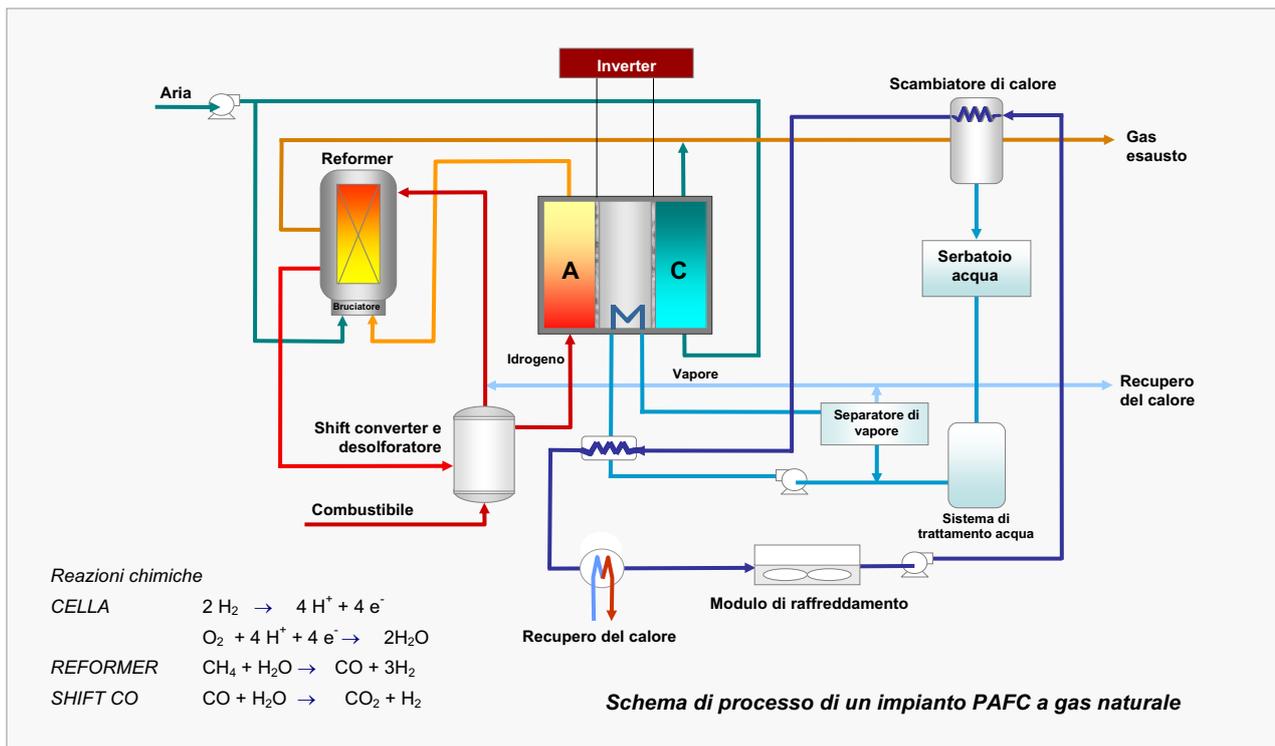
Massimo tenore di CO ammesso dalla cella: 1%

### MATERIALI DEI COMPONENTI DI CELLA

<b>Anodo</b>	Platino legato a PTFE su supporto di carbone (Vulcan XC-72) Contenuto Pt: 0,10 mg/cm <sup>2</sup>
<b>Catodo</b>	Platino legato a PTFE su supporto di carbone (Vulcan XC-72) Contenuto Pt: 0,50 mg/cm <sup>2</sup>
<b>Elettrolita</b>	100% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> su matrice amorfa (PTFE-SiC)
<b>Piatti bipolari</b>	Grafite

I problemi ancora aperti riguardano l'ottimizzazione delle prestazioni e della durata degli impianti, ma soprattutto la riduzione dei costi, ancora elevati rispetto a quelli dei sistemi convenzionali. Per l'ingresso sul mercato, gli obiettivi da raggiungere sono una durata di almeno 40.000 ore ed un costo inferiore a circa 1.500 \$/kW.

L'obiettivo di durata è ormai stato conseguito da diverse unità, mentre un intenso sforzo di ricerca è ancora in atto per la riduzione dei costi di installazione (attualmente dell'ordine di 3.000-4.000 \$/kW), obiettivo questo che potrà essere raggiunto solo dopo l'avvio della produzione di serie.



## PROGRAMMI DI RICERCA, SVILUPPO E DIMOSTRAZIONE

### STATI UNITI

#### UTC Power

Il PureCell™ dell'UTC Power (South Windsor, CT) è un impianto "package" che genera energia elettrica utilizzando come combustibile gas naturale; l'impianto fornisce altresì energia termica disponibile per riscaldamento e/o condizionamento.

L'idrogeno necessario alla reazione viene prodotto dal sistema di trattamento del combustibile a partire da gas naturale (ma anche da biogas) che, dopo purificazione attraverso uno shift converter ed un desolfatore, viene miscelato con vapor d'acqua ed inviato al reformer.

La quantità di idrogeno prodotta viene ulteriormente incrementata nel reattore di shift nel quale viene rinvia la miscela in uscita dal reformer. Si aumenta in questo modo l'efficienza di produzione dell'idrogeno e al tempo stesso si elimina il monossido di carbonio che produce avvelenamento degli elettrocatalizzatori.

Il calore prodotto dalla cella viene utilizzato da un lato per produrre il vapore necessario al processo di reforming e dall'altro può essere utilizzato per utenze esterne.

La corrente continua prodotta dai moduli elettrochimici viene trasformata in corrente alternata dal sistema di condizionamento della potenza.

Il PureCell™ è il sistema attualmente più diffuso nel mondo, con oltre 275 impianti installati in 19 paesi in Stati Uniti, Europa, Asia ed Australia. La flotta ha accumulato circa 8 milioni di ore di esercizio, generando più di 1,3 milioni di MWh e dimostrando, oltre che un'efficienza elettrica intorno al 40% in tutti gli impianti, buona affidabilità ed ottime caratteristiche ambientali.



PureCell™ 200 (South Windsor, CT- 2002)

CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO PureCell™ 200	
Potenza elettrica nominale	200 kW/235 kVA con gas naturale
Voltaggio	480/277 V a 60 Hz 400/230 V a 50 Hz
Efficienza elettrica	37-40%
Efficienza totale (PCI)	85% (elettrica + termica)
Energia termica disponibile	260 kW a 60 °C
Disponibilità	> 95 %
Modalità di funzionamento	Automatico, non presidiato, indipendente o in parallelo alla rete
Tempo di avviamento a freddo	< 5 ore
Tempo di risposta al variare del carico	15 s da 0-100%
Emissioni	CO < 2 ppm, SO <sub>x</sub> trascurabile NO <sub>x</sub> 1 ppm
Rumore	≈ 60 dBa 10 m
Dimensioni: Modulo principale Modulo raffreddamento	3,0 m x 2,9 m x 5,4 m 4,1 m x 1,3 m x 1,2 m

Oltre 100 impianti hanno superato le 40.000 ore di funzionamento, indicate come obiettivo da raggiungere per la commercializzazione e l'impianto in Central Park a New York, installato nel 1999, a dicembre 2006 aveva raggiunto 66.000 ore di esercizio. Il più lungo funzionamento ininterrotto, pari a 9.500 ore, è stato registrato da unità installata presso la Tokyo Gas a Yokohama.

Il Department of Defense statunitense tra il 1994 ed il 1997 ha installato 30 unità UTC da 200 kW (un Modello PC25A, 14 PC25B e 15 PC25C) in diversi siti militari degli Stati Uniti. Obiettivo del programma dimostrativo, svolto sotto la direzione del U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, era quello di fornire una valutazione delle prestazioni di questo tipo d'impianti in condizioni climatiche e geografiche, completamente diverse.

Negli Stati Uniti chi ha acquistato questi sistemi ha ricevuto un contributo governativo a fondo perduto (pari ad un terzo del valore dell'acquisto) attraverso il DoE o il DoD, che intendevano in questo modo promuovere la penetrazione sul mercato della tecnologia delle celle a combustibile.

E' stato stimato che, rispetto a sistemi di generazione di energia di tipo tradizionale, le unità PureCell™ consentono di ottenere notevoli riduzioni degli inquinanti immessi nell'atmosfera. La flotta di unità del Programma DoD aveva consentito di ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub> di 281 Mg, di SO<sub>x</sub> di 595 Mg e di CO<sub>2</sub> di 36.043 Mg.

Standard CARB 2007 (g/MWh)	
NO <sub>x</sub>	31,75
CO	45,36
VOC	9,07

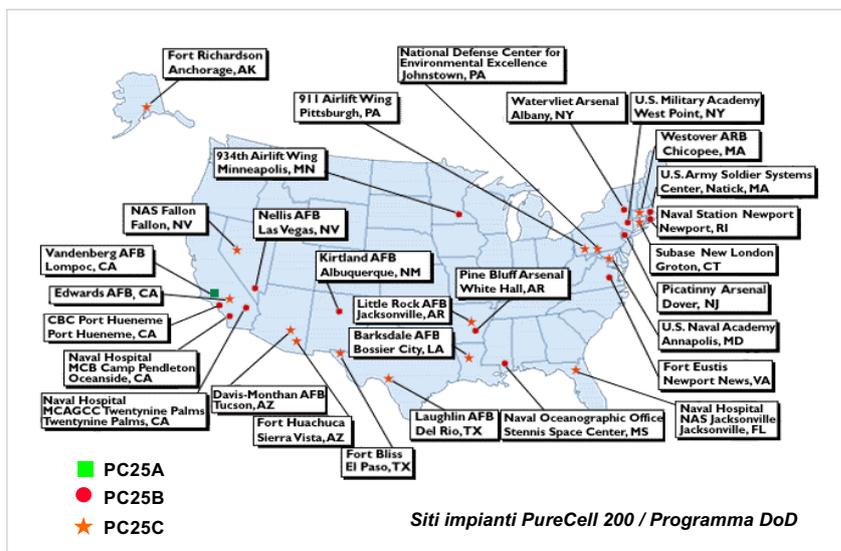
A questo proposito si ricorda che in California le unità PureCell™ 200 sono esenti dalle restrizioni imposte agli impianti di generazione di potenza distribuita, dalle restrittive leggi sulla qualità dell'aria in vigore nello Stato e che per quanto riguarda le emissioni l'impianto incontra o eccede gli standard fissati dalla California Air Resources Board (CARB07).

L'elevata affidabilità del sistema dimostrata dai diversi impianti eserciti, li rende particolarmente adatti ad applicazioni che richiedono continuità nell'erogazione della corrente elettrica come banche o società di telecomunicazioni, dove la mancanza di energia elettrica può provocare seri danni. Nel 1997 la First National Bank di Omaha, in Nebraska, aveva stimato che la sospensione di un'ora della fornitura di energia elettrica le aveva procurato danni economici per circa sei milioni di dollari. Questo l'aveva indotta ad installare nel proprio centro servizi informatici, a scopo cautelativo, quattro unità da 200 kW.

Attualmente unità PureCell™ sono installate presso hotel, ospedali, scuole ed uffici pubblici. A New York impianti da 200 kW UTC sono stati collocati presso la stazione di polizia di Central Park e in un edificio in Times Square, dove l'unità fornisce illuminazione per la facciata, generazione di energia elettrica autonoma in caso di black out ed acqua calda; sette unità per una potenza totale di 1,4 MW sono state collocate in un centro di telecomunicazioni della Verizon a Long Island.

La UTC nel 2000 aveva consegnato un impianto da 1 MW alla Chugach Electric Association, per fornire energia e calore al Mail Processing Center di Anchorage, in Alaska. L'impianto era costituito da 5 unità PureCell™ connesse in parallelo,

Località	N. unità	Data installazione	Ore funzionamento a novembre 2006
Yonkers (Yonkers, NY)	1	Aprile 1997	50.183
26th Ward (Brooklyn, NY)	2	Ottobre 2003	52.018
Oakwood Beach (Staten Island, NY)	1	Aprile 2004	23.661
Red Hook (Brooklyn, NY)	2	Dicembre 2003 Febbraio 2004	44.565
Hunts Point (Bronx, NY)	3	Febbraio 2005	51.475



Prestazioni flotta DoD (PC25 Modelli B e C - 31 gennaio 2003)	
Ore di funzionamento totali	847.199 ore
Energia prodotta	142.730 MWh
Disponibilità:	
Flotta Mod. B	66,2 %
Flotta Mod. C	56,7 %
	76,3 %



1 MW Fuel Cell Project, US Post Office, Anchorage, Alaska

ed era configurato in modo da immettere nella rete pubblica l'energia prodotta in eccesso rispetto ai fabbisogni energetici del centro.

Il sistema PureCell™ può essere alimentato anche con biogas, ventidue impianti di questo tipo hanno funzionato in diverse località in Stati Uniti, Europa e Giappone. La New York Power Authority (NYPA) è stata la prima azienda ad esercire una cella alimentata con biogas ottenuto da digestione anaerobica (ADG); l'unità era

stata collocata nel 1997 presso un impianto di trattamento di acque di scarico a Yonkers, nella contea di Westchester. La NYPA in seguito ha acquistato altre otto unità dello stesso tipo.

In Europa, il primo sistema ad impiegare gas da digestore anaerobico è stato installato nel 2000 presso un impianto di trattamento di acque di scarico a Rodenkirchen, nei pressi di Colonia (Germania), nel quadro di un progetto che vedeva la partecipazione della RWE e della RheinEnergie (proprietaria dell'impianto).

I sistemi alimentati con biogas sono integrati con un'unità di purificazione del gas (GPU) che elimina le sostanze potenzialmente dannose prima dell'ingresso in cella. Il biogas viene dapprima filtrato per eliminare il particolato, quindi passa attraverso letti di carbone attivo posti in serie, per rimuovere sostanze solforate o alogenurate eventualmente presenti.

La UTC Power sta lavorando allo sviluppo di un nuovo prodotto che intende rendere disponibile entro il 2009. Il sistema avrà una potenza doppia rispetto al modello PureCell™ 200, una durata dello stack superiore alle 80.000 ore e ridotti costi di fabbricazione e di assistenza e manutenzione.



**PureCell™ 200 a biogas (Rodenkirchen - Colonia, D)**

Durata progetto:	66 mesi
Potenza prodotta	4,5 MWh
Ore di funzionamento	> 33.000
Efficienza elettrica media	36%
Disponibilità	80% cella 70% sistema
Consumo combustibile	> 2 Milioni di Nm <sup>3</sup>
Riduzione emissioni CO <sub>2</sub>	> 2.666 Mg
Emissioni NO <sub>x</sub> -CO	< 10 ppm

**Composizione del biogas (ADG)**

Metano	55 -65 %
CO <sub>2</sub>	30 -40 %
Azoto	0 -10 %
Ossigeno	0 -2,5 %
Benzene	<0,06 mg/m <sup>3</sup>
Toluene	0,0 - 58,0 mg/m <sup>3</sup>
Xilene	0,0 - 0,3 mg/m <sup>3</sup>
Altro	<0,1 mg/m <sup>3</sup>
Solfuri totali	0,0 -112,0 mg/m <sup>3</sup>
Alogenuri totali	0,0 - 8,0 mg/m <sup>3</sup>
Siloxani (R <sub>3</sub> -Si-O-Si-R <sub>3</sub> )	0,0 - 23,5 mg/m <sup>3</sup>



**Unità trattamento gas (GPU)**



**Sistema da 400 kW in sviluppo**

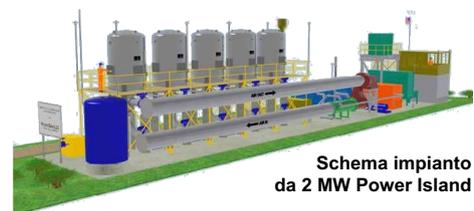
	Obiettivi di mercato	PureCell™ 200	Sistema PAFC 400 kW Proiezioni
Efficienza elettrica	> 35 %	37 %	38 %
Efficienza totale	> 80 %	85 %	85 %
Durata stack	80.000 h	40.000 h	80.000 h
Produzione annua	-	36 unità	500 unità
Costo installazione	< 1.500 \$/kW	< 5.375 \$/kW	< 1.980 \$/kW
Costi O&M	1,8 ¢/MWh	3,7 ¢/MWh	1,8 ¢/MWh

**HydroGen Corporation**

HydroGen Corporation (Versailles, PE, USA) è impegnata nella progettazione e realizzazione di sistemi PAFC multi-MW (6-30 MW) con raffreddamento ad aria. Gli impianti del tipo "power island" saranno costituiti da moduli da 2 MW di potenza, a loro volta formati da unità da 400 kW.

La società utilizza la tecnologia di stack sviluppata dalla Westinghouse Corporation, negli anni Ottanta, all'interno di programmi promossi dal DoE.

Con finanziamenti ottenuti dallo Stato dell'Ohio (Third Frontier Fuel Cell Programme), HydroGen sta lavorando alla realizzazione di un primo prototipo da 400 kW. Al termine della fase di prove condotte nella sua sede di Versailles, il modulo sarà trasferito in un impianto dimostrativo in fase di allestimento a Ashtabula (Ohio), presso la ASHTA Chemicals, dove è disponibile un impianto cloro-soda che fornirà l'idrogeno necessario ad alimentare la cella.



**Schema impianto da 2 MW Power Island**



**Modulo PAFC HydroGen**

Potenza	400 kW (4 stack)
Dimensioni	3.35 m (altezza), 2.13 m (diametro)
Efficienza	43% (PCI)
Raffreddamento	aria

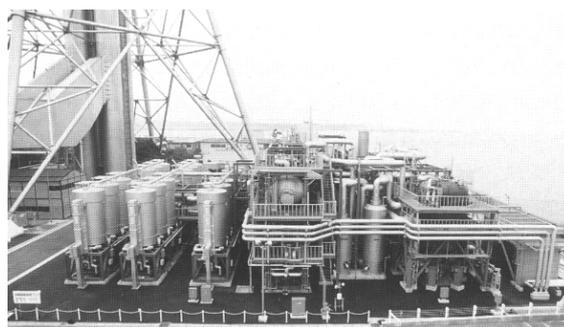
**GIAPPONE**

In Giappone lo sviluppo delle celle ad acido fosforico è stato avviato nel 1981 all'interno del Moonlight Project promosso dalla Agency of Industrial Science and Technology (ora National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) ed è proseguito fino al 1997 entro il New Sunshine Project. Le attività sulle PAFC sono state spesso sostenute da aziende del gas che hanno dimostrato o stanno dimostrando impianti di diversa taglia. Tokyo Gas, Osaka Gas, Toho Gas e Saibu Gas hanno provato finora circa 200 unità con celle ad acido fosforico, con l'obiettivo di dimostrare l'affidabilità sul campo della tecnologia e quindi promuoverne la sua introduzione nel mercato.

Fuji Electric Advanced Technology e Toshiba Fuel Cells Power Systems (in passato Toshiba IFC) sono oggi le sole compagnie ancora attive nel settore delle celle ad acido fosforico.

Oltre a molti impianti di potenza 50-200 kW in passato in Giappone hanno operato:

- un impianto da 11 MW per potenza distribuita costruito da UTC Power e Toshiba, esercito presso la Tokyo Electric Power Company a Goi, nella zona sud-est di Tokyo. L'impianto entrato in esercizio nel 1991 rimase in funzione per 23.000 ore fino al marzo 1997, generando più di 77.000 MWh di elettricità;
- un impianto dimostrativo da 5 MW della Fuji Electric, per cogenerazione a livello di quartiere, installato alla Kansai Electric Power Company;
- tre impianti, sperimentati tra il 1983 e il 1989, due da 1 MW (costruiti rispettivamente da Mitsubishi/Fuji e da Toshiba/Hitachi) ed uno da 4,5 MW, costruito dall'UTC Power (installato a Tokyo);
- un impianto da 1 MW a pressione atmosferica, per cogenerazione in ambiente commerciale, installato dalla Toshiba alla Tokyo Gas.



Impianto PAFC da 11 MW UTC Power (Goi, J)

### Fuji Electric Advanced Technology

La Fuji Electric Advanced Technology (Ichihasashi, J) sviluppa da diversi anni impianti per cogenerazione con celle ad acido fosforico. La società ha consegnato, per attività dimostrative, oltre 100 impianti di potenza compresa tra 50 e 200 kW.

La Fuji sta attualmente sviluppando unità di potenza 100 kW (FP-100). Diciannove sistemi di questo tipo stanno funzionando presso hotel, ospedali, edifici per uffici commerciali ed impianti di trattamento rifiuti e molti di questi hanno già superato le 40.000 ore di esercizio.

La compagnia, che nel corso degli anni ha apportato notevoli miglioramenti allo stack e al sistema di trattamento del combustibile, dall'ottobre 2005 ha iniziato a fornire unità FP-100 capaci di operare per 60.000 ore (oltre 7 anni), che tra l'altro richiedono un minor numero di revisioni.

Per il modello base del FP-100 si riportano costi di fabbricazione nell'intervallo da 500.000 a 1 milione di yen per kW (3.180-6.370 €/kW), e costi di manutenzione di 4-9 M¥/anno (35.480-57.300 €/kW). Attualmente la società sta lavorando ad una nuova configurazione d'impianto (FP-100H) più compatta ed integrata e con costi di produzione e manutenzione ridotti.



#### Specifiche 100 kW PAFC Fuji Electric

Potenza elettrica	100 kW
Voltaggio	210/220 V
Frequenza	50/60 Hz
Efficienza elettrica	40 % (PCI)
Efficienza totale	87% (PCI)
Consumo di combust.	22 Nm <sup>3</sup> -gas di città 45 Nm <sup>3</sup> - biogas
Modalità di funzion.	Automatico /connesso alla rete
Emissioni NOx	<5 ppm
Dimensioni	3,8 m x 2,2 m x 2,9 m

Tipo	Sito	Combustibile	Data di consegna	Ore di esercizio (a nov. 2007)	Note	
Modello I <sup>a</sup> generazione FP-100E	Ospedale	Gas di città	Ago 1998	44.265	Dimostrazione completata	
	Hotel		Mar 1999	74.884	Revisionato dopo 42.000 h	
	Università		Apr 2000	41.735	Dimostrazione completata	
	Edificio uffici		Mar 2001	52.802		
	Edificio uffici		Mar 2001	48.269		
	Edificio uffici		Lug 2000	42.666	Dimostrazione completata	
				48.579		
Modello II <sup>a</sup> generazione FP-100F	Istituto di addestram.	Biogas	Dic 2001	47.006		
	Imp. trattamento rifiuti		Mar 2002	48.007 48.388		
	Ospedale	Gas di città	Lug 2003	38.210		
	Università		Ott 2003	29.985		
	Facility espositiva		Nov 2003	33.081		
	Ospedale		Mar 2004	28.906		
	Edificio uffici		gen 2004	31.886		
	Facility espositiva		Mar 2006	14.475		
	Ospedale		Mar 2006	12.941		
	Ospedale	Mar 2006	12.316			
	Imp. trattamento rifiuti (4 unità)	Biogas			9.659	
					9.600	
			Dic 2006	9.600		
				9.623		
Edificio uffici	Gas di città	Ago 2007				

### Toshiba Fuel Cell Power Systems

Toshiba Fuel Cell Power Systems (Tokyo, J) ha distribuito in Giappone diverse unità per cogenerazione di potenza 200 kW sviluppate in collaborazione con la UTC Power. Quattro di queste sistemi, ad esempio, nel 2005 sono entrati in funzione all'Esposizione Universale di Aichi.

Da segnalare che Toshiba e Nippon Petroleum Gas hanno condotto nel periodo 2004-2006, a Niigata, prove su un'unità PAFC da 200 kW per dimostrare la possibilità di utilizzare come gas di alimentazione il dimetiletere. Quest'ultimo può essere ottenuto da gas naturale o carbone, ma



Unità PAFC da 200 kW (Aichi, Tokyo)

anche attraverso processi di gassificazione di rifiuti di diversa origine.

In **ASIA**, attività di sviluppo di celle ad acido fosforico sono in corso presso la **Korea Gas**, che ha realizzato sistemi da 40 kW e che, in accordo con quanto previsto della roadmap coreana relativa alle celle a combustibile, ha in programma lo sviluppo e dimostrazione di sistemi inferiori al MW.

In **EUROPA** nessun'industria è impegnata nella produzione di stack di celle ad acido fosforico, ma alcune hanno operato per inserirsi nel processo d'industrializzazione e commercializzazione di questi sistemi, attraverso accordi con costruttori statunitensi e giapponesi, cercando ove possibile di dare contributi specialistici su componenti dell'impianto. Fra queste si può citare Ansaldo Ricerche.

## ESPERIENZE DIMOSTRATIVE CONDOTTE IN ITALIA

Le attività che sono state condotte in Italia nel settore delle celle a combustibile ad acido fosforico sono state forse le maggiori in Europa. Tra la fine degli anni '80 e gli inizi degli anni '90 sono state avviate diverse iniziative, molte delle quali promosse dall'ENEA, che hanno avuto come obiettivo lo sviluppo, presso l'industria nazionale, di un'adeguata capacità di progettazione e costruzione di questi sistemi e che hanno portato a realizzare impianti di diversa taglia, in collaborazione con l'industria stessa ed utenti. L'esercizio sperimentale di questi impianti ha consentito di valutare le loro caratteristiche operative (efficienza, affidabilità, necessità di manutenzione, emissioni, ecc.), verificandone i vantaggi energetici ed ambientali.



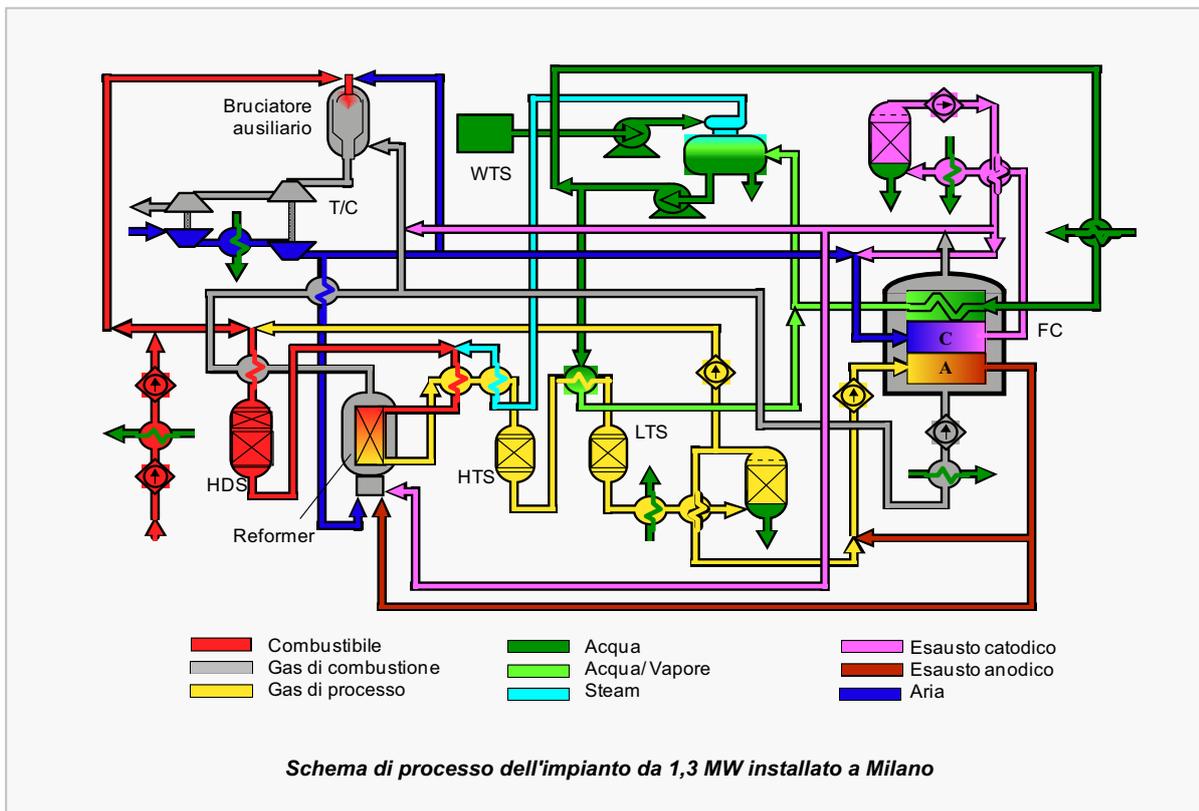
Impianto PAFC da 1.3 MW Milano-Bococca



Stack PAFC da 670 kW

L'azione più importante rimane quella che aveva portato alla realizzazione di un **impianto dimostrativo da 1,3 MW** installato a Milano, presso il polo tecnologico della Bicocca.

Nel settembre 1988 ENEA, l'Azienda Energetica Municipale (AEM) di Milano ed Ansaldo Ricerche (oggi Ansaldo Fuel Cell) avevano avviato la progettazione e costruzione di un impianto PAFC, per produzione di energia elettrica e calore. Ad esclusione delle celle, fornite dalla società statunitense International Fuel Cells (oggi UTC Power), l'impianto era il risultato di



un'integrazione, in un progetto specificamente sviluppato da Ansaldo, di tecnologie europee: il sistema di steam reforming del metano di tecnologia Haldor Topsøe, il sistema di conversione dell'energia elettrica di tecnologia Ansaldo, il sistema di raffreddamento dell'aria è ABB ed infine il sistema per il controllo automatico dell'intero processo è della Elsag-Bailey.

L'impianto, entrato in esercizio nell'agosto 1995, ha operato fino a settembre 1998 (6.000 ore di funzionamento) generando circa 2.500 MWh. Nei tre anni di sperimentazione, circa 300 famiglie hanno usufruito dell'energia elettrica prodotta dall'impianto.

Le prestazioni osservate nel corso dell'esercizio sperimentale sono risultate in linea con gli obiettivi del progetto. Altro fatto importante, è stata dimostrata la potenzialità della tecnologia e, considerata la zona della città in cui era stato ubicato l'impianto, la possibilità di inserimento degli impianti a celle a combustibile in zone residenziali altamente popolate.

L'impianto ha garantito un buon comportamento, i dati forniti dalla sperimentazione avevano mostrato un'eccellente affidabilità della sezione elettrochimica, nonostante un incidente occorso proprio ad uno degli stack ed alcuni problemi incontrati in componenti tradizionali, come il sistema di compressione dell'aria.

L'esperienza acquisita è stata significativa e ha permesso di raggiungere un alto grado di familiarità con la tecnologia, dimostrando che esistono prospettive per tutte quelle aziende che, pur non detenendo uno specifico know-how sulla tecnologia elettrochimica delle celle, possiedono competenze di ingegneria di sistema e quote di mercato per gli impianti di generazione di energia elettrica.

Le infrastrutture (opere civili, allacciamenti e impianti elettrici) e componenti (reformer a gas naturale e reattori di shift associati, turbocompressore) dell'impianto saranno riutilizzati nel quadro del progetto FISR, coordinato dall'Università di Genova, finalizzato alla realizzazione nello stesso sito di un impianto da 500 kW con celle a carbonati fusi.

Caratteristiche dell'impianto da 1,3 MW di Milano

		Dati di progetto	Risultati
<i>Caratteristiche elettriche:</i>			
Potenza dc, kW		1340	900
Potenza ac, kW		1180	800
Voltaggio, kV		23	23
Frequenza, Hz		50	50
Distorsione armonica totale, %		< 5	< 5
Campo di potenza, %		30-100	30-70
Efficienza elettrica /LHV GN, %		40	39
Recupero del calore, Mcal/h	90 °C 45 °C	840 280	n.a *
Tempo di avviamento	da freddo, h da standby, min	18 10	12 10
Emissioni, mg/NMc	NOx SOx particolato CO	30 0,6 trasc. trasc.	30 n.a * trasc. trasc.

\* n.a. = non analizzato

Impianto SEABO da 200 kW	
Risultati della sperimentazione	
Ore di funzionamento	17.490
Disponibilità	63%
Periodo ininterrotto più lungo	2.856 ore
Energia elettrica prodotta	2.508.179 kWh
Energia termica	1.528.760 kWh
Combustibile CH <sub>4</sub> (pci)	6.376.655 kWh
Rendimento elettrico medio	39,3%
Rendimento cogenerativo medio	63,3%

In Italia presso la **SEABO** (Società Energia Ambiente Bologna, oggi HERA), nel periodo aprile 1993-maggio 1996, ha operato un **impianto PAFC della potenza di 200 kW** della UTC Power, fornito da Ansaldo Ricerche. L'impianto è stato il primo sistema di cogenerazione con celle a combustibile funzionante in Italia ed è stato realizzato in collaborazione con l'ENEA nell'ambito del Programma THERMIE della Commissione Europea.

L'impianto ha fatto registrare un rendimento elettrico medio, relativo a tutto il periodo di funzionamento, pari al 39,8%, che confermava le buone prestazioni del sistema sotto il profilo energetico. Il valore della disponibilità pari al 63% ha invece risentito fortemente dei lunghi periodi di fermo dovuti ai tempi lunghi di diagnosi e di approvvigionamento di alcuni componenti dell'impianto negli Stati Uniti.

L'esperienza SEABO aveva dimostrato le buone prestazioni in termini di efficienza energetica, ridotto impatto ambientale e durata delle PAFC e come le stesse siano particolarmente adatte come sistemi cogenerativi in ambito urbano, a conferma di quanto risultato da analoghe esperienze condotte sia in ambito europeo, che in Stati Uniti e Giappone.

In passato in Italia hanno operato altri due impianti, da 25 e 50 kW (stack di produzione Fuji), rispettivamente presso l'ENEA ed Eniricerche. Inoltre nel 2001, con finanziamenti del Ministero dell'Ambiente, un **impianto da 200 kW** (UTC Power PureCell™ fornito da Ansaldo) è stato installato presso il **Museo della Scienza e della Tecnica di Milano**.

Il Museo, situato nel centro di Milano, è ospitato in un edificio storico del XVI secolo; la tecnologia in



Impianto PureCell™ 200 presso il Museo della Scienza e della Tecnica di Milano

questo caso è stata scelta proprio per la sua bassa intrusività e la possibilità di ridurre drasticamente le emissioni prodotte dall'impianto di riscaldamento dell'edificio

### *Impianti PAFC installati in Europa*

Nazione	Sito	Tipo	Esercente impianto	Anno di avvio
<b>AUSTRIA</b>	Vienna	PC25A	Austria Ferngas GmbH	1993
<b>DANIMARCA</b>	Toftlund	PC25A	Naturgas Syd Sonderkyllands	1992
<b>FINLANDIA</b>	Vantaa O	PC25A	ImatranVoina Oy	1992
<b>FRANCIA</b>	Parigi	PC25C	GEPPAC, Paris	1999
<b>GERMANIA</b>	Dorsten	PC25A	Rurhgas AG/Stadtwerke Bochum	1992
	Darmstadt	PC25A	HEAG	1993
	Düren	PC25A	Stadtwerke Düren/Thyssengas	1993
	Amburgo	PC25A	HEW/HGW	1995
		PC25C		1997
	Gröbers/Halle	PC25C	Gasversorgung Sachsen-Anhalt GmbH, HGC	1997
	Halle/Saale	PC25C	Energieversorgung Halle GmbH	1997
	Saarbrücken	PC25C	Stadtwerke Saarbrücken	1997
	Francoforte sul Meno	PC25C	Stadtwerke Frankfurt/PreussenElektra	1998
	Kaltenkirchen	PC25C	Erdgas Energie Systeme	1998
	Norinberga	PC25C	BZ-BZ kW Nürnberg GbR/Studienges	1998
	Oranienburg	PC25C	Stadtwerke Oranienburg	1998
	Bertgeheide	PC25C	Hamburg Gas Consult	1998
	Kamenz	PC25C	Gastec N.V. , NVG, Hamburg Gas Consult	2000
	Rodenkirchen /Colonia	PC25C	GEW	2000
	Bocholt	PC25C	BEW GmbH /Thyssengas GmbH Agnes	2001
	Francoforte	PC25	RWE /Parco industriale Hoechst	2001
	Dinslaken	C	Stadtwerke Dinslaken / RWE Fuel Cells	2003
	Essen	PureCell™ 200	RWE	2004
<b>GRAN BRETAGNA</b>	Working	PC25C	Working Borough Council	2001
<b>ITALIA</b>	Milano	50 kW Fuji Electric	EniRicerche	1991
	Milano	1,3 MW (Stack IFC)	AEM	1992
	Bologna	PC25A	SEABO (o)	1993
	Milano	PC25	Museo della Scienza e della Tecnica	2001
<b>RUSSIA</b>		PureCell™ 200	Orgenergogaz	2005
<b>SPAGNA</b>	Madrid	50 kW Fuji Electric		2001
<b>SVIZZERA</b>	Ginevra	PC25A	Service Du Gaz	1993
	Basilea	PC25	ARB	2000
<b>SVEZIA</b>	Vattenfal	50 kW Fuji	Vattenfal ENERGISYSTEM	1993
	Varberg	PC25C	Vattenfal ENERGISYSTEM	1997

## CELLE A CARBONATI FUSI

Le celle a carbonati fusi (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell) impiegano un elettrolita costituito da una soluzione di carbonati alcalini, liquidi alla temperatura di funzionamento della cella (650 °C), contenuti in una matrice ceramica porosa ed elettrodi a base di nichel (nichel cromo all'anodo, ossido di nichel litiato al catodo).

Rispetto alle celle che operano a bassa temperatura presentano alcuni vantaggi:

- cinetiche di reazione più veloci che eliminano il bisogno di metalli preziosi come catalizzatori;
- maggiore flessibilità nell'uso di combustibili, con possibilità di alimentare la cella direttamente con gas naturale o distillati leggeri senza stadio di riforma esterna del combustibile;
- possibilità di cogenerare a temperature d'interesse industriale.

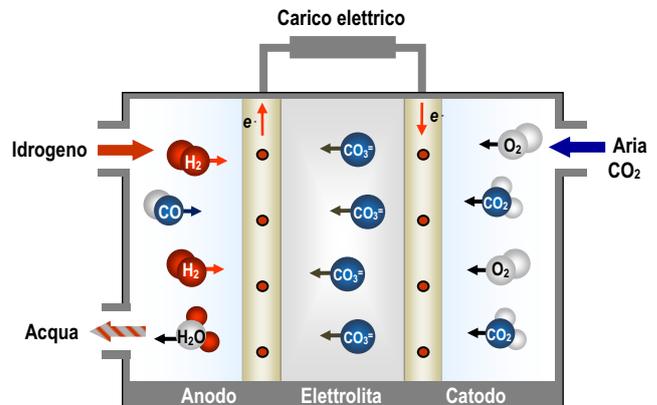
Con le MCFC è possibile, in prospettiva, realizzare impianti con efficienze più elevate (ottenute efficienze > 45%, possibilità di arrivare al 60-70% in cicli combinati con turbina) di quelle che si registrano con celle a bassa temperatura.

Le alte temperature di funzionamento e l'elevata corrosività dell'elettrolita pongono tuttavia problemi di stabilità strutturale ai componenti di cella e questi fanno sì che la tecnologia non possa considerarsi ancora matura. Tra i principali problemi vi sono la dissoluzione del catodo in ossido di litio ( $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ ), la sinterizzazione dell'anodo di nichel e la corrosione dei componenti metallici, come ad esempio i piatti bipolari.

Nonostante i notevoli progressi compiuti negli ultimi anni, resta ancora molto da fare per superare questi problemi e raggiungere gli obiettivi di durata e di costo richiesti per applicazioni nella generazione di energia elettrica (almeno 40.000 ore per lo stack, costi d'impianto inferiori a 1.500 \$/kW).

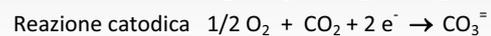
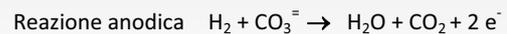
I segmenti di mercato più promettenti per i sistemi con celle a carbonati fusi sono, nel medio termine, la generazione di energia elettrica e la cogenerazione ad alta temperatura, per taglie comprese tra 250 kW e qualche decina di MW. Tali applicazioni sono infatti quelle che consentono di utilizzare al meglio le caratteristiche positive di questi sistemi, con significativi vantaggi energetici ed ambientali rispetto alle altre tecnologie

concorrenti: le turbine a gas, che si prevede estenderanno il loro campo di impiego anche al di sotto dei 5 MW, ed i motori a combustione interna. Impianti di taglia superiore ai 30-50 MW sono prevedibili solo nel lungo termine, se le loro prestazioni saranno comparabili con quelle, sempre più interessanti, dei cicli combinati.

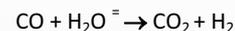


### REAZIONI ELETTROCHIMICHE

Le reazioni che avvengono in una cella a carbonati fusi sono:



Nel caso in cui il gas ricco di idrogeno sia ottenuto da processi di reforming di idrocarburi o gassificazione del carbone, le reazioni all'anodo coinvolgono sia idrogeno che il monossido di carbonio presente. In questo caso il CO reagisce con l'acqua che si forma, producendo ulteriore idrogeno:



L'anidride carbonica in uscita all'anodo viene riciclata al catodo. A differenza di quanto avviene nelle celle ad elettrolita acido (PEFC e PAFC) l'acqua viene prodotta all'anodo.

Le MCFC presentano scarsa tolleranza ai composti dello zolfo ( $\text{H}_2\text{S}$ , COS). Tenore di  $\text{H}_2\text{S}$  < 0,5 ppm.

### MATERIALI DEI COMPONENTI DI CELLA

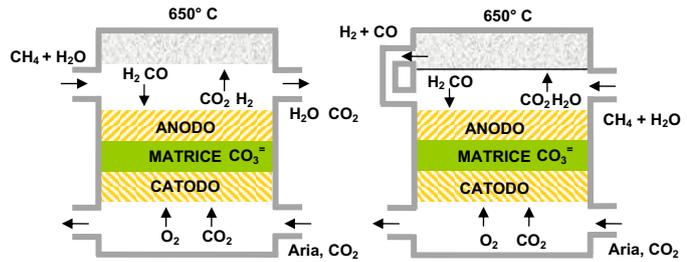
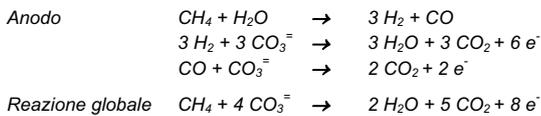
<b>Anodo</b>	Nichel-Cromo o Ni-Alluminio; area superficiale 0,1-1 m <sup>2</sup> /g; spessore 0,2-0,5 mm
<b>Catodo</b>	NiO litiato-MgO, area superficiale 0,5 m <sup>2</sup> /g; spessore 0,5-1 mm
<b>Supporto elettrolita</b>	Matrice di $\gamma\text{-LiAlO}_2$ o $\alpha\text{-LiAlO}_2$ ; area superficiale 0,1-12 m <sup>2</sup> /g; spessore 0,5-1 mm
<b>Elettrolita</b>	$\text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$ 62-38% o $\text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{Na}_2\text{CO}_3$ 60-40%; spessore 0,5-1 mm
<b>Piatto bipolare</b>	Leghe metalliche (Incoloy 825, acciaio 310S o 316) con rivestimenti protettivi

### Sistema di trattamento del combustibile

La realizzazione di MCFC con reforming interno del combustibile consente di ottenere sistemi più efficienti, semplici ed affidabili e contribuisce a ridurre i costi d'impianto. Il miglioramento che si registra nelle IRMCFC è da attribuire principalmente al fatto che l'energia termica necessaria per sostenere la reazione di reforming (reazione endotermica) non deve essere trasferita dalla cella ad un reattore esterno, ma viene scambiata e utilizzata nella cella stessa (dove avviene la reazione di ossidazione dell'idrogeno, esotermica), assicurando in tal modo un controllo termico del sistema ed il sostegno entalpico per la reazione di reforming.

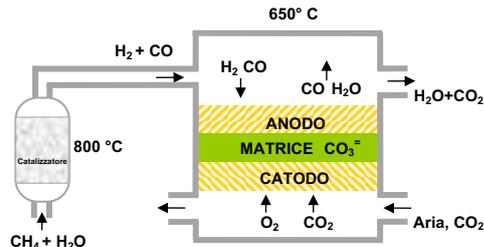
In una IRMCFC il catalizzatore (in genere nichel supportato su MgO o su  $\text{LiAlO}_2$ ) per la reazione di reforming è nella camera anodica o in una zona separata adiacente all'anodo; le due diverse soluzioni vengono indicate rispettivamente come: internal reforming diretto (DIR) ed internal reforming indiretto (IIR). Esistono inoltre soluzioni di tipo misto.

In una IRMCFC il combustibile utilizzato è normalmente gas naturale. Nel caso del metano all'anodo avvengono le reazioni:



Reforming interno diretto (DIR)

Reforming interno indiretto (IIR)



MCFC con reforming esterno

## PROGRAMMI DI RICERCA, SVILUPPO E DIMOSTRAZIONE

Programmi di ricerca e sviluppo sono attualmente in corso in Stati Uniti, Europa, Giappone e Corea del Sud. Le attività sono orientate allo sviluppo di stack (fino ad alcune centinaia di kW) ed alla dimostrazione di impianti di potenza inferiore ai 3 MW, le attività di ricerca indirizzate al miglioramento della tecnologia di cella occupano comunque uno spazio ancora rilevante tra le azioni in atto.

Hanno contribuito allo sviluppo della tecnologia molte società che hanno poi sospeso le attività in questo settore o le hanno orientate su altre tipologie di cella, come UTC Power, M-C Power Corp. e General Electric negli Stati Uniti, Hitachi, Mitsubishi Electric Company e Toshiba in Giappone.

### STATI UNITI

Negli Stati Uniti lo sviluppo di celle a combustibile a carbonati fusi è oggi in corso presso la FuelCell Energy e la GenCell.

#### FuelCell Energy

La FuelCell Energy (FCE, Danbury, CT, USA) opera nel settore delle celle a carbonati fusi dalla metà degli anni '70 ed è arrivata a realizzare e dimostrare prototipi di diversa potenza.

FCE ha sviluppato una tecnologia, nota commercialmente come DFC<sup>®</sup>, Direct Fuel Cell, in cui la riforma del combustibile (gas naturale, biogas, gas da carbone) avviene all'interno della cella. Il primo impianto di potenza 250 kW ad utilizzare questa configurazione era rimasto in esercizio, nella sede FCE di Danbury, dal febbraio 1999 al giugno 2000. L'unità, connessa agli edifici della società e alla rete elettrica, aveva totalizzato 11.800 ore di funzionamento, nel corso delle quali aveva generato 1.906 MWh, dimostrando un'efficienza elettrica del 45% ed una disponibilità del 93%.



Modulo MW (4 stack)

Il programma FCE è rivolto allo sviluppo di prodotti per il mercato della generazione di potenza distribuita per applicazioni al di sotto dei 40 MW. Dal 2006 realizza tre classi di prodotti il DFC300 MA, DFC1500 MA, e DFC3000 che forniscono rispettivamente 300 kW, 1,2 MW e 2,4 MW di potenza e presentano efficienze elettriche del 45-47%. Nel caso di applicazioni in cogenerazione si ottengono efficienze totali che possono superare il 70%.

All'interno del Progetto Vision 21 finanziato dal Department of Energy attraverso National Energy Technology Laboratory (NETL), FCE è impegnata nello sviluppo di un sistema di tipo ibrido DFC/turbina (DFC/T<sup>®</sup>) studiato per potenze fino a 40 MW.



Impianto Direct Fuel Cell da 250 kW

Ad oggi (novembre 2007) FCE ha consegnato oltre 65 impianti, che hanno operato in 50 siti diversi distribuiti tra Stati Uniti, Asia ed Europa, generando in totale oltre 205 milioni di kWh.

I prodotti FCE, sono distribuiti in Europa dalla CFC Solutions (in passato nota come MTU CFC Solutions), dalla Marubeni Corp. in Giappone, dalla POSCO Power in Corea del Sud e negli Stati Uniti da varie società tra cui Caterpillar, Chevron Energy Solutions, Enbridge, Logan Energy, PPL Energy Plus, Alliance Power e dal Gruppo Linde.

Ricordiamo che stack FCE sono utilizzati negli impianti "Hot Module" della CFC Solutions.

Impianti dimostrativi di diversa taglia alimentati con vari combustibili (gas naturale, propano, gas da carbone e

biogas) stanno operando presso hotel, università, ospedali, industrie e persino presso una prigione.



Unità DFC300, San Diego  
Sheraton West Tower

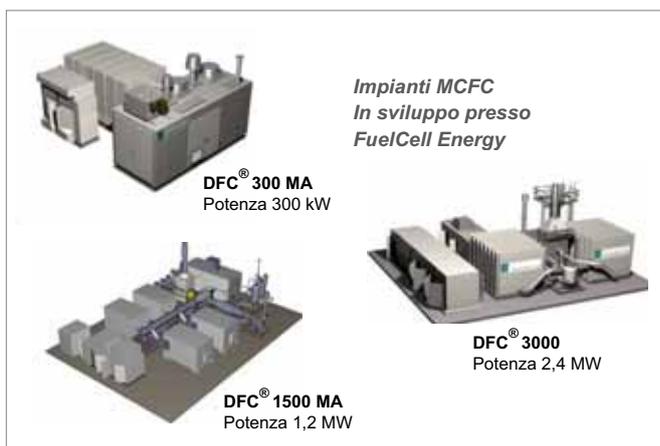
Solo per fare alcuni esempi un'unità DFC 300 alimentata a gas naturale è stata installata nel 2004 a New York sul tetto dell'Hotel New York Sheraton and Towers. Sempre nel 2004 a S. Diego presso un hotel della stessa catena sono state installate 4 unità DFC300 (1 MW) che coprono il fabbisogno elettrico delle oltre 1.000 stanze dell'albergo; il calore coprodotto è utilizzato per il riscaldamento della piscina. In seguito la potenza installata è stata aumentata a 1,5

MW con l'integrazione di due unità DFC 300MA.



Impianto da 1 MW (DFC 1500, King County, WA)

Circa il 20% delle unità poste in esercizio impiegano biogas come combustibile. Il prototipo DFC1500 da 1 MW installato a Renton (King County, WA) presso un impianto di trattamento acque di scarico, era un sistema del tipo bi-fuel, che poteva essere alimentato con biogas o, in caso di indisponibilità di quest'ultimo, con gas naturale.



Impianti MCFC  
In sviluppo presso  
FuelCell Energy

DFC<sup>®</sup> 300 MA  
Potenza 300 kW

DFC<sup>®</sup> 1500 MA  
Potenza 1,2 MW

DFC<sup>®</sup> 3000  
Potenza 2,4 MW

### Alcune applicazioni dei sistemi FCE

#### Impianti di depurazione

- Sierra Nevada Brewing Co., California (2005 - 4 unità DFC300, gas naturale / biogas)
- Impianto di depurazione LA County Sanitation Palmdale (2005 - DFC300, biogas)
- Kirin Brewery, Giappone (2003 - gas naturale / propano, DFC300 - 2003)
- Impianti di depurazione diTulare, California (2007- 3 unità DFC300, biogas)
- Santa Barbara, California (2004 - 2 unità DFC300, biogas)
- Impianto depurazione Tacheon, Seul, Korea (2006 -DFC300, biogas)

#### Hotel

- Sheraton New York Hotel and Towers, New York (2004 - DFC300)
- Sheraton San Diego Hotel, California (2004/2005 - 4 unità DFC300 / 2 unità DFC300 MA)
- Westin San Francisco Airport, California (2005 - 2 unità DFC300)

#### Impianti industriali

- TST inc., Fontana, California (2006 - 2 unità DFC300)
- Gills Onions, California (2007- 2 unità DFC300)
- Pepperidge Farm Bakery, Bloomfield, Connecticut (2005 - DFC300, prossima installazione DFC3000)
- Ford Motors, Oakville, Ontario (2007 - DFC300 MA)

#### Università ed ospedali

- State University of New York, College of Environmental Science and Forestry (2006 - DFC300)
- Yale University, Connecticut (2003 - DFC300)
- California State University, Northridge ( 2007 - DFC1500)
- Università di Pohang, Corea (2005 - DFC300)
- Chosun University Hospital a Kwangju, Corea (2005 - DFC300)

#### Istituzioni governative, centri di telecomunicazioni

- Ufficio postale San Francisco, California (2005 - DFC300)
- Prigione Santa Rita, California (2006 - DFC1500)
- Centro telecomunicazioni NTT, Sendai, Giappone ( 2005 - DFC300)

#### Impianti usati come supporto alla rete

- Sede LADWP, Los Angeles, California (2003 - DFC300)
- Salt River Project, MESA, Arizona (2003 - DFC300)
- KOSEP (Korea-South East Power) Bundang, Corea (2006 - DFC300)



Santa Barbara, CA



Tacheon,Seul



Northridge, CA



S. Rita, CA

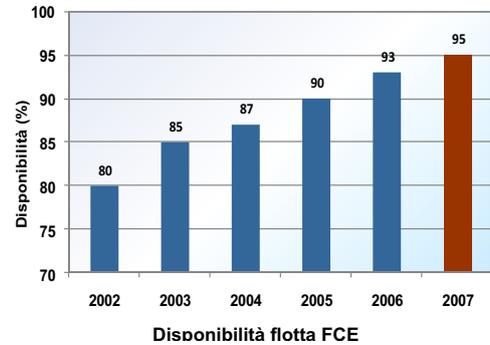
Entrato in esercizio nel 2004 l'impianto ha operato per un periodo di due anni accumulando 5.700 ore (3.600 ore con gas naturale, 2.100 ore con biogas) di funzionamento durante le quali ha generato 4,3 milioni di kWh di elettricità (2,7 MWh con gas naturale, 1,6 MWh con biogas). L'impianto ha fatto registrare una disponibilità del 96% con gas naturale e dell'83% con biogas.



Unità DFC 300, Sierra Nevada Brewery (Chico, CA)

Due delle quattro unità collocate presso la Sierra Nevada Brewery (Chico, California) sono invece alimentate con una miscela costituita da gas naturale e biogas. L'impianto di potenza 1 MW fornisce elettricità e calore per i processi di produzione dell'azienda.

L'esperienza acquisita attraverso le diverse sperimentazioni sul campo ha permesso alla FCE di migliorare notevolmente l'affidabilità dei suoi prodotti; la disponibilità della sua flotta nel 2007 dovrebbe attestarsi intorno al 95%.



La società, nel quadro del progetto Vision 21, è impegnata nello sviluppo di sistemi ibridi cella/turbina. In questi sistemi una serie di scambiatori trasferiscono il calore prodotto dalle celle alla turbina a gas, che lo converte in energia meccanica, e quindi in ulteriore energia elettrica, consentendo di ottenere efficienze superiori al 70%.

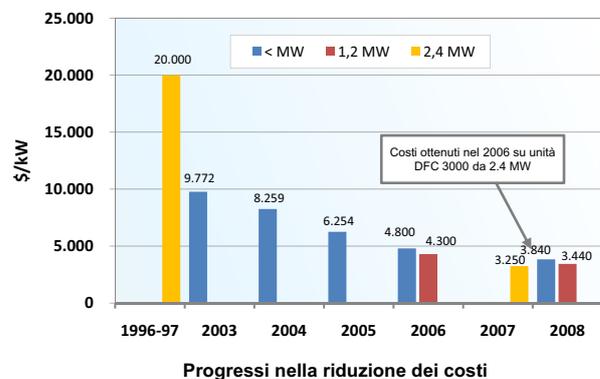


Impianto DFC/T®, Billings Clinic (MT, USA)

Nel 2005 è stata completata la costruzione di un'unità ottenuta integrando un modulo DFC da 250 kW con una microturbina Capstone da 60 kW. L'unità "proof-of-concept", dopo una serie di prove di qualifica eseguite a Danbury, è stata trasferita presso un centro medico a Billings nel Montana dove ha iniziato ad operare nell'aprile 2006.

L'impianto DFC/T® durante le 8.000 ore di esercizio ha prodotto 1.145 MWh e fatto registrare un'efficienza del 56%; le emissioni sono risultate in linea con gli standard CARB 07. Considerato l'esito positivo della sperimentazione, FCE ha avviato la progettazione di unità di potenza superiore (1-3 MW) con rendimenti attesi del 60-70%.

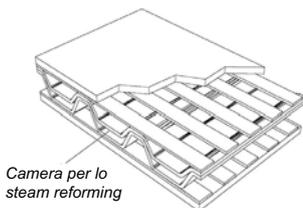
Nell'arco di un decennio FCE ha ridotto notevolmente i costi di fabbricazione dei suoi prodotti, si è passati dagli iniziali 20.000 \$/kW dell'impianto da 1,8 MW entrato in esercizio a Santa Clara nell'aprile 1996, agli attuali 4.300 \$/kW delle unità da 1,2 MW e 4.800 \$/kW delle unità di potenza inferiore al MW. La società si aspetta che, con volumi di produzione dell'ordine di 50 MW/anno, i costi si ridurranno di un ulteriore 25-30 %.



Nel corso del 2006, il costo di fabbricazione dell'unità DFC3000, modulo base degli impianti multi-MW in sviluppo, grazie a miglioramenti apportati alla tecnologia di stack e all'ingegneria del sistema è stato ridotto del 39% arrivando a 3.250 \$/kW. I vertici della società hanno poi dichiarato che grazie agli ordini già ricevuti il costo potrebbe scendere rapidamente a valori inferiori ai 3.000 \$/kW, avvicinandosi quindi ai target di costo fissati per rendere le celle a combustibile competitive con le tecnologie di produzione di energia elettrica di tipo tradizionale.

## GenCell Corp.

Le attività della GenCell (Southbury, Connecticut), avviate nel 1997, sono indirizzate allo sviluppo di sistemi con potenze nell'intervallo 40-125 kW per il mercato della generazione di potenza distribuita.



La società ha consegnato nel 2005 un sistema da 40 kW al Global Fuel Cell Development Centre dell'Università del Connecticut, questo al momento risulta l'unico prodotto entrato in esercizio.

Negli stack GenCell la riforma del combustibile avviene in camere ricavate nelle singole celle (reforming interno indiretto).



Unità GenCell da 40 kW

## GIAPPONE

In Giappone, le attività sulle MCFC sono state avviate nel 1983, come parte del Progetto Moonlight promosso dall'Agency of Industry and Science Technology (ora National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) del METI e dal NEDO, sono quindi proseguite nel quadro del New Sunshine Programme (2000-2004).

Il METI al momento sembra deciso a non promuovere programmi nazionali nel settore delle MCFC, in quanto un solo costruttore giapponese, l'Ishikawajima-Harima Heavy Industries (IHI), lavora allo sviluppo di sistemi. In Giappone è in corso la sperimentazione di diversi impianti MCFC, ma si tratta di prodotti della statunitense FuelCell Energy, distribuiti in Asia dalla Marubeni Corp.

Lo sviluppo di celle a carbonati fusi in passato ha visto il coinvolgimento di industrie di primaria importanza come **Hitachi** e **Mitsubishi Electric Company**. Ricordiamo che sotto il coordinamento del NEDO nel 1993 era stato avviato un progetto che aveva portato a realizzare un impianto da 1 MW.

L'impianto, costituito da quattro moduli MCFC da 250 kW, forniti da due costruttori diversi (IHI e Hitachi), era stato progettato e costruito dalla MCFC Research Association (Technology Research Association for MCFC Power Generation System). L'impianto, rimasto in esercizio dal luglio 1999 al marzo 2000 presso la stazione di potenza di Kawagoe della Chubu Electric Co., aveva funzionato per 4.916 ore, generando 2.103 MWh, con un'efficienza elettrica del 45% (HHV).

Gli stack inseriti nell'impianto presentavano una diversa configurazione. La tecnologia IHI prevedeva celle di tipo rettangolare e manifold interno per la distribuzione dei gas, con flussi dei gas anodico e catodico in equicorrente parallela. L'Hitachi utilizzava invece una configurazione cosiddetta "Multiple Large Capacity" che consisteva in una cella quadrata composta da quattro celle più piccole con manifolding interno e flusso incrociato dei gas di alimentazione.

### Ishikawajima-Harima Heavy Industries

Ishikawajima-Harima Heavy Industries (Tokyo), con finanziamenti NEDO, è arrivata a sviluppare sistemi pressurizzati di potenza 300 kW. Due impianti di questo tipo hanno funzionato durante l'Expo di Aichi del 2005 nel Padiglione giapponese "NEDO New Energy Plant", dove operavano anche celle ad acido fosforico e ad ossidi solidi, sistemi fotovoltaici e batterie sodio-zolfo.

L'impianto, esercito dalla Chubu Electric, era alimentato con gas di città e biogas ottenuto da gassificazione di rifiuti. La sperimentazione del secondo sistema, un ibrido MCFC/microturbina a gas, era invece affidata alla Toyota Motors. L'impianto operava con metano ottenuto da gassificazione di biomasse o di plastiche usate.



Padiglione NEDO New Energy Plant (Aichi)

Al termine dell'Expo, gli impianti sono stati trasferiti al Central Japan Airport City (Tokoname City, Aichi), dove attualmente stanno funzionando.



Unità MCFC da 300 kW - IHI / Chubu Electric Co.



Unità MCFC/MTG da 300 kW - IHI / Toyota Motors Co.

Risultati sperimentazione Expo di AICHI

	MCFC	MCFC/MTG
Potenza max	270 kW	303 kW
Energia prodotta	426 MWh	546 MWh
Ore di funzionamento totali	3.958 h	4.439 h
Efficienza	41,5 %	51 %

### Marubeni Corporation

La Marubeni (Tokyo, J) ha accordi di collaborazione con la FuelCell Energy per la distribuzione degli impianti DFC in Giappone ed in altre regioni asiatiche. La società ha installato la prima unità a Toride alla Kirin Brewery nel 2003, dove l'impianto era alimentato con metano ottenuto dalla digestione dei scarti dei processi di produzione dell'azienda. Da allora in Giappone sono state installate 14 unità DFC 300 in 10 diversi siti.

In Giappone, il **CRIEPI** (Central Research Institute of Electric Power Industry) conduce fin dal 1980 attività di ricerca indirizzate al miglioramento delle prestazioni della tecnologia e alla valutazione di sistemi MCFC.

## COREA DEL SUD

Nel 2004 il governo coreano ha identificato le celle a combustibile come uno dei dieci motori per la crescita dell'economia del Paese. Per quanto riguarda le celle a carbonati fusi, l'obiettivo è quello di installare 300 impianti di potenza 250 kW entro il 2012.

Un consorzio di aziende sta sviluppando sistemi MCFC di classe 250 kW nel quadro di un programma di ricerca e sviluppo promosso dal MOCIE (Ministero del Commercio, Industria ed Energia). POSCO Power e KIST sono impegnate nello sviluppo dello stack, mentre KEPRI, KEPCO, Samsung e Hyosung stanno mettendo a punto i componenti del balance-of-plant.

Obiettivi del Programma MOCIE

2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013-2020
Sviluppo prototipi MCFC-CHP Classe-250 kW				Sviluppo impianti Multi-MW (25 MW, 50 MW)				Sviluppo MCFC GW	
Alleanze strategiche	Dimostrazione prodotti esteri			Dimostrazione prodotti nazionali		Distribuzione prodotti nazionali		Produzione di massa	
	10 impianti (250 kW)			90 impianti (250 kW)		300 impianti (250 kW)			

Il **KEPRI** (Korean Electric Power Research Institute) ed il **KIST** (Korea Institute of Science and Technology) hanno realizzato nel 2005 un'unità da 100 kW, con reforming esterno del gas naturale, che è attualmente in esercizio.

La **POSCO Power**, attraverso la Marubeni, ha acquistato unità DFC300A, che stanno operando presso l'Università di Chosun, a Tacheon presso un impianto di depurazione, in un suo istituto di ricerca (RIST).



Stack KEPCO da 100 kW (2 stack da 50 kW, 90 celle ciascuno)

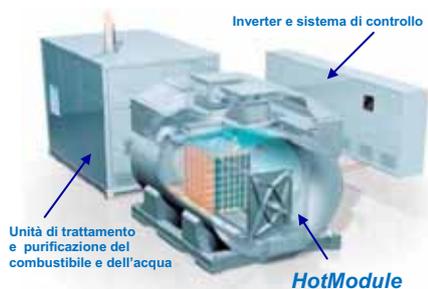
POSCO e **Korea South-East Power Company** (KOSEP) hanno annunciato l'intenzione di avviare lo sviluppo di impianti MCFC commerciali, realizzati utilizzando stack della FuelCell Energy. La KOSEP recentemente ha acquistato un'unità DFC300 MA che opererà presso un suo impianto a Bundang.

## EUROPA

Programmi sulle MCFC sono in corso in Germania, dove opera la CFC Solutions ed in Italia. In passato attività di sviluppo erano condotte anche in Olanda da parte delle ECN (Energy Research Center of the Netherlands). Quest'ultima, a causa di una riduzione di budget, nell'ottobre 2005, ha ceduto la sua tecnologia alla FuelCell Energy, per concentrarsi su altre tipologie di cella (PEFC e SOFC).

### CFC Solutions

La CFC Solutions (Ottobrunn, D), nota come MTU CFC Solutions fino agli inizi del 2007, sviluppa sistemi da 250 kW per cogenerazione, denominati HotModule, che utilizzano stack prodotti dalla FuelCell Energy. Da segnalare che CFC Solutions collabora con la FCE fin dal 1998 e ha contribuito allo sviluppo della tecnologia DFC.



#### Caratteristiche HotModule HM300

Potenza elettrica: 280 kW max  
 Potenza netta: 245 kW  
 Potenza termica: circa 170kW (a 55°C)  
 Alimentazione: Gas naturale di rete  
 Efficienza totale: circa 90%  
 Efficienza elettrica stack: 55%  
 Efficienza elettrica impianto: 47% max  
 Emissioni:  
 SO<sub>2</sub> < 0,01 ppm - non rilevabile  
 NO<sub>x</sub> < 2 ppm - non rilevabile  
 CO < 9 ppm  
 Dimensioni: 8,0 m x 2,5 m x 3,2 m



Nell'unità HotModule tutti i componenti ausiliari che operano temperatura e pressione simili sono integrati in un vessel isolato termicamente. In pratica il modulo contiene lo stack con riforma interna del combustibile, il bruciatore catalitico dell'esausto anodico ed il ricircolatore catodico.

L'HotModule è in grado di funzionare con gas naturale, biogas da digestore anaerobico di fanghi derivanti da reflui urbani, gas da discarica e combustibili liquidi come il metanolo.

### Sistemi HotModule H300 eserciti in Europa

Località	Sito	Data di installazione	Fine esercizio	Ore di funzionamento	kWh prodotti
SW Bielefeld	Università	Set 1999	Feb 2002	16.000	1.400.000
Bad Neustadt	Ospedale	Apr 2001	Giu 2004	21.585	2.519.700
Essen	RWE FC Pavillion	Apr 2002	Set 2005	26.523	3.625.600
Monaco	Deutsche Telecom	Ott 2002	Gen 2006	25.477	3.658.400
Cartagena	IZAR	Nov 2002	Nov 2005	24.211	2.123.000
Karlsruhe	Michelin	Nov 2002	Nov 2005	23.849	4.045.000
Magdeburgo	Centro medico universitario	Dic 2002	Mag 2006	30.018	3.065.000
Grünstadt	Ospedale	Lug 2003	Lug 2006	26.415	3.554.300
Bad Berka	Ospedale	Ott 2003		28.500	5.220.500
Berlin	Bewag	Set 2004	Mar 2007	21.140	3.736.500
Krefeld	Area residenziale	Dic 2004	Ago 2007	20.500	3.000.000
Ahlen	RWE- Imp. depurazione acque	Giu 2005		7.700	1.070.000
St. Ingbert	RWE / Festo	Giu 2005		18.900	2.860.000
Amburgo	Vattenfall / Porto	Feb 2006		7.875	1.353.800
Leonberg	RWE - Imp. di fermentazione	Ago 2006		5.640	731.700
Parigi	Dalkia	Mar 2007		2.600	355.000
Monaco	Voigt & Haffner	Lug 2007		130	12.000

Fonte: CFC Solutions, Settembre 2007



Sistema HM 300 (Magdeburgo)



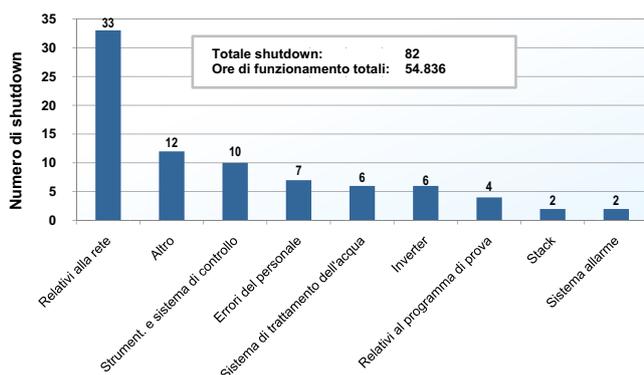
Sistema HM 300 alimentato a biogas (Leonberg)

Potenza elettrica: 250 kW  
 Efficienza elettrica: 47%  
 Efficienza termica: 23%  
 Efficienza totale: 70 %

La funzionalità ed affidabilità dell'impianto è stata verificata attraverso diverse prove sul campo. Dal 1999, in Europa sono state sperimentate in totale 15 unità. Un impianto è stato installato in Spagna presso la IZAR, gli altri hanno operato o sono in esercizio in Germania.

Le migliori prestazioni in termini di durata sono state ottenute dal modulo installato nel dicembre 2002 presso la clinica universitaria Otto-von-Guericke a Magdeburgo, il quale è rimasto in esercizio per più di 30.000 ore con lo stesso stack. L'impianto ha prodotto oltre 3 milioni di kWh, con una disponibilità del 98%.

Buone prestazioni sono state raggiunte dall'unità installata a Bad Berka, anche in questo caso presso una clinica. L'impianto, configurato per trigenerazione (energia elettrica, calore e acqua refrigerata per condizionamento), ha operato per circa 24.500 ore, producendo oltre 4,5 milioni di kWh di elettricità. Considerati i risultati positivi della dimostrazione, CFC ha deciso di proseguire la sperimentazione, l'impianto sarà quindi riavviato con un nuovo stack.



Impianto	Ore esercizio gen 2005- feb 2006	Shutdown
Magdeburgo	8.677	15
Berlino	8.703	5
Grünstadt	8.579	10
Bad Berka	7.438	9
Krefeld	8.741	8
Ahlen	6.335	29
St. Ingbert	6.115	5
Amburgo	248	1

Al Fuel Cell Seminar 2006, sono stati presentati alcuni risultati di esperienze condotte sulla flotta di HotModule. Nel periodo gennaio 2005 - febbraio 2006, la flotta aveva accumulato oltre 54.800 ore di funzionamento e fatto registrare 82 shutdown, con un periodo minimo fra due shutdown di circa 30 giorni. Solo in due casi, l'arresto dell'impianto era stato provocato da malfunzionamenti dello stack.

Come altri costruttori, la CFC Solutions ha in corso la dimostrazione di impianti alimentati con combustibili diversi dal gas naturale. A Leonberg, nei pressi di Stoccarda, nel 2006 è entrata in funzione un'unità alimentata con gas ottenuto da un impianto di fermentazione di rifiuti organici e dal 2005 un'unità alimentata a biogas sta operando ad Ahlen presso un impianto di depurazione di acque reflue.

La CFC Solutions per il futuro prevede di realizzare moduli di potenza 1 MW.

## LE ATTIVITÀ DI RICERCA, SVILUPPO E DIMOSTRAZIONE IN ITALIA

In Italia, lo sviluppo delle celle a carbonati fusi è iniziato anni '80 e attualmente vede coinvolte organizzazioni industriali e di ricerca come Ansaldo Fuel Cells, CESI Ricerca, ENEA, CNR-ITAE e diversi istituti universitari.

Le attività in questo settore hanno avuto un forte impulso grazie ai finanziamenti messi a disposizione nel 2005 dal Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca e dal Ministero dell'Ambiente attraverso il Fondo Integrativo Speciale per la Ricerca (FISR).

### Ansaldo Fuel Cells

Ansaldo Fuel Cells (Gruppo Finmeccanica, Genova), costituita nel 2001 per scissione da Ansaldo Ricerche, è oggi una delle poche aziende a livello internazionale attiva nello sviluppo di celle a carbonati fusi. Nel 2004, sono entrate a far parte di Ansaldo Fuel Cells S.p.A (AFCo) la società privata EnerTad e la Fincantieri.

Il programma AFCo è articolato in varie fasi. Lo sviluppo della tecnologia è passato dalla scala di laboratorio, attraverso numerosi stack tecnologici di diversa potenza, fino alla realizzazione, nel 1999, di un impianto "proof of concept" da 100 kW, alimentato a metano, che ha segnato il passaggio dalla fase di sviluppo strettamente tecnologico alla attuale fase dimostrativa.

L'impianto da 100 kW, installato presso Enel Ricerca (ora CESI Ricerca) a Milano, era stato realizzato in configurazione "Compact Unit" (CU), integrando in un serbatoio pressurizzato (vessel), oltre allo stack, il reformer a calore sensibile, il bruciatore catalitico alimentato dai residui di reazione anodici e catodici, i ricirculatori anodico e catodico. Rimanevano esterni al modulo, il sistema di pretrattamento del combustibile, il turbocompressore per l'alimentazione dell'aria di processo ed il sistema di utilizzo del calore. Nella Compact Unit il modulo elettrochimico era costituito da due stack (75 celle ciascuno, area circa 0,75 m<sup>2</sup>), dotati di un'unica struttura di



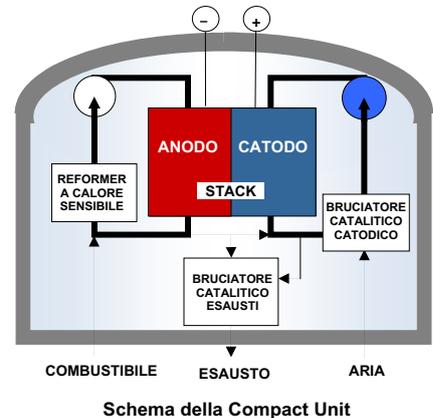
Impianto "proof of concept" da 100 kW - CESI Ricerca (Milano)

supporto e di un'unica alimentazione.

L'esperienza maturata in questa fase aveva consentito di definire stack di nuova generazione caratterizzati da una diversa geometria di cella (passata da quadrata a rettangolare) e lo sviluppo di sistemi "Serie 2TW", studiati per fornire potenze fino a

### CELLE A COMBUSTIBILE A CARBONATI FUSI Progetti FISR 2005-2008

- **Sviluppo delle tecnologie delle celle a combustibile e dei sistemi per le loro applicazioni**  
Coordinatore: ENEA  
Partner: Ansaldo Fuel Cells
- **Sviluppo di un sistema MCFC pressurizzato e sperimentazione di un impianto dimostrativo da 500 kW alimentato con gas di sintesi a composizione variabile**  
Coordinatore: Università di Genova  
Partner: Ansaldo Fuel Cells, Politecnico di Milano, ENEA, Zincar
- **Nuovi sistemi economici e competitivi di celle a combustibile a carbonati fusi per generazione diffusa**  
Coordinatore: Università di Perugia  
Partner: Ansaldo Fuel Cells, Centro Sviluppo Materiali, ISIRIM



Schema della Compact Unit

### Programma MCFC Ansaldo Fuel Cells

#### FASE 1

- Sviluppo impianto "proof of concept" da 100 kW
- Progettazione sistema "Serie 2TW"

1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012

#### FASE 2

- Realizzazione e dimostrazione di unità "Serie 1ST" e "Serie 2TW"
- Nuovo stabilimento per fabbricazione componenti, messa a punto processi produttivi
- Proseguimento sviluppo tecnologico (stack e componenti BoP)

#### FASE 3

- Sviluppo sistemi multi-MW
- Unità per applicazioni commerciali, militari e propulsione navali

#### FASE 4

- Avvio della commercializzazione





Stack dell'impianto proof of concept da 100 kW (Ansaldo Fuel Cells)

Stack FA150 R per la Serie 2TW (Ansaldo Fuel Cells)

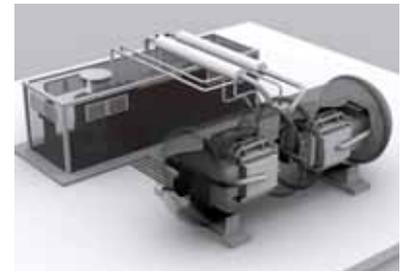
**Caratteristiche stack FA150 R**

Potenza	125 kW
Tensione nominale	104 V CC
Corrente nominale	1200 A
Numero di celle	150
Area singola cella	0,81 m <sup>2</sup>
Manifold	esterno
Distribuzione dei gas	a flusso incrociato

500 kW e progettati per essere impiegati come unità di base ("building block") per la realizzazione di impianti di taglia multi-MW.

Nell'impianto "proof of concept", con il "reformer a calore sensibile" era stata confermata la validità del concetto di reformer esterno, termicamente integrato, ma fisicamente separato dallo stack. Soluzione da cui derivano una serie di vantaggi quali flessibilità nell'impiego del combustibile, ciclo di vita dello stack indipendente da quello del reformer, progettazione semplificata, sistema economicamente efficiente. Per le unità "Serie 2TW" è stato quindi sviluppato un nuovo concetto di reforming, detto "Modular Integrated Reformer" (MIR), che abbina i vantaggi tipici del reformer interno (sfruttamento del calore prodotto dallo stack) alla flessibilità del reformer esterno (possibile rimozione in caso di condizionamento o manutenzione).

Grazie ad una struttura simile a quella di uno scambiatore di calore, nel MIR, le sezioni del reformer, del mixer e del bruciatore catalitico sono incorporate in un unico componente ottimizzando così il recupero sia del calore sensibile proveniente dallo stack, sia del calore generato dalla combustione degli esausti di stack. In questo modo la temperatura di reforming, e di conseguenza la conversione risulta più alta e si ottiene una migliore efficienza totale.



Vista artistica dell'impianto "Serie 2TW"

Nella "SERIE 2TW" sono presenti due moduli elettrochimici, ciascuno dei quali composto da due stack da 125 kW integrati con opportuni sistemi ausiliari ed accoppiati tra loro secondo una configurazione originale nota come TWINSTACK®.

Caratteristiche salienti della configurazione TWINSTACK® sono:

- flessibilità nell'impiego del combustibile, grazie al MIR che permette di sfruttare il calore rilasciato dallo stack e di essere adattato al combustibile primario scelto;
- agevole manutenzione dei componenti, dal momento che questi sono termicamente integrati, ma fisicamente separati;
- standardizzazione dei componenti dello stack e del loro assemblaggio, che consente di beneficiare di economie di scala anche in caso di bassi volumi di produzione.

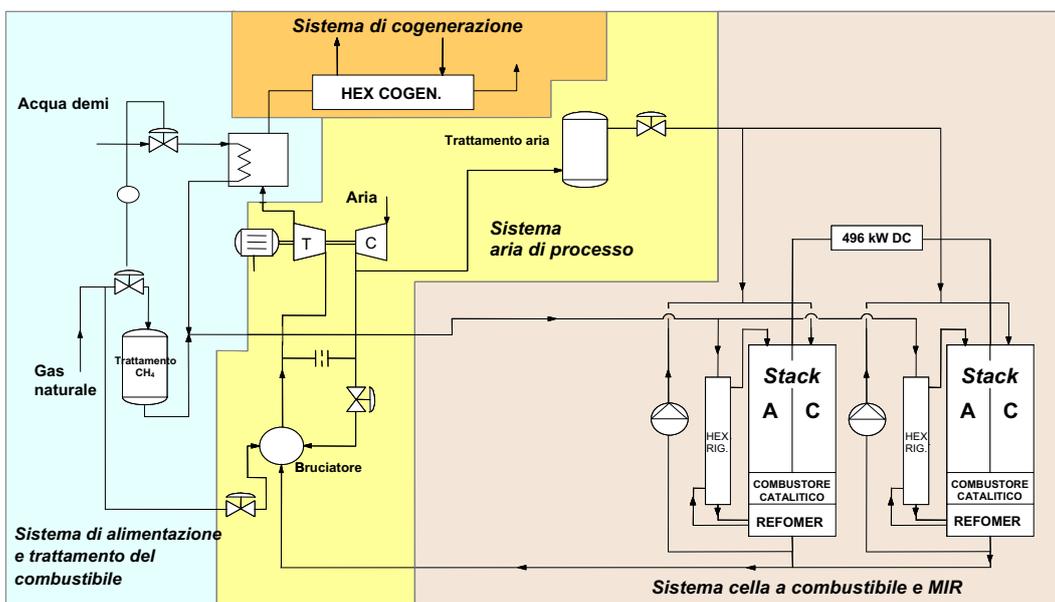


Diagramma di flusso dell'unità "Serie 2TW"



Stazione prova presso la Iberdrola a S. Agustin de Guadalix

Ansaldo Fuel Cells ha sviluppato la sua tecnologia con il contributo di partner italiani (ENEA, FN e CESI Ricerca) e spagnoli (Iberdrola Ingegneria y Consultoria).

Nella seconda metà degli anni '90 a S. Agustin de Guadalix (Madrid, E) presso la Iberdrola è stato realizzato un impianto per il condizionamento e la prova degli stack AFCo di potenza fino a 130 kW. Il condizionamento, può essere considerato l'ultimo stadio di fabbricazione di uno stack. In questa fase vengono infatti eliminati i composti (leganti organici, additivi, plastificanti, ecc.) im-

piegati nella realizzazione della matrice ottenuta per colatura su nastro e assemblata in cella in forma di "green", avviene l'ossidazione e litiatura dei catodi in nichel metallico, nonché la fusione dei carbonati e la loro distribuzione nella matrice porosa.

Il programma di sviluppo di Ansaldo Fuel Cells, giunto a conclusione della sua seconda fase, è attualmente incentrato sulla realizzazione di una serie di impianti dimostrativi e su una parallela attività di sviluppo tecnologico e di messa a punto di processi industriali di produzione delle celle, condotta nell'ambito di collaborazioni nazionali ed internazionali:

- il primo impianto dimostrativo della "Serie 2TW", ha operato presso il sito Iberdrola di San Agustin de Guadalix fino a marzo del 2006. L'impianto era stato realizzato nel quadro del Progetto Twinpack, finanziato dalla Commissione Europea nel Quinto Programma Quadro;
- un impianto ibrido di potenza 125 kW ("Serie 1ST"), è entrato in esercizio a Bosco Marengo (Alessandria). L'impianto Tecnodemo di Bosco Marengo, avviato nel giugno 2005 presso FN, ha operato finora con diversi stack accumulando oltre 12.000 ore di funzionamento, durante le quali ha prodotto oltre 400 MWh di energia elettrica. L'impianto, costituito da una MCFC di potenza 125 kW integrata con una microturbina da 100 kW, era stato realizzato a fini puramente dimostrativi, per eseguire prove sperimentali e di tipo ambientale in differenti condizioni operative;
- un impianto ibrido MCFC/microturbina, che come il Tecnodemo utilizza un solo stack da 125 kW, è stato avviato a maggio 2006 presso il CESI Ricerca a Milano. La cella è accoppiata con una microturbina Apicom-Turbec di potenza nominale 100 kW<sub>e</sub>
- nel Progetto europeo MC-WAP (6PQ), è in corso lo sviluppo e dimostrazione di un impianto da 500 kW alimentato con diesel NATO F76, utilizzabile come unità di potenza ausiliaria in applicazioni navali. Il progetto, come punto di partenza, sfrutta le conoscenze e i risultati acquisiti nel quadro del Progetto MCFC-NG "Molten Carbonate Fuel Cell Naval Generator" promosso dalla Western Europe Army Organisation (WEAO). L'impianto, installato in Turchia presso il centro ricerche TÜBİTAK di Marmara (Istanbul), una volta ottimizzato potrà essere destinato ad usi sia a bordo di navi militari o come unità "stand alone" per la generazione di potenza in basi militari o in aree remote.
- all'interno del progetto BICEPS, finanziato nel Sesto Programma Quadro, è stata infine avviata la progettazione di due impianti da 1 MW. L'impianto da realizzare in Spagna (Murcia) sarà alimentato con gas da discarica, quello che sarà

#### Programma dimostrativo AFCo

Progetto	Dimensioni (classe)	Combustibile	Sito	Partner
First of a Kind	"Serie 2TW"	Gas naturale	Guadalix (Madrid, E)	Iberdrola (E), Balcke-Dürr (D), ENEA (I), AMG (I)
Tecnodemo	"Serie 1ST"	Gas naturale	Bosco Marengo (I)	FN
Ciclo ibrido	"Serie 1ST"	Gas naturale	Milano (I)	CESI
Applicazioni navali	"Serie 2TW"	Diesel	Marmara (Istanbul, TK)	Centro Ricerche Marmara (TK)
Applicazioni biomasse	"Serie 1ST"	Gassificazione biomasse	Trisaia (I)	ENEA (I), SUT (D) e varie università (I, F, UK, A)
H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	"Serie 2TW"	Idrogeno	Milano Bicocca (I)	
MC-WAP (APU appl. navali)	"Serie 2TW"	Diesel		Fincantieri
BICEPS	Impianti classe -1 MW	Gas da discarica	Terni (I)	Balcke (d), Turbec (C,I), Iberico (E), ecc
		Landfill gas	Murcia (E)	
Accordo di Programma Asscarta / MSE e MATT	Impianti Classe- MW	Residui industria della carta		Asscarta (I)



Impianto "First of a kind" da 125 kW (S. Agustin de Guadalix, E)



Impianto Tecnodemo da 125 kW (Bosco Marengo, I)

costruito in Italia (Terni) opererà invece con ADG da rifiuti urbani.

Nel 2006, AFCo ha sottoscritto un accordo quadro con Assocarta, Ministero dell'Ambiente e Tutela del Territorio e Ministero dello Sviluppo Economico per sviluppare impianti MCFC alimentati con gas proveniente dalla gassificazione degli scarti di cartiera. L'accordo prevede la realizzazione di un primo impianto pilota da 1 MW e quindi di altri due sistemi da 4 MW che saranno collocati presso industrie cartarie italiane. Gli impianti integreranno un'unità di trattamento degli scarti di cartiera, in grado di produrre un gas composto per il 65% da idrogeno e per l'8-10% da monossido di carbonio.

La società ad ottobre 2007 ha siglato un accordo di collaborazione con la statunitense L-3 Communication Combat Propulsion Systems per lo sviluppo di sistemi di generazione di energia con MCFC per il settore militare.

Presso AFCo proseguono le attività di sviluppo tecnologico dei componenti d'impianto per:

- migliorare le prestazioni dello stack e prolungarne la durata;
- migliorare l'efficienza globale dell'impianto mediante processi innovativi e maggiori integrazioni del sistema;
- minimizzare i costi relativi ai materiali, alla produzione ed all'assemblaggio, con l'obiettivo di raggiungere a breve costi di circa 3.500 €/kW.

Nel 2004, AFCo ha spostato a Terni le attività relative alla produzione dei componenti attivi degli stack e al loro assemblaggio e condizionamento. L'attuale capacità produttiva dello stabilimento è di 3 MW/anno, ma è predisposta per essere portata a 15 MW/anno con l'avvio della commercializzazione.

Specifiche impianti AFCO	Disponibilità		
	Attuale	Breve termine	Medio termine
Potenza, MW	0,5	0,5 - 1 - 4	0,5 - 1 - >4
Efficienza elettrica impianto, %	43-45	45-49	47-55
Efficienza totale impianto, %	> 80	> 80	> 85
Diametro del vessel, m	3,2	3	3
Volume del vessel, L/KWh	120	98	< 60
Pressione di esercizio, bar	3,5	3,5 - 5	3,5-9



Linee di fabbricazione componenti di stack (Stabilimento AFCo, Terni)

## CESI Ricerca

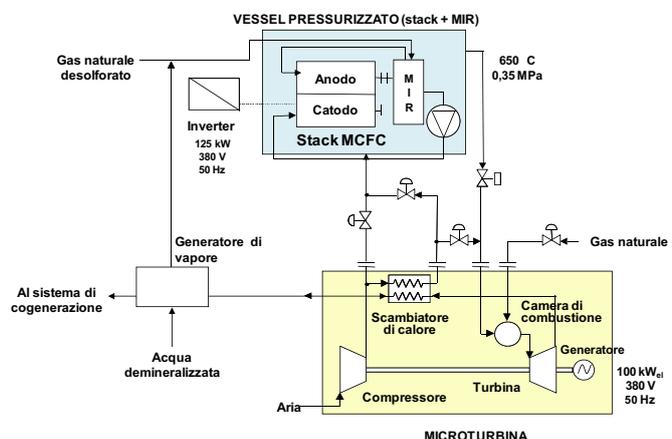
Il CESI Ricerca, che conduce da diversi anni esperienze su sistemi per generazione distribuita basati su celle a combustibile (PEFC, MCFC e SOFC), è impegnata sia in attività di ricerca di base a livello di monocelle e stack a carbonati fusi, che nella realizzazione e dimostrazione di impianti completi.

Nel 1999 presso il CESI era stato sperimentato con successo un impianto MCFC "proof of concept" da 100 kW per cogenerazione sviluppato da Ansaldo Fuel Cells, in seguito (2002) con quest'ultima era stato siglato un nuovo accordo di cooperazione per la realizzazione di una stazione di prova MCFC da 125 kW, dove sperimentare l'integrazione in un impianto ibrido di una cella a carbonati fusi con una microturbina a gas. Parte di questa attività era stata finanziata dall'Unione Europea nel 5PQ (progetto MOCAMI).

Al fine di studiare le problematiche funzionali e verificare l'affidabilità e la potenzialità di tale configurazione, CESI aveva realizzato un impianto che comprendeva una cella a carbonati fusi AFCo con potenza nominale di 125 kW ed una microturbina Apicom-Turbec T100, opportunamente modificata per permetterne l'interfacciamento con l'impianto. Il sistema, oltre a funzionare in configurazione ibrida per la produzione di energia elettrica, era predisposto per effettuare procedure di



Impianto ibrido MCFC/MTG da 125 kW (CESI Ricerca, Milano)



condizionamento degli stack. L'impianto, alimentato a gas naturale, è stato esercito per un periodo continuativo di oltre 1.300 ore, producendo circa 71.500 kWh d'energia elettrica.

CESI Ricerca è una delle organizzazioni coinvolte nel Progetto FCES<sup>QA</sup> (Fuel Cell Testing, Safety and Quality Insurance) promosso dalla Commissione Europea e finalizzato alla messa a punto e validazione di procedure di prova di celle di varia tecnologia (celle polimeriche, a carbonati fusi e ad ossidi solidi) da usare come base di partenza per lo sviluppo di normative e standard condivisi a livello internazionale. In particolare all'interno del Work Package relativo alle MCFC, il CESI sta eseguendo prove di durata, in varie condizioni operative, su monocelle e sub-scale stack (1 kW di tecnologia Ansaldo).

## ENEA

Come per le celle ad elettrolita polimerico, ENEA ha una consolidata esperienza nel settore delle celle a carbonati fusi, acquisita nell'ambito di progetti nazionali ed europei svolti in collaborazione con l'industria (Ansaldo Fuel Cells) e varie strutture di ricerca (CESI Ricerca, istituti del CNR ed universitari).

L'ENEA, in qualità di coordinatore di progetti finanziati dal Ministero dell'Università e della Ricerca (Progetti FISR), ha operato negli ultimi anni a stretto contatto con Ansaldo Fuel Cells. Nel campo della ricerca di base, ENEA ha contribuito allo sviluppo del know-how relativo ai componenti di cella (anodo, catodo e matrici per l'elettrolita) e supportato l'industria nella fase di messa a punto e sviluppo della tecnologia. In collaborazione con la sua consociata FN s.p.a. – Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, ha inoltre partecipato allo sviluppo di un processo di produzione per tape-casting dei componenti porosi di cella.

Nel quadro dell'attuale Progetto FISR/TECSA "Sviluppo delle tecnologie delle celle a combustibile e dei sistemi per le loro applicazioni", ENEA sta lavorando allo sviluppo di materiali per componenti di cella (materiali catodici alternativi all'ossido di nichel) e alla messa a punto di processi per la protezione dalla corrosione dei piatti bipolari.

All'interno del progetto, nella linea relativa allo sviluppo di sistemi ibridi MCFC/turbina, presso il Centro Ricerca ENEA della Casaccia è in corso la realizzazione di un emulatore, che sarà impiegato per studiare l'accoppiamento e l'integrazione di celle a carbonati con turbine di taglia diversa (una turbina da 100 kW sarà fornita da AFCO, una turbina da 600 kW sarà acquisita nell'ambito di un parallelo progetto FISR coordinato dall'Università di Genova).



Stazione di prova celle MCFC da 100 cm<sup>2</sup>  
(Laboratori ENEA C.R. Casaccia)



Impianto pilota della Trisaia  
(sezioni di gassificazione e purificazione)

Altre attività riguardano la sperimentazione presso il Centro Ricerche ENEA della Trisaia di un impianto da 125 kW che sarà alimentato con diversi biocombustibili e/o con gas simulanti biogas di varia origine. Si ricorda che presso il centro è presente un impianto pilota realizzato nel quadro del Progetto europeo "Clean Energy from Biomass" con l'obiettivo di verificare la fattibilità tecnica dell'accoppiamento di un processo catalitico di gassificazione di biomasse con una MCFC.

L'impianto comprende: una sezione di gassificazione con vapor d'acqua della biomassa (gusci di mandorle, scarti legnosi); una sezione di purificazione del gas per l'abbattimento del particolato solido e la separazione dei componenti acidi (H<sub>2</sub>S, HCl); un'unità MCFC da 125 kW. La realizzazione del BoP della cella e la sua integrazione nell'impianto esistente saranno effettuati nell'ambito del progetto TECSA.

La attività descritte si integrano con quelle inserite nel progetto di ricerca "Celle a combustibile per cogenerazione", finanziato nell'ambito di un Accordo di Programma con il Ministero dello Sviluppo Economico (Fondo per la Ricerca sul Sistema Elettrico). Il progetto, avviato nel 2007, nella linea relativa alle celle a carbonati fusi prevede infatti lo sviluppo di:

- processi a basso costo per la produzione dei componenti di cella (attività svolta prevalentemente da FN);
- sistemi alimentati con gas derivante da scarti e residui agricoli e zootecnici;
- sistemi integrati cella/turbina (attività svolta a integrazione di quanto previsto sullo stesso tema nel progetto FISR/TECSA).

Le attività ENEA sono svolte con il supporto di Ansaldo Fuel Cells e Ansaldo Ricerche e con il contributo dell'Università di Roma "La Sapienza" e dell'Università di Napoli "Federico II".

ENEA partecipa inoltre alle attività di un progetto coordinato dall'Università di Genova, finanziato anch'esso attraverso il FISR, indirizzato alla realizzazione e sperimentazione, presso l'impianto a celle a combustibile di Milano-Bicocca, di un sistema da 500 kW pressurizzato alimentato con gas di sintesi a composizione variabile. ENEA prende parte alla definizione del sistema e

## Programma Strategico "Nuovi sistemi di produzione e gestione dell'energia" - FISR

### Progetto "Sviluppo delle tecnologie delle celle a combustibile e dei sistemi per le loro applicazioni"

#### Linea 2. Celle a combustibile a carbonati fusi

Il progetto, nella linea relativa alle celle a carbonati fusi, che coinvolge ENEA ed Ansaldo Fuel Cells, prevede le seguenti attività:

##### A. Ricerca e sviluppo di materiali e componenti innovativi

In questa linea è prevista la messa a punto di componenti e processi innovativi (materiali per elettrodi e/o elettrolita, componenti metallici) che consentano di superare i limiti attuali della tecnologia in termini di prestazioni e costi. Sono previste le seguenti azioni:

- sviluppo dei componenti attivi di cella (elettrodi e elettrolita), con particolare riguardo sia agli aspetti tecnici ed economici
- sviluppo dei componenti metallici di cella per risolvere i problemi legati alla corrosione degli stessi da parte dei carbonati, con messa a punto di processi di ricopertura più efficaci e meno costosi.

##### B. Sviluppo di sistemi combinati cella/turbina, attraverso la realizzazione e sperimentazione di un emulatore di un sistema MCFC da 500 kW

Questa attività prevede lo sviluppo e la sperimentazione di sistemi innovativi per la generazione elettrica distribuita basati sull'utilizzo di turbine a gas e celle a combustibile ad alta temperatura, integrate in impianti ibridi.

Obiettivo di questa linea è l'acquisizione del knowhow necessario per definire configurazioni e taglie di impianto atte a realizzare cicli ibridi ottimali per l'integrazione tra celle a combustibile e turbine sui quali basare la realizzazione di impianti ibridi "commerciali". A tal fine presso il C:R. ENEA della Casaccia è prevista la realizzazione di un emulatore di celle per studiare l'accoppiamento celle a carbonati fusi/turbina, e per simulare sperimentalmente un ciclo ibrido.

Questa attività è strettamente connessa con attività svolte all'interno di un Progetto FISR coordinato dall'Università di Genova.

##### C. Sperimentazione di un impianto MCFC da 125 kW con bio-combustibili di origine diversa

Un impianto costituito da un gassificatore di biomasse e da uno stack da 125 kW, realizzato presso il Centro ENEA della Trisaia nell'ambito di un precedente progetto europeo, sarà utilizzato per la sperimentazione con diversi combustibili di origine biologica.

In particolare sono previste le seguenti azioni:

- adeguamento dell'impianto per l'alimentazione della cella con gas simulati di diversa composizione, rappresentativi di diversi combustibili;
- sperimentazione dell'impianto e analisi del comportamento dello stack con i diversi combustibili;
- valutazione dei risultati e individuazione degli interventi necessari per lo sviluppo di stack e sistemi in grado di operare con diversi combustibili di origine biologica..

Le attività sono svolte prevalentemente dall'ENEA, che si avvale della collaborazione di AFCo per l'ottimizzazione della parte impiantistica.

##### D. Analisi di impatto ambientale

In questa linea che prevede un'analisi di impatto ambientale sia a livello di stack che di sistema, sono previste le seguenti azioni:

- messa a punto della metodica per l'analisi di impatto ambientale e di ciclo di vita;
- sviluppo di un codice di calcolo ed individuazione dei dati di input per il calcolo dei principali indicatori di impatto ambientale e di ciclo di vita;
- acquisizione dei dati di input. Dato il carattere di ricerca del progetto, i dati di input risentiranno, nel corso dei tre anni di durata del progetto, dei risultati raggiunti, l'analisi di impatto ambientale e del ciclo di vita verrà quindi aggiornata sulla base dei dati che si renderanno man mano disponibili. Il codice di calcolo sviluppato consentirà di valutare la bontà dei risultati ottenuti anche in termini di impatto e di ciclo di vita.

### Progetto **TECSA**

Durata: luglio 2005 – gennaio 2009

Costo totale: 10,8 M€

#### LINEA 1

##### CELLE A COMBUSTIBILE AD ELETTROLITA POLIMERICO

ENEA, Arcotronics Fuel Cells, Industrie De Nora

- Ricerca e sviluppo di materiali e componenti innovativi
- Sviluppo stack e nuove configurazioni di cella
- Realizzazione e sperimentazione di stack e sistemi da 1-5 kW, con diversi combustibili

#### LINEA 2

##### CELLE A COMBUSTIBILE A CARBONATI FUSI

ENEA, Ansaldo Fuel Cells

- Ricerca e sviluppo di materiali e componenti innovativi
- Sviluppo di sistemi combinati cella/turbina attraverso sviluppo di un emulatore di un sistema MCFC da 500 kW
- Sperimentazione di un impianto da 125 kW con biocombustibili
- Analisi di impatto ambientale e ciclo di vita

all'impostazione delle prove sperimentali, collabora alle attività di integrazione cella/turbina, nonché all'esercizio dell'impianto stesso.

Infine in ambito europeo ENEA sta coordinando, congiuntamente con JRC (Joint Research Center, Petten, NL), due progetti finanziati dalla Commissione Europea (FCTES<sup>QA</sup> e FCTEDI) relativi allo sviluppo, verifica e diffusione di procedure di prova per celle e sistemi a celle a combustibile di diversa tecnologia, lo scopo è quello di arrivare a definire una serie di procedure e protocolli di prova armonizzati, da usare a supporto dello sviluppo di normative e standard condivisi a livello internazionale.

All'interno del progetto FCTES<sup>QA</sup> (Fuel Cell Systems Testing, Safety & Quality Assurance) sta proseguendo il lavoro di definizione di procedure di prova di celle e stack avviato in un progetto precedente (FCTESTNET). Le procedure già individuate vengono validate sia attraverso prove sperimentali, che mediante "Round Robin test" intesi a dimostrare l'affidabilità della procedura e la riproducibilità dei risultati. In FCTES<sup>QA</sup> ENEA coordina le attività del Work Package sulle MCFC, al quale partecipano CESI Ricerca, Ansaldo Fuel Cells e il KIST (Korea Institute of Science and Technology), e nel quale è responsabile della linea di attività concernente la validazione delle procedure di prova a livello di celle singole.

Obiettivo del progetto FCTEDI (Fuel Cell Testing and Dissemination) sarà quello di diffondere i risultati ottenuti in FCTES<sup>QA</sup> e di analizzare quanto è necessario fare a livello di normative, codici e standard per celle a combustibile per usi stazionari.

## FN - Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati

FN - Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, società controllata da ENEA, impegnata sin dal 1990 in attività di sviluppo di processi di produzione di componenti porosi per celle a carbonati fusi, ha avviato successivamente (2004) la progettazione e realizzazione di sistemi MCFC di potenza 1-5 kW, in collaborazione con IPASS (Consorzio Ingegneria per l'Ambiente e lo Sviluppo Sostenibile). Presso FN, come riferito in precedenza, è stato esercito con Ansaldo Fuel Cells un impianto ibrido da 125 kW (Tecnodemo). L'impianto era stato realizzato con finanziamenti del Ministero dell'Ambiente e Tutela del Territorio.

Nella prima fase di ricerca FN si era occupata dello sviluppo dei materiali di base per la matrice ceramica e, con il supporto di AFCo e di ENEA, aveva messo a punto processi di fabbricazione di componenti porosi (anodo, catodo, matrice in  $\gamma$ -alluminato di litio), era stata quindi allestita una linea pre-industriale per la fabbricazione per tape casting di componenti porosi, di dimensioni fino a 130 x 170 cm. Questa linea è stata utilizzata per produrre componenti per diversi stack AFCo.

All'interno dell'Accordo di Programma ENEA-Ministero dello Sviluppo Economico, FN prosegue lo sviluppo di nuove tecnologie di sintesi di polveri e di formatura di componenti porosi per MCFC. Per le matrici, attualmente prodotte per tape-casting, è stato avviato lo sviluppo di una tecnologia di formatura in plastico, che dovrebbe consentire di abbattere i costi di produzione e migliorare la qualità del processo, riducendone l'impatto ambientale. In particolare, si stanno sviluppando compound ceramico-plastici atti ad una successiva estrusione in lastra. Una volta messo a punto il processo su scala pilota, sarà realizzata una linea di fabbricazione di tipo pre-industriale.



Stack da 20 celle



Impianto di tape casting presso FN, (particolare del banco di rullatura)

Nel 2004, FN su brevetto della società IPASS ha avviato lo sviluppo di stack MCFC con celle a geometria cilindrica. È stato realizzato e sperimentato uno stack da 30 celle e sono in corso attività rivolte alla costruzione di stack da 1 e 2 kW, la cui sperimentazione avverrà rispettivamente a cura del Consorzio GESEN Gestione Energetiche S.p.A. (Consorzio dei Comuni del Bacino Territoriale Napoli 1) ed presso il CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici) di cui è capofila l'Università di Perugia.

## Università di Genova - "Progetto FISR Bicocca"

Il Dipartimento di Macchine Sistemi Energetici e Trasporti (DIMSET) dell'Università di Genova, che opera nel campo della modellizzazione ed analisi sperimentale di sistemi energetici, sta coordinando un progetto FISR rivolto allo sviluppo di un sistema MCFC pressurizzato e alla sperimentazione di un impianto dimostrativo di tipo ibrido da 500 kW alimentato con gas di sintesi a composizione variabile. Partecipano al progetto Ansaldo Fuel Cells, ENEA, il Politecnico di Milano e la Zincar, società del Gruppo AEM.

L'impianto sarà collocato presso la struttura di AEM-Zincar di Milano Bicocca, dove in passato era stato sperimentato l'impianto PAFC da 1.3 MW (costruito nell'ambito di una collaborazione Ansaldo/ENEA/AEM), e presso il quale sono già presenti ed utilizzabili una serie di infrastrutture (opere civili, allacciamenti e impianti elettrici) e componenti di impianto (reformer a gas naturale e reattori di shift, turbocompressore). Il revamping del sito e le attività preliminari di smontaggio dell'impianto PAFC e la rimessa in servizio del reformer sono effettuate al di fuori di questo progetto.

Il sistema MCFC, progettato e realizzato da Ansaldo Fuel Cells, sarà costituito da 4 stack da 125 kW disposti secondo la configurazione TWINSTACK®. Nell'assetto di primo livello dell'impianto, lo stack MCFC pressurizzato opererà in combinazione con il turbocompressore già disponibile presso il sito, successivamente (assetto di secondo livello) lavorerà in combinazione con una microturbina a gas a ciclo rigenerativo, in parte sviluppata e sperimentata su un emulatore di sistema ibrido realizzato presso il centro ricerche ENEA della Casaccia, nel quadro del Progetto FISR/TECSA.

L'Università di Genova, in collaborazione con il Politecnico di Milano, ha in corso attività di modellizzazione degli impianti che verranno realizzati, e dei quali studierà il comportamento in condizioni statiche e dinamiche.

Le celle ad ossidi solidi (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) operano a temperatura elevata (circa 800-1000 °C), per assicurare una sufficiente conducibilità all'elettrolita ceramico.

Per le SOFC sono state proposte diverse configurazioni, che si differenziano per forma della cella, dimensioni e spessore dei componenti e geometria dei canali di flusso per i gas reagenti. Attualmente le configurazioni geometriche maggiormente sviluppate sono: quella tubolare della Siemens Power Generation e quella planare.

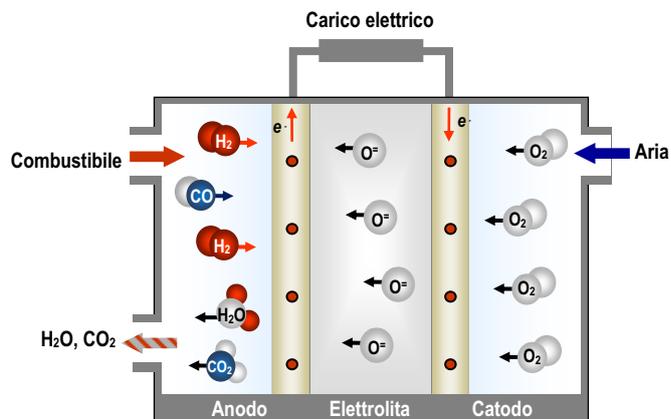
I materiali costituenti i componenti di cella, così come i requisiti richiesti a questi ultimi, sono per lo più indipendenti dalla configurazione adottata: l'elettrolita è un materiale ceramico (ossido di zirconio stabilizzato con ossido di ittrio), l'anodo un cermet di ossido di nichel e ossido di zirconio ed il catodo un manganito di lantanio drogato con stronzio. Essendo tutti i componenti allo stato solido, vengono eliminati i problemi di resistenza alla corrosione e di evaporazione tipici delle celle con elettrolita liquido.

Grazie all'elevata temperatura, non sono richiesti requisiti particolari per il combustibile, non è necessario un sistema di conversione di quest'ultimo prima di alimentare la cella, avvenendo tale fenomeno all'interno dello stack. Si possono così realizzare sistemi in cui, come nel caso delle celle a carbonati, il combustibile, che può essere gas naturale, ma anche biogas o gas da carbone, è direttamente inviato in cella, giungendo così a notevoli semplificazioni impiantistiche.

Con una temperatura di funzionamento dell'ordine dei 1000 °C il calore di scarto che le celle ad ossidi solidi rendono disponibile può essere utilizzato nell'ambito di cicli in combinazione con turbine a gas (ciclo combinato avanzato), per i quali l'efficienza elettrica attesa è superiore al 60%, potendo raggiungere, così come indicato dal maggior produttore di celle ad ossidi solidi, la Siemens, addirittura il 70%. Sistemi ad alta efficienza che integrano SOFC e turbine a gas possono essere realizzati nell'intervallo di potenza da 250 kW ad oltre 25 MW, e rappresentano la soluzione a più alta efficienza per la generazione distribuita di energia elettrica.

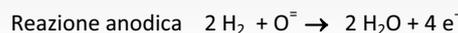
Tra le varie tecnologie di cella è l'unica che, in virtù sia della temperatura di funzionamento, che dei materiali utilizzati, possiede il potenziale per poter essere competitiva sul mercato sia con unità di piccola taglia per usi portatili e residenziali (inferiori ai 5 kW), che con impianti da 15-20 MW ed oltre per la generazione di potenza distribuita. Le SOFC possono inoltre trovare applicazione come unità di potenza ausiliaria nel settore della trazione.

I problemi che restano ancora da risolvere per questa tecnologia sono essenzialmente legati al degrado dei materiali ed al loro



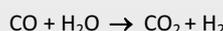
## REAZIONI ELETTROCHIMICHE

Le reazioni che avvengono in una cella a ossidi solidi sono:



Come per le celle a carbonati, l'elevata temperatura di esercizio della cella consente l'alimentazione diretta di metano o di idrocarburi leggeri, con conversione degli stessi all'anodo della cella o in una zona adiacente.

Le reazioni all'anodo coinvolgono sia l'idrogeno, che il monossido di carbonio presente nel combustibile. Quest'ultimo reagisce sia con gli ioni ossigeno per produrre anidride carbonica, sia con l'acqua, formando idrogeno:



### MATERIALI DEI COMPONENTI DI CELLA

<b>Anodo</b>	Cermet Ni-ZrO <sub>2</sub> ; spessore ≈ 100-150 μm, porosità 20 - 40 % Processo di fabbricazione: Slurry-coat, EVD o plasma spray
<b>Catodo</b>	La(Sr)MnO <sub>3</sub> ; spessore ≈ 2 mm, porosità 30-40 % Processo di fabbricazione: Estrusione/sinterizzazione
<b>Elettrolita</b>	ZrO <sub>2</sub> (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ); spessore ≈ 30-40 μm Processo di fabbricazione: EVD
<b>Interconnessione</b>	La(Mg)CrO <sub>3</sub> ; spessore ≈ 100 μm Processo di fabbricazione: plasma spray

Specifiche SOFC Siemens

assemblaggio. Un grosso sforzo, per diminuire le sollecitazioni cui sono sottoposti i materiali si sta compiendo, cercando di abbassare la temperatura di funzionamento della cella dagli attuali 1000 °C a circa 700-800 °C, senza con questo provocare sensibili decadimenti di prestazioni.

Naturalmente anche per questa tecnologia, che pure sembra poter essere realizzabile a costi accettabili, si richiede un notevole impegno di ricerca e sviluppo finalizzato alla riduzione dei costi.

## CONFIGURAZIONI DI CELLA

### Celle tubolari

I componenti di cella (catodo, interconnessione, elettrolita ed anodo) sono depositati in forma di film sottili (50-100  $\mu\text{m}$ ) uno sull'altro e sinterizzati a formare la struttura tubolare, come mostrato in figura. Nelle celle Siemens di prima generazione i vari componenti erano depositati sequenzialmente su un supporto tubolare poroso chiuso ad un'estremità, mentre attualmente è il catodo a fungere da supporto.

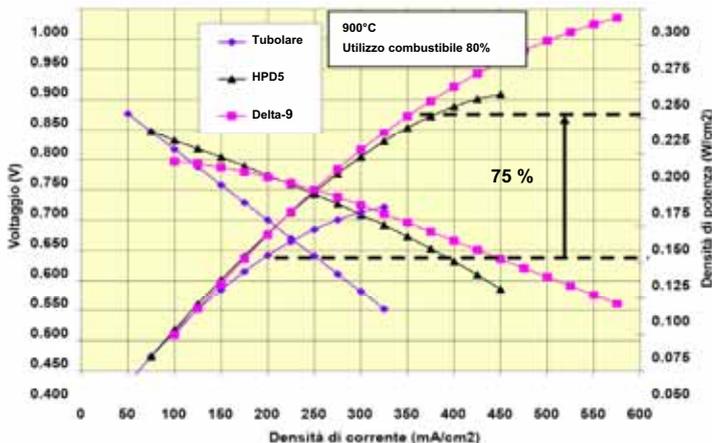
Nella configurazione tubolare classica, il catodo è realizzato in manganito di lantano ed è fabbricato mediante un processo di estrusione seguito da sinterizzazione per ottenere una porosità del 30-35 %.. L'elettrolita è ossido di zirconio drogato con circa il 10 % di ossido di ittrio ed è depositato in forma di film sottile (40  $\mu\text{m}$ ) mediante deposizione elettrochimica in fase vapore (EVD). Lo strato anodico, costituito da un cermet Ni-zirconia, è depositato sull'elettrolita mediante processo EVD o "plasma spray". L'interconnessioni elettriche sono costituite da cromato di lantano depositato attraverso tecnica plasma spray seguita da sinterizzazione.

Nello stack, le celle sono disposte in serie o in parallelo ed il contatto elettrico tra le stesse è realizzato attraverso conduttori metallici (feltri di nichel). La lunghezza della singola cella, di diametro 1,27 cm, è stata aumentata gradualmente dai 30 cm iniziali a circa 150 cm.

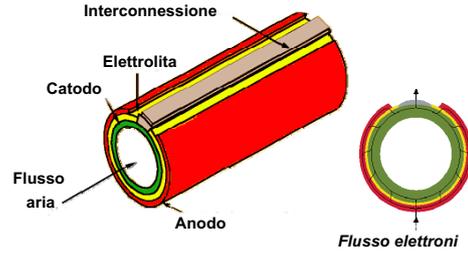
I limiti di questa tecnologia sono connessi ai costi di produzione ancora elevati e difficilmente riducibili con gli attuali complessi processi di fabbricazione (come la deposizione elettrochimica in fase vapore, oggi utilizzata per la deposizione dell'elettrolita).

Siemens ha quindi iniziato a lavorare alla messa a punto di nuove geometrie di cella, denominate High Power Density (HPD). La configurazione HPD è caratterizzata da rib realizzati nel catodo che fanno da ponte per il passaggio della corrente. Il flusso degli elettroni risulta più agevole, ne consegue una minore resistenza interna di cella e quindi una più elevata densità di potenza. Rispetto alla configurazione tubolare classica si hanno minori spazi vuoti tra le singole celle, il che conferisce, a parità di potenza prodotta, una maggiore compattezza al sistema.

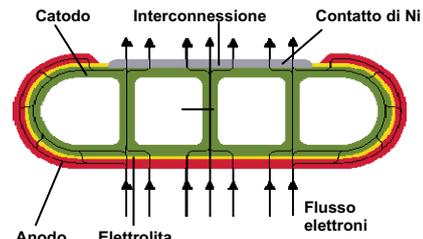
Siemens ha successivamente sviluppato una nuova geometria denominata Delta-9, nella quale le celle, a parità di lunghezza (75 cm), presentavano un'area attiva superiore a quelle delle celle HPD (sia nella geometria con 5 che con 10 canali) e quindi una maggiore densità di potenza per cella. Questa configurazione nel 2007 è stata ulteriormente perfezionata (celle Delta-8).



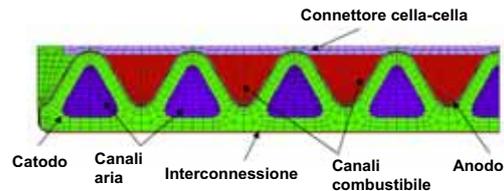
### Evoluzione tecnologia Siemens



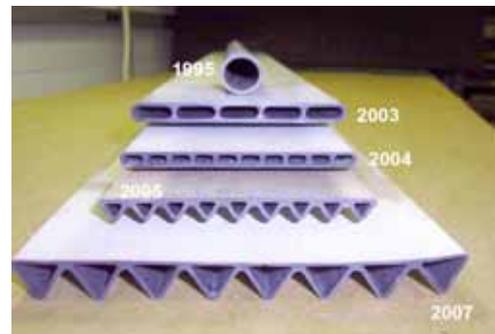
Configurazione tubolare



Configurazione High Power Density



Configurazione High Power Density Delta



Transizione dalla configurazione cilindrica alla Delta 8

### Potenza e dimensioni di cella nelle diverse configurazioni

Geometria	Lunghezza (cm)	Area attiva (cm <sup>2</sup> )	Densità di potenza per cella (W) *
Cilindrica	150	830	190
HPD5	75	890	250
HPD10	75	810	295
Delta-9	75	1160	410
Delta-8	100	2250	1000 (stimata)

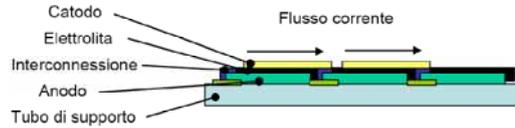
\* Stimata a 0,7 V e 1000°C

In Giappone, la Mitsubishi Heavy Industries adotta una configurazione tubolare diversa da quella Siemens. Le celle sono posizionate lungo un tubo ceramico poroso e connesse in serie per mezzo di anelli conduttori che fungono da interconnettori. Il combustibile viene alimentato all'interno del tubo, l'aria esternamente.



Cella tubolare Mitsubishi Heavy Industries

Un'altra soluzione è quella rappresentata dalle celle tubolari piane sviluppate dalla Rolls-Royce. In queste celle, elettrodi, elettrolita ed interconnessione, sotto forma di strati sottili vengono sovrapposti, ottenendo una struttura piana che si sviluppa longitudinalmente in modo compatto.



Cella Rolls-Royce



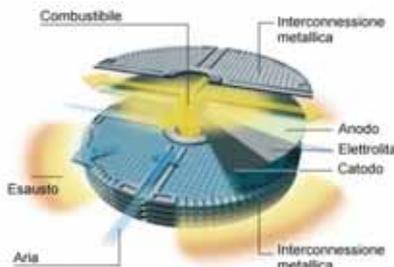
Altri costruttori che utilizzano la geometria tubolare sono Acumentrics negli Stati Uniti, TOTO Ltd., Kyushu Electric Power Co. e Nippon Steel Corp. in Giappone.

### Celle planari

Le celle con configurazione planare sono potenzialmente molto promettenti, sia perché consentono densità di potenza più elevate rispetto alle celle tubolari (la trasmissione della corrente è più razionale), sia perché ottenibili con tecnologie di fabbricazione più facilmente trasferibili su scala industriale.

Lo sviluppo di celle planari è stato finora limitato da difficoltà connesse con la produzione dei componenti (soprattutto dell'elettrolita che deve essere realizzato in fogli sufficientemente grandi e sottili ed al tempo stesso densi e resistenti) e con la realizzazione delle tenute sia tra i diversi elementi di cella, che tra cella e cella.

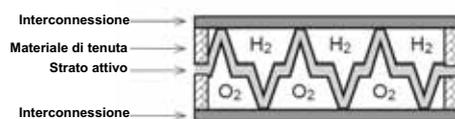
Esistono numerose varianti della configurazione planare: si passa da strutture convenzionali, del tipo di quelle adottate nelle altre tecnologie di celle a combustibile, a geometrie del tutto particolari come quelle sviluppate dalla Sulzer Hexis (oggi Hexis AG) o dalla Mitsubishi Heavy industries (MHI) in collaborazione con la Chubu Electric Power Company.



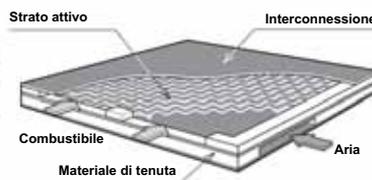
Struttura della cella Hexis

Elemento chiave della configurazione HEXIS (Heat EXchanger Integrated Stack) sviluppata dalla Sulzer, è una interconnessione metallica che svolge molteplici funzioni, agisce da scambiatore di calore, da collettore di corrente e consente la distribuzione dei gas agli elettrodi. Il flusso dei reagenti, avviene in direzione radiale, e precisamente il combustibile fluisce dalla cavità interna della cella verso l'esterno, mentre l'aria segue un percorso inverso, con la differenza che l'entrata e l'uscita del gas, avvengono all'esterno della cella.

MHI propone invece una configurazione denominata MOLB (Mono-block Layer Built), in cui la cella è composta da uno strato attivo (anodo/elettrolita/catodo), dall'interconnessione e dal materiale di tenuta, configurati secondo lo schema mostrato in figura. Lo strato attivo è modellato in modo da creare i canali per il flusso dei gas di alimentazione della cella.



Struttura SOFC MOLB

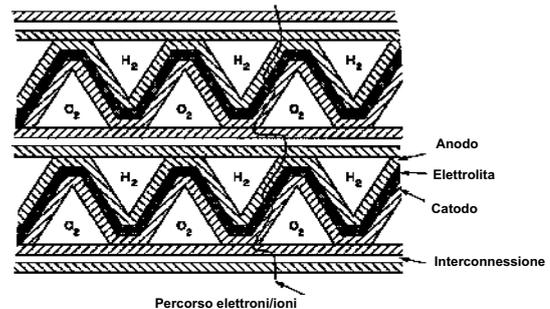


Stack SOFC Mitsubishi (10 kW)

### Celle monolitiche

In passato (1983) Argonne National Laboratory aveva proposto celle monolitiche, in cui strati (25-100 μm) composti corrugati catodo/elettrolita/anodo erano alternati a strati piani anodo/interconnessione/catodo. Il combustibile e l'ossidante erano alimentati alternativamente nei canali che si venivano a creare.

Le celle monolitiche presentavano problemi legati alla tecnologia di fabbricazione ed all'ingegneria dello stack (relativi a tenute, realizzazione di collettori di corrente e per la distribuzione dei gas) che ne hanno impedito lo sviluppo.



Schema di cella monolitica

## PROGRAMMI DI RICERCA, SVILUPPO E DIMOSTRAZIONE

Nell'ultimo decennio sono notevolmente aumentate le organizzazioni industriali e di ricerca impegnate nello sviluppo della tecnologia SOFC.

Negli Stati Uniti il Department of Energy promuove le attività in questo settore nel Programma SECA (Solid State Energy Conversion Alliance) finalizzato allo sviluppo di sistemi di potenza da 3 a 10 kW, capaci di operare con diversi combustibili, per usi nella generazione stazionaria, nel trasporto e in campo militare.

Nel programma, coordinato dal National Energy Technology Laboratory (NETL) e dal Pacific Northwest National Laboratory, sei industrie (Acumentrics, Cummins Power Generation, Delphi Automotive Systems, FuelCells Energy, General Electric Power Systems e Siemens Power Generation), con il supporto di numerose organizzazioni di ricerca pubbliche e private, stanno sviluppando in modo indipendente prototipi a diversa configurazione. I sistemi finora realizzati hanno dimostrato prestazioni che incontrano o eccedono i requisiti di efficienza, disponibilità e costo fissati per I<sup>a</sup> fase del programma.

In Giappone, attività di sviluppo delle SOFC per applicazioni stazionarie stanno ricevendo finanziamenti da parte del governo all'interno di un progetto coordinato dal NEDO avviato nel 2004 (budget 2007 circa 9,5 M€). Le celle ad ossidi solidi, come abbiamo avuto modo di accennare in una precedente sezione del rapporto, sono incluse nella roadmap redatta dal NEDO nella quale vengono definiti gli obiettivi da raggiungere entro il 2025 per diverse tipologie di cella (PEFC, SOFC e DMFC).

Attività di ricerca su materiali e componenti per celle ad ossidi solidi in grado di operare a più bassa temperatura (< 800°C) sono condotte in Europa all'interno di alcuni progetti finanziati dalla Commissione Europea nel Sesto Programma Quadro (Progetti Real-SOFC, SOFC 600 e Large SOFC).

Leader mondiale della tecnologia rimane ancora la Siemens Power Generation, l'unica ad aver realizzato impianti di potenza superiore ai 200 kW. Numerose sono le società che, adottando la tecnologia planare, sviluppano unità di piccola taglia (da alcuni kW a qualche decina di kW) per il mercato della microgenerazione distribuita.

### Stato di sviluppo dei principali costruttori

Costruttore	Nazione	Configurazione	Stato di sviluppo
Acumentrics	USA	Microtubolare	Unità fino a 10 kW
Adaptive Materials	USA	Microtubolare	Unità portatili 20 -150 W
Ceramics Fuel Cells	Australia	Planare	Unità micro CHP da 1 kW, in sviluppo unità fino a 40 kW
Cummins Power Generation / Versa Power Systems	USA	Planare	Sviluppo di unità fino a 10 kW
Delphi /Battelle	USA	Planare	Unità APU fino a 5 kW (prototipo da 2,6 kW nel 2006)
Fuel Cells Energy	USA	Planare	In sviluppo unità < 5 kW per usi stazionari e militari
Fuel Cells Technologies* /Siemens	Canada	Tubolare	Unità da 5 kW
General Electrics Energy	USA	Planari	In sviluppo unità 2-10 kW (6 kW nel 2006)
Hexis AG	Svizzera	Planare	Prototipi da 1 kW per usi residenziali
Kyocera / Osaka Gas	Giappone	Tubolare piano	Prototipi per cogenerazione da 1 kW
Mesoscopic Devices	USA	Planare	Sistemi portatili da 250 W
MHI / Chubu Electric Power	Giappone	MOLB	Sistemi per cogenerazione da 30 kW
MHI / Electric Power Development Co.	Giappone	Tubolare	Prototipo da 25 kW pressurizzato In sviluppo sistema SOFC/MTG da 200 kW
Mitsubishi Materials / Kansai Electric Co.	Giappone	Planare	Unità da 1 kW, modulo da 10 kW 1 <sup>a</sup> gen.
NanoDynamics	USA	Planare	Sistemi portatili da 50 W per usi militari
Rolls-Royce Fuel Cells Systems	Europa	Tubolare piano	Prove su sistema da 80 kW
Siemens Power Generation	USA	Tubolare	Impianti fino a 220 kW di potenza, Dimostrazione di sistemi ibridi SOFC/Turbina a gas
SOFCpower/HTCeramic	Italia/Svizzera	Planari	In sviluppo sistemi 500 W - 2 kW
Tokyo Gas	Giappone	Planare	Unità micro CHP da 1,7 kW
TOTO / Kyushu Electric Power	Giappone	Tubolare	Prototipo da 2,5 kW
Versa Power Systems	USA / Canada	Planare	In sviluppo sistemi 2-10 kW (3 kW nel 2005)
Wärtsilä Corp. / Topsøe	Finlandia / Danimarca	Planare	Prototipo da 24 kW per usi stazionari e APU per usi navali
Ztek	USA	Planare	Prototipo da 25 kW , in sviluppo unità SOFC/TG da 200 kW

\*Acquisita da Acumentrics nel maggio 2007

### Obiettivi delle diverse fasi del programma SECA

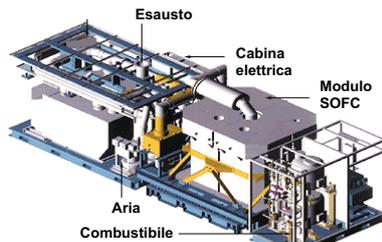
	I Fase 2005	II Fase 2008	III Fase 2010
Potenza stack	3 - 10 kW	3 - 10 kW	3 - 10 kW
Costo	< 800 \$/kW	< 600 \$/kW	< 400 \$/kW
Efficienza	Stazionario	35-55 %	40-60 %
	Trasporto	25-45 %	30-50 %
Disponibilità	80 %	85 %	95 %
Velocità di decadimento	≤2 %/500 ore	≤1 %/500 ore	≤0,1 %/500 ore
Periodo di esercizio	1500 ore		
Durata	> 40.000 ore per usi stazionari		
	> 5.000 ore per trasporto ed applicazioni militari		
Intervallo di manutenzione	1.000 ore		

## Siemens Power Generation

Siemens Power Generation (Pittsburgh, PA, USA), nota in precedenza come Siemens Westinghouse, sviluppa la tecnologia tubolare da oltre trent'anni e ha realizzato sistemi dimostrativi da 5 a 200 kW ed impianti ibridi pressurizzati fino a 300 kW di potenza, che sono stati eserciti sia nei propri laboratori, che presso utilities in diverse nazioni. Per la commercializzazione dei suoi prodotti la Siemens ha creato la divisione SFC (Stationary Fuel Cells).



Impianto CHP100



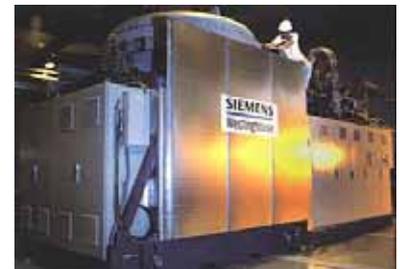
### Schema impianto da CHP100 kW

Potenza elettrica: 109 kW  
 Potenza termica: 65 kW  
 Efficienza: 46%  
 Degradazione prestazioni: < 0,1%/1.000 ore  
 Dimensioni: 8, m x 2,8 m x 3,7 m

Il primo impianto di potenza significativa (100 kW) è stato installato nel dicembre 1997 in Olanda, nell'ambito di una collaborazione con un consorzio di utilities olandesi e danesi (EDB/ELSAM). Il sistema, che impiegava gas naturale, aveva operato presso la NUON, a Westervoort, per oltre 4.000 ore nel periodo febbraio-giugno 1998, generando 471 MWh di elettricità; successivamente era stato fermato per apportare alcune riparazioni allo stack. Riavviato nel marzo 1999, l'impianto ha proseguito l'esercizio totalizzando oltre 16.600 ore e dimostrando, un'efficienza elettrica del 46%, buona affidabilità ed emissioni trascurabili.

Quest'impianto era stato in seguito trasferito ad Essen in Germania presso la RWE, dove ha operato per altre 3.780 ore. Dal giugno 2005 lo stesso impianto, come vedremo, sta funzionando a Torino, presso la TurboCare.

Il primo sistema ibrido SOFC/turbina a gas è stato costruito nel 2000. L'impianto era costituito da un modulo SOFC pressurizzato integrato con una microturbina della Ingersoll-Rand Energy Systems. L'unità era stata consegnata alla Southern California Edison per funzionare presso il National



Sistema ibrido SOFC/MTG da 220 kW, University of California, Irvine (USA)

Fuel Cell Research Center dell'Università della California di Irvine. Il sistema, che aveva una potenza di 220 kW (200 kW forniti dalla cella), ha operato per 3.200 ore, dimostrando un'efficienza elettrica del 53%.

In precedenza presso la stessa università era stata esercita un'unità da 25 kW, che era rimasta in esercizio per più di 9.000 ore con diversi combustibili, tra i quali gas naturale, diesel, e cherosene. In Giappone, nell'ambito di una dimostrazione svolta in collaborazione con Tokyo Gas e Osaka Gas, un'altra unità da 25 kW aveva operato per più di 13.000 ore, con un funzionamento ininterrotto di 6.500 ore.

Nel 2006 è stato completato lo sviluppo di nuovo sistema da 125 kW per cogenerazione (SFC200), che può essere considerato il primo prodotto precommerciale della Siemens. La sperimentazione sulla prima unità realizzata è in corso ad Hannover, altre

installazioni sono in programma a Fairbanks (Alaska) nel quadro di una collaborazione con la BP, presso la Meidensha a Tokyo e alla TurboCare a Torino.

### Impianti dimostrativi Siemens

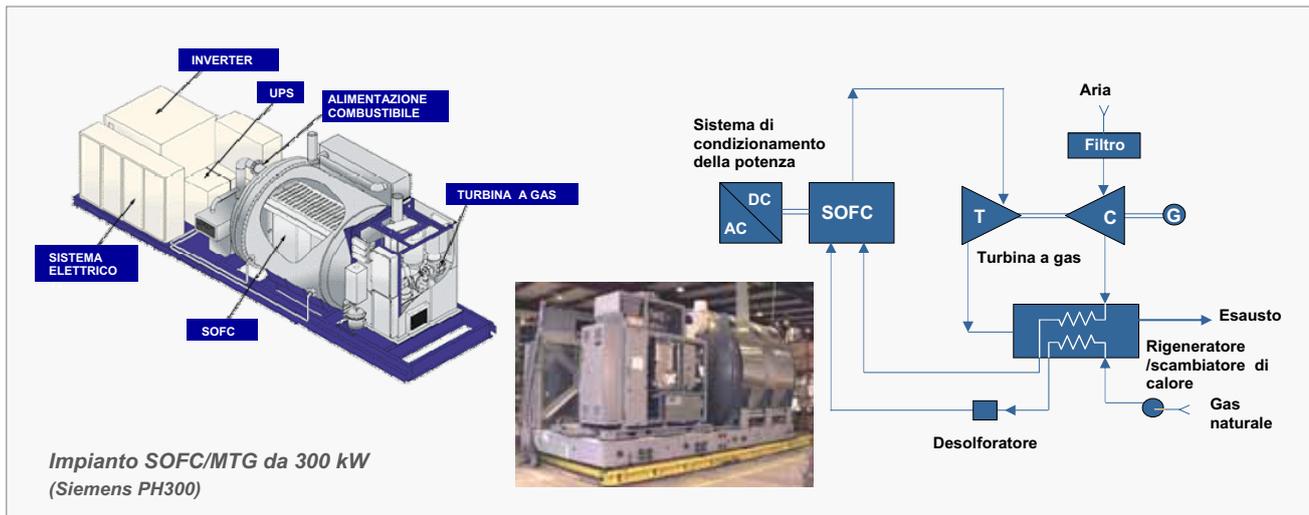
Unità	Periodo di prova	Località	Potenza kW	Efficienza elettrica % (LHV)	Ore esercizio	Stato progetto
CHP100	1999	Olanda	110	46	16.610	Completata 1° fase Progetto EOS
	2002	Germania			3.780	
	2005	Italia			16.410	
PH200	2000-2002	California	176	53	3.200	Completato
CHP250	2003	Canada	192	40	1.130	Completato
PH300	2003	Pittsburgh (Canada)	192	47	480	Proof-of-concept
CHP5-α *	2003	Germania	3.0	39	3.541	Completato
CHP5-α *	2003	Alaska	3.0	39	9.740	Completato
CHP5-α *	2003	Giappone	3.0	39	1.700	Completato
CHP5-α *	2003	Michigan	3.0	39	1.164	Completato
CHP5-α *	2005-2006	Johnstown	3.0	39	7.958	In corso
CHP5-α *	2006	Torino Italia	3.0	39	4.100	In corso
SFC-200	2006	Hannover Germania	125	46	+ 1.000	In corso
SFC-200	2007	Fairbanks Alaska	125	46		In costruzione



### Impianto Siemens SFC200

Potenza: 125 kW<sub>e</sub>  
 Potenza termica: fino a 100 kW<sub>t</sub>  
 Efficienza : 44-47 %  
 Efficienza totale: 80 %  
 Disponibilità attesa: > 98%  
 Emissioni: < 0.5 ppm NO<sub>x</sub>,  
 SO<sub>x</sub>, CO, VOC non rilevabili  
 Nessuna emissione di particolato  
 Dimensioni: 11,4 m x 3,1 m x 3,6 m

\* Realizzato in collaborazione con Fuel Cell Technologies



Siemens, per dimostrare la fattibilità di impianti ibridi SOFC/turbina a gas, nel 2002 aveva realizzato un'unità "proof-of-concept" di potenza 300 kW. La costruzione era avvenuta all'interno di un progetto finanziato dal DoE e dal Governo della Renania-Westfalia, svolto in collaborazione con un consorzio di aziende europee costituito da RWE, ENEL Produzione e Thyssengas.

Il sistema si componeva di una SOFC alimentata a gas naturale e funzionante a pressione di circa 3 bar e di una microturbina derivata da un'unità Turbec TH100 della ABB, opportunamente modificata. Il progetto prevedeva, che al termine delle prove di collaudo e di accettazione, l'impianto venisse trasferito ad Essen, per entrare in esercizio presso la RWE. Difficoltà di natura tecnica incontrate nella prima fase di prove e le complesse procedure richieste per soddisfare gli standard di sicurezza per l'esercizio in Germania, avevano in seguito portato alla decisione di continuare la sperimentazione presso Siemens negli USA. L'impianto è rimasto in esercizio a Pittsburgh per quasi 500 ore, producendo circa 100 MWh. La potenza massima prodotta e distribuita in rete era stata di 192 kWe, con un rendimento elettrico del 45,6% e un rendimento totale del 65,7%.

Nell'ottobre 2005 Siemens ha ripreso le attività di sviluppo sui sistemi ibridi all'interno del *Coal-based SOFC Hybrid Development Program* promosso dal DoE. L'attività di durata decennale, svolta in collaborazione con la ConocoPhillips e Air Products, è incentrata allo sviluppo di un sistema SOFC/TG di classe multi-MW, alimentato con gas di sintesi ottenuto da gassificazione del carbone, in grado di fornire efficienze elettriche superiori al 50% e configurato in modo da consentire il sequestro di oltre il 90% dell'anidride carbonica prodotta nel processo di gassificazione.

Siemens è inoltre impegnata nello sviluppo di sistemi da 3-10 kW all'interno del programma SECA. Con il contributo della canadese **Fuel Cell Technologies** (Kingstone, società acquisita da Acumentrics nel 2007), responsabile dello sviluppo del balance-of-plant, Siemens ha realizzato un'unità CHP di potenza 5 kW.

E' in quest'ambito che Siemens ha avviato le attività che hanno portato allo sviluppo della tecnologia di cella HPD e alla configurazione HPD Delta, consapevole del fatto che, con la tecnologia tubolare classica, difficilmente sarebbe riuscita a sviluppare sistemi con i requisiti di costo richiesti dal programma.

	Requisiti SECA	Risultati Siemens I <sup>a</sup> Fase SECA
Efficienza netta (DC), %	35-55	38
Potenza di picco, kW	3-10	5,5
Decadimento prestazioni	≤2 %/500 ore	0 (aumento potenza 2%)
Cicli termici	1	1
Cicli potenza	9	9
Disponibilità, %	≥80%	100
Durata, ore	1.500	6.300
Costo, \$/kW	800	691



### Acumentrics



SOFC tubolari Acumentrics

Acumentrics Corp. (Westwood, MA, USA), che è attiva nel settore delle SOFC dal 2000, sta sviluppando sistemi di potenza compresa nell'intervallo 250 W-10 kW, con celle microtubolari.

La società dispone di un sistema da 3 kW (Acumentrics 5000) per generazione on-site, che è grado di operare con gas naturale, propano o in alternativa direttamente con idrogeno. Alla Fiera di Hannover 2007 è stato presentato il prototipo AHEAD (Acumentrics Home Alternative Energy Device), un'unità per micro CHP da 2 kW a gas naturale, per la quale si dichiara un'efficienza



**Acumentrics 5000**  
Potenza nominale 3 kW  
(potenza di picco 5 kW)

elettrica del 30% ed un'efficienza totale intorno 90%. L'unità, destinata al mercato residenziale, sarà presto resa disponibile, ad utenti qualificati, a fini dimostrativi.

Dal 2001 sono state consegnate circa 30 unità di potenza compresa tra 300 W e 5 kW. Nel 2006 due unità da 5 kW alimentate a propano ed a gas naturale hanno operato rispettivamente in Alaska al centro visitatori dell'Exit Glacier National Park (Seward) e al Cuyahoga Valley National Park (Cleveland, Ohio)



Sistema CHP da 5 kW (Exit Glacier National Park, Alaska)

Nel programma SECA, Acumentrics ha svolto attività che le hanno consentito di migliorare notevolmente la sua tecnologia:

- la densità di potenza è stata aumentata di più di 300 volte raggiungendo circa 300 mW/cm<sup>2</sup>;
- la potenza per cella ha raggiunto i 60 W/cella;
- la velocità di degradazione delle prestazioni è passata dall'80%/1000 ore a valori trascurabili;
- i costi di fabbricazione sono stati ridotti a meno di 800 \$/kW.

Acumentrics - Risultati I <sup>a</sup> Fase SECA	
Efficienza netta (DC)	36.9 %
Potenza di picco	6,1 kW
Decadimento prestazioni	> 0.5 %/500 ore
Disponibilità	97,5 %
Costo,	729 \$/kW

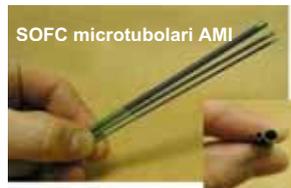
Il sistema da 6 kW, realizzato nella I<sup>a</sup> fase del programma, dopo aver operato per oltre 1.600 ore, è stato trasferito, per le prove di verifica, presso l'NETL dove è stato fatto funzionare per altre 890 ore dimostrando prestazioni particolarmente stabili. A luglio 2007 il generatore aveva operato per quasi 4.700 ore e prodotto in totale 11.402 kWh di energia elettrica.

Acumentrics ha in corso accordi con la Sumimoto Corporation per l'introduzione dei suoi prodotti nel mercato giapponese, altri partner strategici sono ChevronTexaco, Northeast Utilities, General Dynamics, NiSource e l'italiana Elco (Gruppo MTS), con la quale sta mettendo a punto un sistema CHP per usi residenziali. Dopo l'acquisizione della Fuel Cell Technologies a maggio 2007 è stata annunciata la formazione dell'Acumentrics Canada.

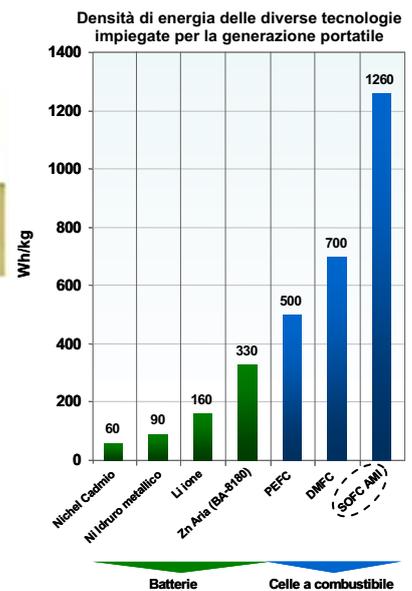
### Adaptive Materials Inc

Adaptive Materials (Ann Arbor, Michigan USA), costituita nel 2000, sta sviluppando sistemi SOFC portatili di potenza 20-150 W per usi militari. La società riceve finanziamenti dalla Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) e da altre agenzie del Dipartimento della Difesa.

Le attività fin qui svolte hanno portato alla realizzazione di unità da 25 W e 50 W, alimentate a propano, che dimostrano una buona densità di energia. I sistemi usano celle microtubolari, ottenute con un processo di fabbricazione brevettato.

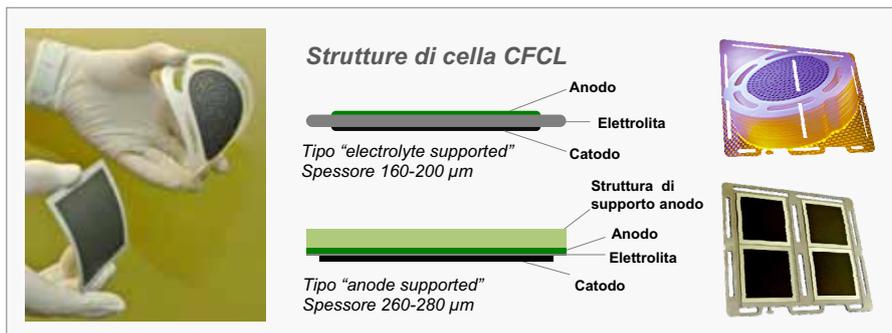


**AMI e25**  
 Potenza 25 W  
 Peso 0,96 kg  
 Volume 1,6 L  
 Efficienza netta 20%



### Ceramic Fuel Cells

La Ceramic Fuel Cells (CFCL, Melbourne, Australia) lavora nel settore delle SOFC dal 1992 e sviluppa sistemi con potenza compresa tra 1 e 5 kW per applicazioni nella micro-cogenerazione per usi residenziali e commerciali.



I primi prototipi CFCL integravano stack con celle planari, a geometria circolare, fabbricate interamente con materiali ceramici.

Attività di ottimizzazione della tecnologia, avviate nel 2005, hanno condotto ad una nuova configurazione di cella (geometria quadrata), che permette di ottenere densità di potenza maggiori (circa 400 W/cm<sup>2</sup>) e costi di fabbricazione più bassi. A differenza



Sistema CHP-2 (Wellington, Nuova Zelanda)



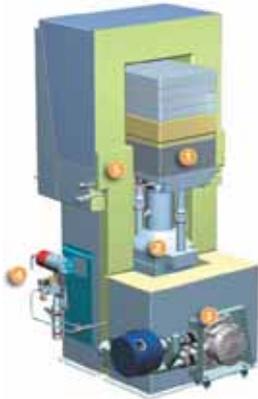
	Net-Gen	Unità CHP (2ª generaz.)
Potenza elettrica, kW	1	1
Potenza termica, kWt	1	1
Combustibile	Gas naturale	Gas naturale
Efficienza elettrica, %	~ 40	30-40
Efficienza totale, %	~ 80	> 70
Installazione	interna	interna
Dimensioni, cm	70 x 60 x 120	60 x 120 x 160
Peso, kg	150	350



Unità Net-Gen

delle precedenti, queste celle sono del tipo "anode supported" ed usano interconnessioni in materiale metallico.

Nel 2005 CFCL ha avviato un programma di prove che ha portato ad installare quattro prototipi CHP da 1 kW, a gas naturale, in Australia, Nuova Zelanda e Germania e nello stesso anno è stata presentata la prima unità pre-commerciale il Net~Gen. A luglio 2006 questo sistema ha ottenuto la certificazione CE per l'esercizio in Europa.



GenNex 1 kW

- 1 - Stack
- 2 - BoP (generatore di vapore, bruciatore, scambiatori di calore)
- 3 - Sistema alimentazione aria e
- 4 - Sistema fornitura acqua
- 5 - Isolamento

Le prove sul sistema CHP-2 sono state condotte in collaborazione (con PowerCo in Nuova Zelanda, Szcencorp in Australia e EWE in Germania. Recentemente accordi finalizzati allo sviluppo di sistemi residenziali per il mercato francese e tedesco sono stati siglati da CFCL rispettivamente con Gaz de France e De Dietrich Thermique e con il gruppo formato da EWE e Bruns Heiztechnik GmbH (costruttore sistemi per riscaldamento). Un precedente accordo con la EWE prevede la fornitura entro il 2007 di dieci unità Net~Gen per prove dimostrative.

Le unità NetGen<sup>PLUS</sup> consegnate nel 2007 integrano moduli SOFC da 1 kW (GenNex) realizzati con celle in metallo-ceramico e componenti del balance-of-plant ottimizzati.

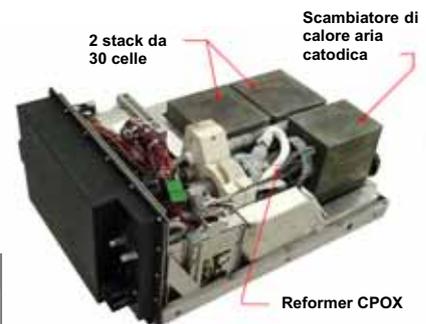
## Delphi Corporation

Delphi (Troy, MI, USA) sviluppa la tecnologia SOFC da oltre un decennio e nel Programma SECA, sta lavorando in collaborazione con Battelle alla realizzazione di un sistema APU (3-10 kW) per applicazioni nel trasporto.

Nel 2006 presso il National Energy Technology Laboratory è stata completata la dimostrazione di un sistema a metano di potenza 4,2 kW, che ha dimostrato prestazioni e costi in linea con quelli richiesti nella I<sup>a</sup> fase del programma.



Stack SOFC da 30 celle (2,5 L, 9 kg)



Sistema integrato Delphi da 4,2 kW (unità di 3ª generazione; 39 kg/kW, 30 L/kW)

Delphi - Risultati I <sup>a</sup> Fase SECA	
Potenza	4,24 kW
Costo	767 \$/kW
Efficienza	37 % (PCI)
Decadimento prestazioni	7,3 % /1.500 ore

## GE Energy

GE Energy (Torrance, CA, USA) svolge attività sia nel quadro della Energy Clean Coal Initiative promossa dal DoE e finalizzata allo sviluppo di sistemi SOFC di potenza multi-MW integrati con impianti di gassificazione del carbone (IGFC), che nel programma SECA.

GE aveva concluso la prima fase di questo programma a giugno 2005, con la realizzazione di un prototipo da 5,4 kW, che sottoposto a sperimentazione per 1.720 ore aveva ottenuto un'efficienza del 41% ed una degradazione delle prestazioni del 1,8% su 500 ore. Il sistema è costituito da 4 stack, con celle planari di area attiva 150 cm<sup>2</sup>, integrati con un'unità di trattamento del combustibile (di tipo ATR) progettata allo scopo.

GE prevede che, con alti volumi produzione, il costo del sistema potrebbe essere pari a 724 \$/kW.



Prototipo I<sup>a</sup> fase SECA (2005)

GE - Risultati I <sup>a</sup> Fase SECA	
Efficienza netta (DC), %	41
Costo, \$/kW	724
Potenza di picco, kW	5,4
Decadimento prestazioni	1,8 %/500 ore
Cicli termici	3
Cicli potenza	15
Disponibilità, %	90%
Durata, ore	1.720

Le attività stanno proseguendo e di recente è stata annunciata la realizzazione di un prototipo più compatto del precedente (riduzione del volume del 75%), alimentato da un singolo stack, con celle di area attiva pari a 600 cm<sup>2</sup>. Prove preliminari eseguite sul nuovo sistema fanno prevedere un aumento dell'efficienza al 49%.

## Hexis AG

Hexis AG (Winterthur, CH) ha operato come Sulzer Hexis fino al gennaio 2006 quando è stata acquisita da una fondazione svizzera. La società è impegnata nello sviluppo di sistemi CHP di potenza 1 kW per usi residenziali, alimentati a gas naturale.

Ricordiamo che il progetto HEXIS (Heat EXchanger Integrated Stack) era stato avviato dalla Sulzer nel 1991.



Stack HEXIS

Dal 2001 il primo sistema da 1 kW sviluppato (HXS 1000 Premiere) è stato consegnato ad oltre un centinaio di utenti in diverse nazioni europee, la metà di questi sistemi ha fornito energia elettrica e calore a singole abitazioni. La sperimentazione è stata condotta in collaborazione con aziende fornitrici di elettricità o gas, come GVM in Svizzera, EnBW, E.ON, EWE in Germania ed Erdgas Oberösterreich in Austria. Le unità hanno operato in condizioni reali accumulando in totale oltre 1,5 milioni di ore di esercizio.



HXS 1000 Premiere

La sperimentazione del HXS 1000 Premiere sta proseguendo e in parallelo sono iniziate le prove su un nuovo prototipo, il Galileo 1000N. In quest'ultimo, il modulo SOFC fornisce 1 kW di potenza elettrica ed una potenza termica di circa 2,5 kW. Nell'unità è integrato un bruciatore ausiliario che, in caso di necessità, produce ulteriori 20 kW di calore.



### Galileo 1000N Hexis

Potenza elettrica: 1 kW max.  
 Potenza termica dalla cella: 2,5 kW max.  
 Potenza termica dal bruciatore ausiliario: 20 kW  
 Efficienza elettrica: 25-30% (obiettivo: >30%)  
 Efficienza totale: > 90%  
 Combustibile : gas naturale  
 Reforming: CPO (Catalytic Partial Oxidation)  
 Dimensioni: 55 x 55 x 160 cm  
 Peso: 170 kg

## Kyocera Corp. / Osaka Gas

Kyocera Corporation (Tokyo, J) ed Osaka Gas (Osaka, J) stanno sviluppando unità per cogenerazione di piccola taglia per usi residenziali.

Nel 2005 il gruppo, a fini dimostrativi, aveva installato un prototipo da 1 kW in un'unità abitativa del "Next21", un complesso residenziale di proprietà della Osaka Gas, costruito con l'intento di sperimentare tecnologie in grado di coniugare standard di vita confortevoli, con risparmio energetico e conservazione dell'ambiente.

Sul prototipo, rimasto in esercizio per oltre 2.000 ore (nov. 2005 - mar. 2006), era stata misurata un'efficienza elettrica del 49% e termica del 34%. I dati raccolti avevano dimostrato che, rispetto a sistemi di generazione di potenza di tipo tradizionale, questa unità consentiva di ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> del 45% e di ottenere risparmi nei consumi di combustibile intorno al 30%.

### Unità SOFC 1 kW

Potenza elettrica	1 kW (4 stack da 50 celle)
Combustibile	Gas di città
Efficienza elettrica	44.1 %
Efficienza termica	34%
Dimensioni	70 cm x 48 cm x 98 cm

Seratoio acqua calda	100 L
Dimensioni	65 cm x 40 cm x 145 cm



Unità da 1 kW per cogenerazione Kyocera/Osaka Gas



### Modulo SOFC 700 W (2007)

Potenza elettrica	700 W <sub>e</sub> (126 celle)
Potenza termica	470 W <sub>t</sub>
Combustibile	gas di città
Efficienza elettrica	45 %
Efficienza termica	> 30%
Dimensioni	54 cm x 30 cm x 95 cm
Peso	91,5 kg



Celle Kyocera (a sinistra la nuova struttura)

Ad inizio anno è stata presentata un'unità cogenerativa da 700 W, più compatta e quindi più facilmente collocabile in piccoli appartamenti. Nel nuovo sistema vengono utilizzate celle dello stesso tipo di quelle usate nei precedenti prototipi (celle tubolari piatte), ma di spessore minore e con un maggior numero di canali realizzati nell'anodo, che tra l'altro funge da supporto per gli altri componenti di cella.

Il sistema da 700 W costituisce il prototipo dell'unità che le due aziende prevedono di introdurre nel mercato entro il 2008, a costi di 500.000-600.000 ¥ (3.000-3.700 €).

### Mesoscopic Devices LLC

Mesoscopic Devices (Broomfield, CO, USA) ha realizzato sistemi portatili di potenza nell'intervallo 20-250 W per usi militari e commerciali. La società, che sviluppa prototipi sia con celle ad ossidi solidi che a metanolo diretto, è stata recentemente acquisita (marzo 2007) dalla Protonex Technology Corporation, che in questo modo ha inteso espandere i suoi interessi, focalizzati principalmente su celle ad elettrolita polimerico, ad altre tecnologie di cella.

Con celle ad ossidi solidi, Mesoscopic è impegnata nello sviluppo di sistemi stand-alone di potenza inferiore a 500 W, che usano diversi combustibili. Per applicazioni militari sono allo studio le unità MesoGen-75 e il MesoGen-250. La prima è un'unità, che eroga 75 W e può essere alimentata con propano o cherosene a basso contenuto di zolfo, progettata con finanziamenti dal Defense Advanced Research Projects Agency,

Il MesoGen-250 è invece sviluppato per la Marina degli Stati Uniti. Il sistema produce 250 W e può essere usato come unità da campo per la ricarica di batterie. Derivati di questo generatore dovrebbero trovare impiego come sistemi APU su veicoli militari o civili e come generatori di emergenza.

Mesoscopic Devices è inoltre impegnata nello sviluppo di un sistema portatile, il MesoGen Orion, che utilizza celle microtubolari della giapponese Toto.



MesoGen Orion 250 W

Prototipi Mesoscopic Devices - Specifiche di progetto

	MesoGen-75	MesoGen-250
Potenza netta, W	75	250
Potenza di picco, W	150 <sup>2</sup>	-
Voltaggio nominale, V	12	25
Corrente nominale, A	6,25	11
Densità di energia, Wh/kg	1037 (72 ore di uso) 1801 (240 ore di uso)	2280 (120 ore d'uso)
Combustibile	Propano o JP-8 esente da S	
Energia specifica, Wh/kg combustibile	3160 (2,3 L di combustibile per 3 gg)	3880 (10,6 L di cherosene per 5 gg)
Peso generatore, kg	3,0	4,3
Peso con combustibile per 3 giorni, kg	5,2	13,2
Dimensioni, mm	127 x 178 x 254	152 x 254 x 305
Volume, L	5,2	12
Tempo di startup, min	< 15	< 15 (al 50% della potenza)
Temperatura di esercizio	da -20 a 60 °C	da -20 a 60 °C

(1) batteria interna fornisce fino a 3,3 Wh di energia  
(2) batteria interna fornisce fino a 10 Wh di energia

### Mitsubishi Heavy Industries

Mitsubishi Heavy Industries (MHI, Tokyo J) ha avviato le attività nel settore delle celle ad ossidi solidi nel 1984 ed all'interno di progetti finanziati dalla New Energy and Industrial Energy Organization (NEDO), sta realizzando prototipi con celle ad ossidi solidi sia in configurazione tubolare, che planare (celle MOLB, Mono-block layer Built).

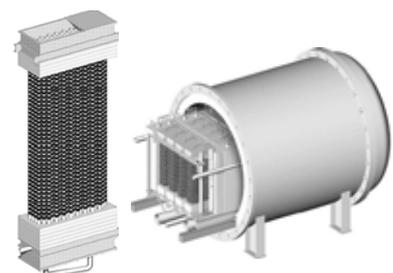
MHI, in collaborazione con la **Electric Power Development Company** (nota come J-Power), è impegnata dal 1998 nello sviluppo di moduli SOFC pressurizzati, con celle tubolari. Le due società, all'interno di un progetto NEDO avviato nel 2004, stanno lavorando allo ad un sistema a ciclo combinato SOFC-MTG ad alta efficienza.



Modulo SOFC classe-40 kW

MHI ha già realizzato e dimostrato un modulo SOFC pressurizzato da 40 kW, dal quale ha ottenuto una potenza elettrica di 35,6 kW ed eseguito test su un sistema ibrido da 75 kW presso la Shipyard & Machinery Works a Nagasaki. Ad ottobre 2006 è stato avviato lo sviluppo di un sistema integrato di potenza 200 kW, dal quale ci si attende un'efficienza del 50%.

J-Power, in collaborazione con MHI, ha in corso la realizzazione di un sistema a pressione atmosferica di potenza 150 kW, costituito da sei moduli da 25 kW (2.500 celle tubolari; lunghezza cella 150 cm, diametro 0,28 cm). Obiettivo a lungo termine della J-Power è quello di realizzare impianti SOFC integrati con sistemi di gassificazione del carbone.



Struttura del modulo SOFC pressurizzato



Layout impianto SOFC-MTG da 200 kW (Mitsubishi Heavy Industries)

Per quanto attiene le SOFC planari, MHI ha realizzato la prima unità, che utilizzava celle tipo MOLB, nel 1996 nell'ambito di una collaborazione con la **Chubu Electric Power Company**. Si trattava di un sistema di potenza 5 kW, costituito da due stack, che presentava una densità di energia di 0,23 W/cm<sup>2</sup>. La tecnologia era stata in seguito migliorata e nel 2001 era stato presentato un sistema da 15 kW, con riforma interna del combustibile (gas di città), che era stato esercito per circa 7.500 ore.

Successivamente, sempre in collaborazione con la Chubu, è stato avviato lo sviluppo di sistemi di cogenerazione di potenza 50 kW. Due unità di questo tipo sono state dimostrate all'Esposizione Universale di Aichi. Una di queste unità, che forniva una potenza di 30 kW, è rimasta in funzione per circa 4.000 ore producendo 100.000 kWh.

MHI, all'interno di un altro progetto NEDO, è in corso lo sviluppo di sistemi per cogenerazione di classe-200 kW. Per rendere più compatto il sistema MHI sta mettendo a punto celle MOLB di dimensioni maggiori (attualmente usa celle 200 mm x 200 mm), in grado di fornire una potenza più alta.



Sistema MHI presso l'Electric Power Pavilion dell'Expo di Aichi

### Mitsubishi Materials Corporation / Kansai Electric Power Co.

Mitsubishi Materials Corporation (Tokyo, J) e Kansai Electric Power Company, (KEPCO, Osaka, J) sviluppano SOFC che operano a temperatura intermedia (600-800 °C), ed hanno in corso la sperimentazione di sistemi CHP da 1 kW e 10 kW, che impiegano celle planari a disco.

Sistema CHP da 1 kW (4 <sup>a</sup> gener.)	
Potenza	1.143 W
Combustibile	gas naturale
Corrente	31.9 A (DC)
Tensione	35.9 V
Efficienza elettrica	54 % (HHV)
Temperatura	760 °C
<i>Cella</i>	
Densità di potenza	0,22 W/cm <sup>2</sup>
Voltaggio medio	0,78 V



Unità CHP da 1 kW (3<sup>a</sup> generazione, 2004)

Nel 2005 è stato presentato un sistema da 1 kW di 4<sup>a</sup> generazione per il quale si dichiara un'efficienza del 54%. Il sistema integra uno stack da 46 celle, progettato in modo da rendere il modulo più compatto e da ottenere una migliore distribuzione del calore al suo interno. Lo stack, a differenza dei precedenti, adotta manifold interno per la distribuzione dei gas e piatti separatori metallici non più di forma circolare.



Stack impiegati nei moduli di 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> generazione

#### Materiali dei componenti di cella

Catodo	Sm <sub>0,5</sub> Sr <sub>0,5</sub> CoO <sub>3-δ</sub>	30 - 50µm
Elettrolita	La <sub>0,8</sub> Sr <sub>0,2</sub> Ga <sub>0,8</sub> Mg <sub>0,15</sub> Co <sub>0,05</sub> O <sub>3-δ</sub>	200 µm
Anodo	Ni-(Ce <sub>0,8</sub> Sm <sub>0,2</sub> O <sub>2-δ</sub> )	30 - 50µm

Un sistema da 1 kW, realizzato nel 2004, sottoposto a prove di durata, dopo 2.000 ore di esercizio, aveva dimostrato una degradazione di prestazioni dello 0,5%/1.000 h. Prove di durata in monocella, dopo 10.000 ore mostrano decadimenti del 1-2 %/1.000 h.

Alla fine del 2006, con finanziamenti

da parte del NEDO, è stato realizzato un sistema da 10 kW per cogenerazione, che in prova presso la KEPCO sta fornendo buone prestazioni.

In parallelo alla dimostrazione di sistemi completi, stanno comunque proseguendo una serie di azioni finalizzate a migliorare prestazioni dei materiali e durata dello stack

Sistema CHP 10 kW	Obiettivi	Risultati
Combustibile	Gas di città	
Potenza	10 kW	10,1 kW
Efficienza elettrica AC	40 %HHV	41 %HHV
Efficienza totale	80 %HHV	82 %HHV
Temperatura max	800°C	776 °C
Decadimento prestazioni	0,25%/1000h	Da confermare



### NanoDynamics Inc.

NanoDynamics (Buffalo, NY, USA), industria leader nel settore delle nanotecnologie, sviluppa microcelle ad ossidi solidi in configurazione tubolare.

Nel 2004, con finanziamenti dell'U.S. Army, la società ha realizzato un sistema, il Revolution™ 50, (50 W, 12 V DC) alimentato a propano, adatto per diversi usi (unità portatili per soldati, sistema per la ricarica di batterie). Il prototipo, controllato da un microprocessore, presenta tempi di start-up dell'ordine di 15 min.

È stato quindi mostrato un secondo prototipo portatile da 50 W, l'NDRevolution™ 50H, che può essere alimentato con propano o butano, adatto ad usi sia civili che militari ed è attualmente in corso la progettazione di unità da 250 W.



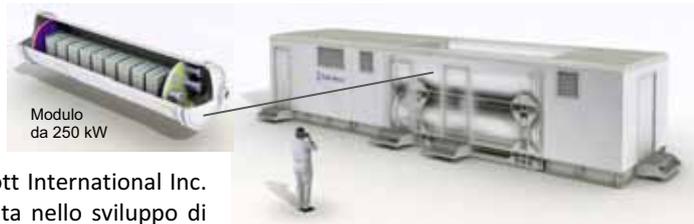
NDRevolution™ 50H - NanoDynamics

## Rolls Royce Fuel Cells Systems

La Rolls Royce Fuel Cell Systems (Derby, UK), coinvolta nello sviluppo di SOFC dal 1992, ha in programma la realizzazione di sistemi per generazione distribuita. La società, che sta lavorando allo sviluppo di un sistema ibrido SOFC/microturbina di potenza multi-MW, ha avviato nel 2006 la sperimentazione di un'unità 60 kW ed a breve sono previste le prove su un modulo da 250 kW.

In Italia, nel 2004 Rolls-Royce ha costituito presso l'Università di Genova un University Technology Centre, il primo centro italiano finanziato da un'industria straniera, dove sono in corso ricerche nel settore delle SOFC.

Nel 2007 il gruppo Rolls-Royce ha acquisito dalla McDermott International Inc. la SOFCo-EFS Holdings, LLC, società statunitense impegnata nello sviluppo di SOFC e di sistemi di trattamento del combustibile. La SOFCo nel programma SECA collaborava con la Cummins Power Generation.



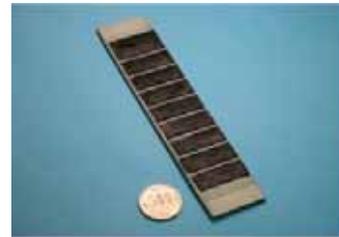
Layout sistema SOFC per impianto ibrido multi-MW (Rolls Royce)

## Tokyo Gas

Tokyo Gas (Tokyo, J), in collaborazione con **Kyocera** ed altri partner (**Rinnai Corporation** e **Gaster Co.**) è impegnata nello sviluppo di un sistema da 5 kW per usi residenziali.

Nel 2006 il gruppo ha presentato un prototipo di potenza 2,5 kW che opera a 750 °C e pressione atmosferica, per il quale dichiara una efficienza elettrica del 56% (LHV).

Nel sistema vengono impiegate celle tubolare piane di tipo segmentato (definite "cells-stack") ottenute sinterizzando le singole celle su un substrato ceramico tubolare piano. Le celle sono connesse in serie e disposte sui due lati del tubo di supporto come mostrato in figura. Ogni singolo elemento, costituito da 16-20 celle poste in serie, genera una potenza di circa 10 We.



Cella tubolari piane (10 We)



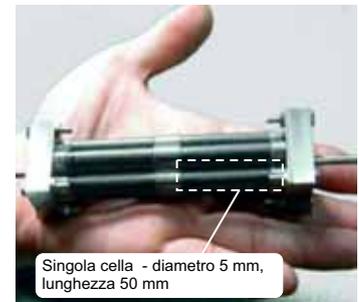
Unità SOFC 2,5 kW (Tokyo Gas / Kyocera)

## TOTO Ltd

La TOTO (Kanagawa, J) conduce attività di ricerca e sviluppo nel settore delle SOFC dal 1990 e ha messo a punto moduli di potenza compresa nell'intervallo tra 3 e 10 kW.

Moduli, realizzati con celle di tipo tubolare e alimentati con gas di città, hanno fatto registrare un'efficienza elettrica intorno al 50% (LHV). In monocella sono state dimostrate oltre 10.000 ore di funzionamento in continuo e su un modulo da 1 kW, sottoposto a prove di durata fino a 5.000 ore, è stata osservata una degradazione di prestazioni del 1,3%/1000 ore.

Con finanziamenti NEDO la società sta lavorando allo sviluppo di celle micro tubolari per sistemi portatili di piccola taglia (da qualche centinaio di watt ad 1 kW). Grazie all'utilizzo di nuovi materiali ceramici impiegati per la fabbricazione dell'elettrolita, queste celle sono in grado di operare a temperature intorno ai 500 °C. La bassa temperatura consente di ridurre lo spessore dell'isolamento termico portando ad un sistema più compatto e ad una riduzione dei costi e permette inoltre di ridurre il tempo di avvio della cella a circa 5 minuti.



Singola cella - diametro 5 mm, lunghezza 50 mm

SOFC micro tubolari TOTO

## Versa Power Systems

Versa Power Systems (sedi a Littleton in Colorado, USA ed a Calgary, Canada) è stata costituita nel 2001 ed è una joint venture tra Gas Technology Institute, Electric Power Research Institute, Materials and Systems Research, Università di Utah e FuelCell Energy. Quest'ultima ha trasferito alla VersaPower le sue attività sulle SOFC (tecnologia che aveva acquisito a sua volta dalla Global Thermoelectric).



Sistema FCE / VPS Risultati 1ª Fase SECA	
Potenza, kW	3,13
Efficienza netta (DC), %	36,4
Decadimento prestazioni	1,2 %/500 ore
Disponibilità, %	98,6%
Costo, \$/kW	776

Versa Power Systems, nel Programma SECA, sta collaborando sia con FuelCell Energy, che con la Cummins Power Generation.

Nella 1ª fase del programma, FCE e Versa Power hanno realizzato un sistema per usi stazionari da 3 kW a gas naturale, in cui sono integrati quattro stack, realizzati con celle di tipo



Stack SOFC VPS  
Potenza : 1,152 kW  
(28 celle, area attiva 121 cm<sup>2</sup>)

planare. Il prototipo validato, sia in fabbrica che presso NETL, nel corso delle 3.800 ore di esercizio ha dimostrato prestazioni in linea con quelle richieste dal programma.

La collaborazione con la Cummins Power Generation, avviata nel 2006, è invece finalizzata allo sviluppo di sistemi da utilizzare come unità di potenza ausiliaria nel trasporto.

Sistema Cummins/ VPS 1ª Fase SECA	Obiettivo	Risultati
<b>Potenza, kW</b>	3-10	3,2
<b>Efficienza netta (DC), %</b>	25	37
<b>Decadimento prestazioni</b>	2 %/500 ore	1,7 %/500 ore
<b>Disponibilità, %</b>	> 80	99
<b>Costo, \$/kW</b>	800	742

### Wärtsilä Corporation

Wärtsilä Corporation (Helsinki, FIN) dal 2000 sviluppa sistemi SOFC per usi nella generazione di potenza distribuita e per applicazioni navali. I sistemi sono realizzati con stack (tecnologia planare) sviluppati all'interno di un consorzio costituito da Topsøe Fuel Cell A/S (Lynby, DK) e Risø National Laboratory (Roskilde, DK).

Le attività attualmente sono incentrate alla realizzazione di un prototipo da 20 kW (WFC20) ed è prevista la sperimentazione di unità da 50 kW entro il 2008. La strategia della società è quella di disporre di prodotti commerciali di potenza 50-250 kW entro il 2010-2015.



**Unità da 250 kW (conceptual design)**  
Combustibile: gas naturale, metanolo, biogas  
Efficienza elettrica attesa: ~ 50 %

Il prototipo WFC20, che ha potenza elettrica nominale di 20 kW e termica di 13,8 kW, presenta un'efficienza intorno al 42%. Il prototipo, alimentato a gas naturale, è progettato per essere usato sia come sistema CHP, che come unità di potenza ausiliaria a bordo di imbarcazioni.



**WFC20 da 20 kW**  
(Prototipo-α 2006 - 24 stack)

Nel quadro dei programmi dell'Unione Europea, Wärtsilä sta partecipando ai progetti Large-SOFC (2007-2009) finalizzato allo sviluppo di sistemi ibridi per generazione di potenza stazionaria di grandi dimensioni e METHAPU (2007-2009) nel quale è in corso uno studio di fattibilità relativo ad unità di potenza ausiliaria basate su SOFC, alimentate a metanolo, per impieghi a bordo di navi commerciali. Nel progetto METHAPU, è previsto che un sistema WPF20, una volta sperimentato in scala laboratorio e dopo aver superate le prove di accettazione, venga installato su un traghetto della Wallenius Marine.

### Ztek Corporation

La Ztek (Woburn, MA, USA), società che da oltre 20 anni conduce attività nell'area delle celle ad ossidi solidi, sta sviluppando due diverse classi di prodotti: sistemi ibridi SOFC/turbina e sistemi che consentono di produrre contemporaneamente elettricità ed idrogeno (HECP, Hydrogen and Electricity Co-Production).

Ztek ha realizzato un modulo da 1 kW che ha operato ininterrottamente per circa 16.000 ore, in un secondo tempo ha sviluppato un impianto da 25 kW multistack, in cui è integrato uno steam reformer ad alte prestazioni, che è in fase di sperimentazione.

La società sta lavorando allo sviluppo di un sistema ibrido, il DG200, che integra una cella ad ossidi solidi da 150 kW con una microturbina a gas da 50 kW, per il mercato della generazione di potenza distribuita. Dal sistema, che può essere alimentato a gas naturale, metanolo o benzina, ci si attende un'efficienza totale del 60%.



**Sistema SOFC da 25 kW (Ztek)**

In parallelo Ztek, in collaborazione con la Pacific Gas & Electric sta realizzando un'unità HECP, per una delle stazioni di rifornimento di idrogeno che si stanno costruendo nel quadro delle iniziative della California Fuel Cell Partnership.

Fra i soggetti coinvolti in attività di ricerca e sviluppo sulle celle ad ossidi solidi ricordiamo inoltre **CEA** (French Atomic Energy Commission, F), **Ceres Power** (D), **ECN** (Energy Centrum Netherlands NL), **Forschungszentrum Jülich** (D), **Risø National Laboratory** (DK), **Staxera** (D), **Cambridge University** (UK), **Keele University** (UK)

## LE ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO IN ITALIA

In Italia attività di ricerca e sviluppo di materiali, componenti e stack di piccola potenza sono condotte da strutture di ricerca pubbliche e private ed istituti universitari, la sperimentazione di impianti completi è invece svolta principalmente dalla società TurboCare, a Torino.

### TurboCare / Politecnico di Torino

La TurboCare (in precedenza Gas Turbine Technologies, Torino), società controllata dal gruppo Siemens, e il Politecnico di Torino, in collaborazione con HySyLab e con il contributo finanziario della Regione Piemonte, hanno avviato il progetto EOS (Energia da Ossidi Solidi, 2004-2009), che prevede l'installazione ed esercizio di impianti per cogenerazione basati su celle ad ossidi solidi al fine di verificarne prestazioni ed affidabilità in ambienti industriali reali.



Unità CHP100 nella sala prova della TurboCare

Nella prima fase del progetto (2004-2007) nello stabilimento della TurboCare, è stata installata un'unità SOFC CHP100, fornita da Siemens, in grado di produrre 104 kW elettrici e 65 kW termici. Questo sistema in precedenza aveva operato in Olanda e Germania.

Nel periodo a luglio 2005-giugno 2007, l'impianto ha accumulato circa 16.410 ore di funzionamento, producendo 1.663.000 kWh e dimostrando un'efficienza totale del 68,8% ed una disponibilità superiore al 99%. L'energia prodotta dal sistema, durante le normali settimane lavorative, è utilizzata all'interno dell'azienda, nei week-end parte della potenza prodotta è immessa nella rete pubblica.

Nella seconda fase del programma EOS, la potenza del sistema SOFC installato sarà aumentata grazie ad una seconda unità da 125 kW elettrici e 115 kW termici (SFC200A Siemens). Questo sistema entrerà in esercizio nella seconda metà del

2008 e sarà provato fino alla fine del progetto. Il sistema SOFC fornirà circa la metà della potenza elettrica consumata dallo stabilimento, mentre l'energia termica sarà impiegata per il riscaldamento ed il condizionamento degli uffici della TurboCare.

Nel Progetto EBE (Energia a Basse Emissioni), TurboCare e Politecnico di Torino è stata sperimentata un'unità SFC5 Siemens alimentata a gas naturale. Il sistema installato nella mensa aziendale, a dicembre 2007 aveva funzionato per circa 7.825 ore, generando 30.922 kWh di energia elettrica. L'energia termica era stata usata per produrre acqua calda per usi sanitari o per riscaldamento.

#### Unità SFC5 Siemens (TurboCare, Torino)

Potenza elettrica: 3,5 kW AC  
Potenza termica: 3 kW  
Combustibile: gas naturale  
Efficienza elettrica: ~ 40 %  
Efficienza totale: > 75%



### SOFCpower

SOFCpower (Trento), società costituita all'interno del gruppo Eurocoating-Turbocoating, da alcuni anni svolge attività nel settore delle celle ad ossidi solidi.

A maggio 2007, SOFCpower ha acquisito la società svizzera HTceramix (Yverdon, CH). Obiettivo del nuovo gruppo è quella di produrre ed industrializzare l'HoTbox™, un generatore sviluppato da HTceramics, usando la tecnologia messa a punto dal Swiss Federal Institute of Technology (EPFL) di Losanna.

Nell'HoTbox™ i componenti che operano ad alta temperatura sono inseriti in un unico modulo, il che rende il sistema facilmente integrabile in sistemi completi sviluppati anche da altre società.

Nel quadro dei programmi europei, SOFCpower/HTceramix è coinvolta nei progetti Real-SOFC, SOFC600 e Flame SOFC.



#### Sistema HoTbox™

Potenza stack: 500 W  
Temperatura operativa: : 750°C  
Dimensioni: 220 x 220 x 320 mm  
Peso: 17.5 kW

### CNR - Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia "Nicola Giordano"

Il CNR-ITAE (Messina) svolge attività di ricerca su sistemi SOFC all'interno del Progetto FISR "Sviluppo di materiali innovativi e dimostrazione di sistemi basati su celle a combustibile per usi stazionari", che come abbiamo accennato in una precedente sezione, comprende attività anche sulle celle ad elettrolita polimerico.

In quest'ambito l'ITAE in collaborazione con strutture industriali e di ricerca (Enitecnologie, Enel, CNR-IENI, INSTM) sta lavorando alla messa a punto di materiali e componenti per SOFC in grado di operare a temperature intermedie (350-750°C) ed in parallelo alla dimostrazione e sperimentazione di stack e sistemi da 1-5 kW alimentati a gas naturale.

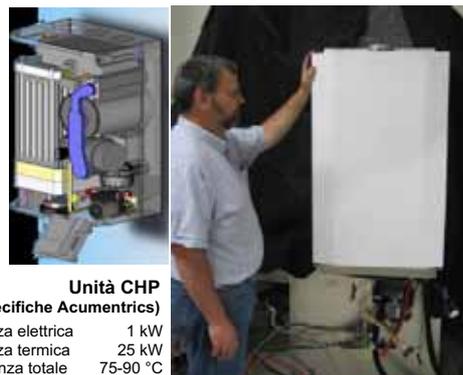
## Merloni Termosanitari /Elco

Merloni Termosanitari (MTS Group), leader europeo nel mercato del riscaldamento, in collaborazione con Acumentrics Corporation, società specializzata nello sviluppo di celle ad ossidi solidi, sta mettendo a punto un sistema CHP per usi domestici installabile a parete.

L'unità, progettata per rispondere alle esigenze di energia elettrica e termica di una casa europea di medie dimensioni, utilizza gas naturale e combina una cella da 1 kW<sub>e</sub> con una caldaia a condensazione da 24 kW<sub>t</sub>. I componenti del generatore sono progettati per essere prodotti a un costo per kW che risponde alle aspettative dell'utenza.

Ad ottobre 2007 l'unità è stata presentata, presso la sede ELCO (società del gruppo MTS) di Hechingen in Germania, a potenziali partner del settore della distribuzione energetica, tra cui British Gas, EnBW, EON, EWE, RWE, Edison, Endesa, Eifer Institute (EdF), GasTerra e Kiwa Gas Technology.

Sistemi di questo tipo nel corso del 2008 saranno sottoposti a prove in condizioni reali presso l'Università Politecnica delle Marche (Ancona).



**Unità CHP**  
(Specifiche Acumentrics)

Potenza elettrica	1 kW
Potenza termica	25 kW
Efficienza totale	75-90 °C

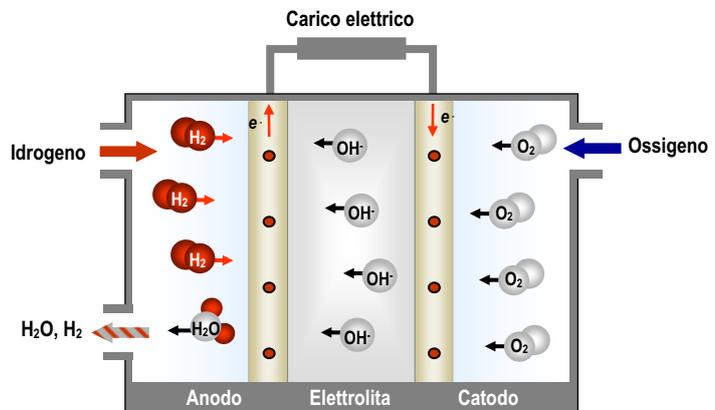
Le celle alcaline (AFC, Alkaline Fuel Cell) operano a bassa temperatura, normalmente fra 70 e 120 °C ed impiegano come elettrolita una soluzione acquosa di idrossido di potassio, fatto circolare attraverso la cella o contenuto in una matrice di asbesto.

Nei confronti di altri tipi di celle che operano a bassa temperatura, le celle alcaline presentano una serie di vantaggi:

- rendimenti elettrici che possono raggiungere il 65%;
- costi non elevati dei componenti costituenti la cella;
- tempi di vita lunghi (dimostrate 10.000-15.000 ore), dovuti alla buona compatibilità dei materiali di cella.

La principale limitazione delle AFC è la bassa tolleranza alle impurezze presenti nei gas reagenti; gli ioni OH<sup>-</sup> reagiscono con i composti del carbonio, anche se presenti in tracce, rendendo problematico l'uso di gas di sintesi ottenuti con processi di reforming e della stessa aria, che normalmente presenta un contenuto di CO<sub>2</sub> superiore a 300 ppm. Questo rende necessario operare con gas di estrema purezza o in alternativa impiegare complicati e costosi sistemi di purificazione, che rendono non economico l'uso di questo tipo di celle per impianti di generazione di potenza stazionaria.

Pur avendo raggiunto un buon grado di maturità tecnologica, le attività in questo settore rimangono molto limitate. In passato le ricerche sono state essenzialmente orientate allo sviluppo di sistemi per usi militari o per impieghi nella trazione. Ricordiamo che la tecnologia è stata usata con successo in molte missioni spaziali della NASA (Apollo e Shuttle) fin dagli anni '60.



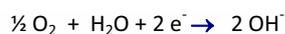
## REAZIONI ELETTROCHIMICHE

Le reazioni che avvengono in una cella alcalina sono:

Reazione anodica



Reazione catodica



L'acqua si forma all'anodo, dove viene espulsa, assieme all'idrogeno residuo.

La cella richiede gas di alimentazione estremamente puri (99,99%). Non sono tollerati composti del carbonio (CO, CO<sub>2</sub>) che interagiscono con l'elettrolita.



Taxi ibrido ZeTek (1999)

Attività di ricerca e sviluppo sulle AFC sono state condotte da gruppi industriali, come la UTC Power e Siemens, e da società oggi non più attive come la Allis-Chalmers Manufacturing Company, Elenco o la Zetek Power. Quest'ultima utilizzando la tecnologia acquisita dalla società belga Elenco, uno dei primi produttori di celle, aveva messo a punto veicoli di diversa tipologia. Nel 1999, in collaborazione con la London Taxi International, era stato realizzato un prototipo di taxi ibrido sul quale era montato uno stack da 5 kW e successivamente era stato costruito per il Westminster City Council un van ibrido (cella di potenza 5 kW) alimentato ad idrogeno da usare per il servizio di manutenzione dei parchi e delle aree verdi del centro di Londra.

Negli ultimi anni attività di sviluppo di celle alcaline sono svolte presso Astris Energy, Apollo Energy Systems, l'istituto belga VITO e in piccole società che sviluppano sistemi per mercati di nicchia.

La società canadese **Astris Energi** (Mississauga, Ontario), che si è costituita nel 1983, sviluppa stack (POWERSTACK™ MC250) di potenza fino a 10 kW, per i quali dichiara efficienze maggiori del 57%, adatti per applicazioni nel trasporto (golf car, fork lift) e nella generazione portatile.

MATERIALI DEI COMPONENTI DI CELLA	
Elettrodi	Nichel, argento, metalli nobili (platino/palladio)
Elettrolita	Soluzione di idrossido di potassio al 30-45% (circolante nella cella o su matrice di asbesto)
Materiali di costruzione	Grafite, materie plastiche



#### Generatore portatile Modello E8

Potenza	2,4 kW
	2 stack MC2500 da 1.2 kW
Corrente	50 A (nominale)
Efficienza	< 50 %
Tempo di avvio	<3 min
Combustibile	Idrogeno (consumo 1,6 Nm <sup>3</sup> /h)
Durata	2.000 ore
Scrubber CO <sub>2</sub>	interno
Dimensioni	72 x 61 x 61 cm
Peso	125 kg

derivata, raggiungeva una velocità di 30 km/h.

La **Apollo Energy Systems** (Pompano Beach, Florida, USA), utilizzando la tecnologia sviluppata per le missioni Apollo, sta mettendo a punto un sistema ibrido cella/batteria per usi residenziali o utilizzabile come sistema di propulsione di veicoli. In questo caso la cella viene usata per la ricarica della batteria (piombo-cobalto).

In Europa attività di sviluppo sulle celle alcaline sono oggi in corso presso la **AFC Energy** (Cranleigh, UK), che nel 2006 aveva acquisito la tecnologia dalla Eneco, ed alla **Hydrocell OY** (Minkkikatu, FIN). Quest'ultima, costituita nel 1993, sta sviluppando sistemi di potenza fino a 5 kW ed unità portatili utilizzabili su imbarcazioni o veicoli a due ruote (biciclette e scooter). In parallelo, per l'alimentazione di queste unità si stanno mettendo a punto sistemi di accumulo di idrogeno in idruri metallici.



Sistema CHP 6 kW (4 stack AFC) - VITO / Intensys

La Astris attualmente dispone di due prodotti: un generatore portatile da 2,4 kW (Modello E8) e un'auto per campi da golf (Freedom II).

Quest'ultima è equipaggiata con un modulo da 1,8 kW a idrogeno. La vettura, che ha un peso di 345 kg, circa il 20% in meno del veicolo elettrico dal quale è stata



#### Freedom II (2004)

Potenza	1.8 kW (generatore E7, 2 stack da 900 W)
Combustibile	Idrogeno (serbatoio in fibra di carbonio da 33 litri)
Autonomia	3 giorni di uso

In Belgio, la collaborazione tra l'Istituto **VITO** (Mol, B) e la **Intensys** (Arendonk, B), che sviluppa stack basati sulla tecnologia messa a punto da Elenco tra il 1985 ed il 1994, ha portato alla realizzazione di un sistema CHP di potenza 6 kW.

## CELLE A METANOLO DIRETTO

Le celle a combustibile a metanolo diretto (DMFC, Direct Methanol Fuel Cell), operano a temperature comprese tra 70 e 100 °C e sono alimentate direttamente con metanolo, il quale viene ossidato elettrochimicamente all'anodo.

La possibilità di utilizzare il combustibile direttamente in cella rende le DMFC particolarmente adatte per lo sviluppo di generatori portatili. E' infatti possibile realizzare sistemi semplici e compatti in quanto viene eliminato lo stadio di riforma esterna del combustibile; inoltre la miscela metanolo/acqua può essere usata, oltre che come combustibile, come refrigerante liquido per lo stack. Da non trascurare il fatto che l'accumulo del metanolo è senz'altro più semplice di quello dell'idrogeno.

Le celle a metanolo diretto mostrano una configurazione molto simile a quella delle celle ad elettrolita polimerico, dal momento che entrambe fanno uso di elettrodi porosi con catalizzatore a base di platino o sue leghe e di una membrana polimerica come elettrolita.

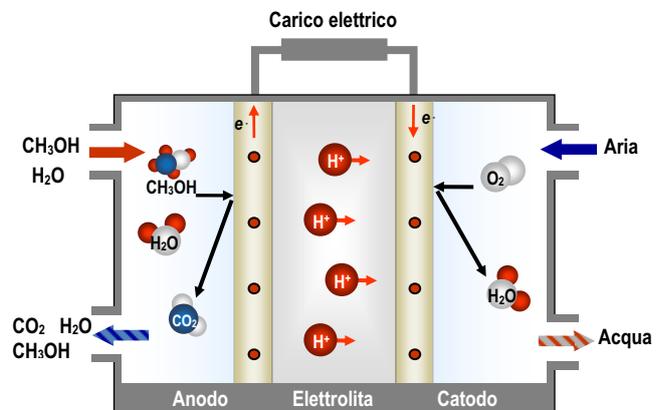
Le attuali celle fanno registrare un'efficienza elettrica dell'ordine del 35% ed una densità di potenza ancora bassa (200-400 mW/cm<sup>2</sup>, valori inferiori a quelli delle PEFC, pur operando con carichi di catalizzatore un ordine di grandezza superiori). Efficienze prossime ai valori teorici (45%) potrebbero tuttavia essere ottenute operando a temperature maggiori, mentre un miglioramento della cinetica dell'ossidazione del metanolo ed un'ottimizzazione degli elettrodi potrebbe portare ad un aumento delle prestazioni di cella.

La tecnologia DMFC è ancora allo stadio di ricerca di laboratorio e per una sua applicazione pratica restano da risolvere una serie di problemi. Questi sono essenzialmente legati ad una reattività elettrochimica del metanolo non abbastanza elevata, che limita la densità di potenza, ed al fatto che si registrano effetti di trasporto del combustibile attraverso la membrana (crossover) che provocano una degradazione delle prestazioni di cella.

I progressi compiuti negli ultimi anni ed il crescente interesse per sistemi di piccola potenza per applicazioni portatili e per l'elettronica di consumo, hanno fatto crescere in modo significativo le attività di ricerca e sviluppo sulle DMFC. La maggior parte di queste sono orientate:

- allo sviluppo di nuove membrane in grado di funzionare a temperature più elevate delle attuali (100 °C) al fine di favorire la cinetica di ossidazione elettrochimica del metanolo. Le attuali membrane presentano infatti problemi di disidratazione a temperature superiori a 100 °C, con conseguente aumento della resistenza specifica e dei valori di "crossover";
- allo sviluppo di nuovi catalizzatori per l'ossidazione elettrochimica del metanolo;
- all'ottimizzazione dei componenti elettrodici e dell'assemblato membrana/elettrodi.

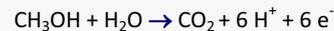
Le prestazioni dei prototipi finora realizzati, se pur interessanti, sono comunque ancora lontane da quelle richieste a sistemi a celle a combustibile per generazione portatile e per l'elettronica di consumo.



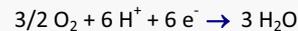
### REAZIONI ELETTROCHIMICHE

Le reazioni che avvengono in una cella a metanolo diretto sono:

Reazione anodica



Reazione catodica



Metanolo ed acqua reagiscono nella camera anodica della cella per produrre anidride carbonica e ioni idrogeno, questi ultimi diffondono quindi nel comparto catodico dove reagiscono con l'ossigeno per produrre acqua.

L'ossidazione del metanolo su platino è più complessa di quella dell'idrogeno e può comportare la formazione di composti intermedi, come ad esempio l'ossido di carbonio, che possono determinare avvelenamento del catalizzatore e quindi decadimento delle prestazioni di cella. Una maggiore tolleranza al CO è stata dimostrata con catalizzatori a base di platino/rutenio.

### MATERIALI DEI COMPONENTI DI CELLA

<b>Membrana</b>	Membrane solfonica perfluorurata
<b>Anodo</b>	Elettrodi di carbone con catalizzatore a base di Pt/Ru (2-4 mg/cm <sup>2</sup> )
<b>Catodo</b>	Elettrodi di carbone con catalizzatore a base di Pt (2-4 mg/cm <sup>2</sup> )
<b>Piatti bipolari</b>	Grafite



Sistemi a celle a combustibile per elettronica di consumo (< 50 W) -  
Obiettivi programmi DoE e Commissione Europea

	Programma DoE Obiettivi al 2010	Implementation Plan UE Obiettivi al 2015
Potenza specifica, W/kg	100	80 - 200
Densità di potenza, W/L	100	50 - 150
Densità di energia, Wh/L	1.000	500 -1.000
Costo, €/W	3	3 - 5
Durata, ore	5.000	1.000 - 5.000

## ATTIVITÀ DI RICERCA, SVILUPPO E DIMOSTRAZIONE

Molte industrie ed organizzazioni di ricerca negli Stati Uniti, Europa e Giappone sono impegnate nello sviluppo di sistemi DMFC per applicazioni portatili, in molti casi si tratta di unità sviluppate nell'ambito di programmi finanziati da organismi governativi o militari.

### Los Alamos National Laboratory

Los Alamos National Laboratory (Los Alamos, NM USA), che dal 1993 sta lavorando per migliorare le prestazioni di celle a metanolo diretto sotto la direzione dell'Office of Energy Efficiency and Renewable Energy del DoE, per la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), nel 2004 ha realizzato un'unità portatile da 20 W per usi militari da impiegare come alternativa ai sistemi di accumulo di energia tradizionali (batterie). L'unità, completa di 2 serbatoi per il metanolo, sufficienti per missioni di durata 72 ore, fornisce 1,6 Wh di energia (peso del sistema integrato 2,95 kg).



Unità portatile DMFC-20 LANL/Ball Aerospace (DARPA Palm Power Programme)

#### Specifiche DMFC-20

Potenza: 20 W  
 Voltaggio DC: 12V  
 Energia specifica per 72 ore di missione: 550 Wh/kg  
 Potenza specifica: 11W/kg  
 Efficienza: 33%  
 Peso: 1.7 kg (2.9 kg per 72 ore di missione)

Le attività di ricerca di base su materiali e componenti di cella e sull'ingegneria di stack hanno portato alla realizzazione di stack che sono stati integrati in sistemi completi costruiti in collaborazione con Ball Aerospace, Mesoscopic Devices e Motorola.

All'interno del Programma DoE, uno stack del LANL da 25 W, costituito da 25 celle, è stato integrato nei prototipi della Mesoscopic Devices.

#### Stack LANL (2005)

Potenza: 25 W  
 Potenza specifica: 230 W/kg  
 No celle: 25  
 Area attiva: 19,6 cm<sup>2</sup>  
 Peso: 250 g



### Mesoscopic Devices

Mesoscopic Devices (Broomfield, CO, USA), entrata recentemente a far parte della Protonex Technology Corporation, ha sviluppato sistemi portatili per usi commerciali e militari. Sono stati presentati prototipi sia con celle a metanolo diretto che ad ossidi solidi ed attualmente le attività sono rivolte alla produzione di generatori di potenza nell'intervallo 20-250 W.

#### MesoPower-20 DMFC

Potenza netta: 20 W  
 Potenza di picco: 40 W\*  
 Voltaggio nominale: 12 V  
 Corrente nominale: 1,67A  
 Densità di energia: 750 Wh/kg (72 ore d'uso)  
 Energia specifica: 1.580 Wh/kg metanolo  
 Peso generatore: 0,86 kg  
 Peso con combustibile per 3 giorni: 1,81 kg  
 Dimensioni: 40 x 120 x 160mm  
 Tempo di startup: < 10 min

(\*) batteria interna fornisce fino a 3,3 Wh di energia

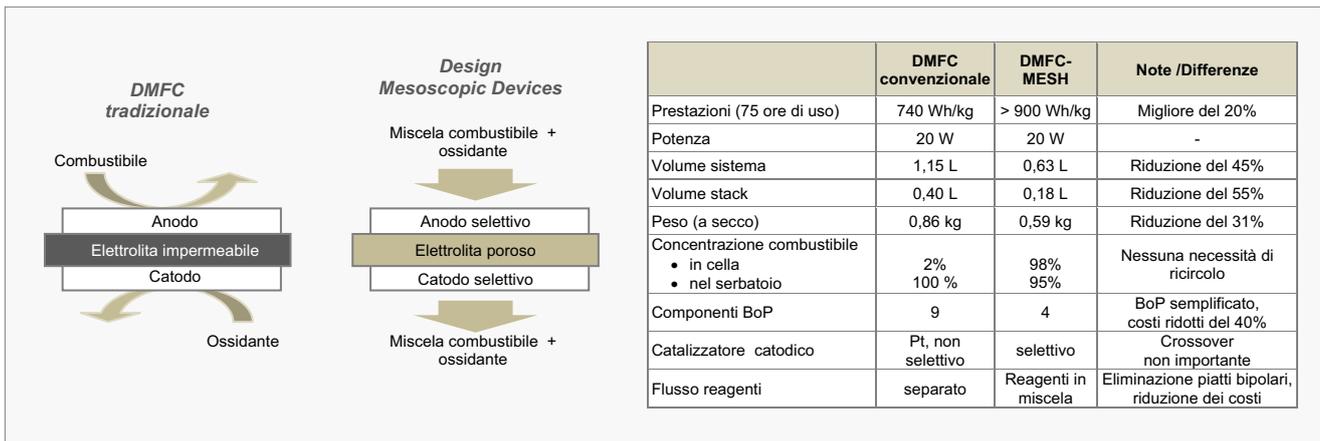


La serie di prodotti MesoPower che utilizza la tecnologia a metanolo diretto e copre un intervallo di potenza da 20 a 100 W, come abbiamo visto, era stata sviluppata per usi

militari e solo in seguito adattata ad applicazioni nell'elettronica di consumo. Il MesoPower-20, la prima unità di questa serie, fornisce 20 W a 12 V ed è alimentata da metanolo contenuto in una cartuccia esterna da 250 ml (o per usi militari in serbatoi ricaricabili).

Il MesoPower-20 è un sistema ibrido, con una batteria interna. Quest'ultima è utilizzata nella fase di start-up e per i picchi di potenza, mentre la cella fornisce la potenza media e quando necessario ricarica la batteria. Per il sistema, a parità di peso, si dichiara una densità di energia fino a cinque superiore a quella ottenibile con batterie primarie o ricaricabili.

La Mesoscopic Devices ha inoltre studiato una nuova configurazione del sistema nota come MESH (MEthanol Single-pass High-utilization) basata sull'impiego di catalizzatori selettivi e di stack in cui, a differenza di quanto avviene nelle DMFC di tipo tradizionale, una miscela metanolo/aria fluisce attraverso ciascun assemblato membrana/elettrodo, si ottengono in questo modo sistemi costituiti da un minor numero di componenti e quindi notevolmente più compatti.



## MTI Micro Fuel Cells

MTI Micro Fuel Cells ("MTI Micro", Albany, NY, USA), sussidiaria della Mechanical Technology Inc., ha sviluppato una tecnologia nota come Mobion<sup>®</sup> basata su DMFC miniaturizzate. La tecnologia utilizza metanolo puro e consente una gestione dell'acqua all'interno della cella più semplice rispetto a quella che si realizza nelle DMFC convenzionali.



**Mobion (prototipo proof-of-concept)**  
Potenza: 1 W  
Dimensioni: 9,4 x15,2 x3,3 cm

Attualmente MTI sta lavorando con Duracell/Gillette e Samsung Electronics Co. allo sviluppo di unità per l'elettronica di consumo.

Lo sviluppo e la dimostrazione della tecnologia Mobion è avvenuta operando all'interno di contratti con le Forze Armate degli Stati Uniti. Nel settembre 2005 cinque prototipi ibridi sono stati consegnati a forze operative speciali per alimentare apparecchiature militari, tra cui sensori remoti e radio teletrasmettenti. Per il Marine Corps System Command sono state avviate attività per valutare la funzionalità di questi sistemi e i requisiti necessari al loro rifornimento.



**Mobion<sup>®</sup> DMFC integrato in un PDA (2004. MTI Micro)**

Il prototipo Mobion 30M, che produce fino a 30 W di potenza (100 W di potenza di picco), con una ricarica di metanolo è potenzialmente in grado di produrre fino a 600 Wh. Sistemi di questo tipo saranno dimostrati dall'Air Force Research Laboratory (AFRL) per l'alimentazione di sistemi di telecomunicazione satellitare portatili. E' stato stimato, che per missioni di 72 ore un'unità Mobion 30M con due serbatoi di metanolo supplementari, è in grado di fornire la stessa potenza di nove batterie militari standard, le BA-5590, riducendo il peso dell'attrezzatura da trasportare alla metà.



**Mobion 30M e cartucce di combustibile**  
Potenza: 30 W  
Dimensioni: 25 x14,5 x8.9 cm

In precedenza con la Harris Corp era stato messo a punto un prototipo adatto a sostituire le batterie standard integrate in sistemi radio in dotazione alle forze armate (Harris Falcon II). Il prototipo, forniva 15 W di potenza continua e 150 W di potenza di picco.

La società, nel quadro del Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Programme del DoE, ha in corso attività finalizzate all'ottimizzazione della tecnologia Mobion per applicazioni portatili (telefoni cellulari, computer, ecc) e alla messa a punto di tecniche di

fabbricazione di serie che le consentano di ottenere prodotti commerciali entro il 2009.



**Mobion® Chip**  
 Densità di potenza: > 50 mW/cm<sup>2</sup>  
 Dimensioni: 9 cm<sup>3</sup>  
 Energia da combustibile: 1.4 Wh/cm<sup>3</sup>  
 Temperatura: 0 - 40 °C

A giugno 2007 è stato presentato il Mobion® Chip, prototipo con una configurazione notevolmente semplificata, in cui il modulo di potenza è integrato con il sistema di condizionamento dei fluidi, facilmente integrabile in sistemi per l'elettronica di consumo.

## Neah Power Systems

Neah Power Systems (Bothell, Washington, USA) sviluppa sistemi con celle a metanolo diretto di potenza 0,5-40 W. La società sta mettendo a punto una tecnologia di cella proprietaria che fa uso di strutture elettrodiche a base di silicone poroso. Sono stati presentati stack con densità di potenza di 80 mW/cm<sup>2</sup> a temperatura ambiente.



Stack Neah Power Systems

## Smart Fuel Cells

Smart Fuel Cells (SFC, Brunthal-Nord, Germania), costituita nel 2000, sviluppa sistemi DMFC per applicazioni industriali, militari e per il tempo libero. Proprio per quest'ultimo tipo di applicazione nel maggio 2006 è stato presentato l'EFOY (*Energy for you*), sistema disponibile in più versioni, progettato per veicoli ricreazionali (caravan, piccole imbarcazioni) e proposto sul mercato come carica batterie.

Nel 2005 Hymer, noto produttore di camper e roulotte, ha integrato un prototipo realizzato in precedenza, l'SFC A50, su uno dei suoi modelli di punta l'Hymer Class-S. Il sistema da 50 W, progettato per la ricarica di batterie da 12 V, era fornito con un serbatoio di metanolo di capacità 5 litri, sufficiente per una-due settimane.



SFC A50

SFC ha in corso una serie di progetti per lo sviluppo di generatori portatili per usi militari. La SFC C20 è un'unità da 20 W realizzata in configurazione ibrida (batterie Li-polimeriche ricaricabili) sviluppata per usi civili ed in un secondo tempo perfezionata per applicazioni in campo militare, nel quadro di una collaborazione con il Dipartimento per lo Sviluppo di Veicoli Militari delle Forze Armate tedesche. L'unità con una ricarica di metanolo (500 mL) genera oltre 440 Wh di energia. Due sistemi SFC C20-MP, funzionanti a diversa temperatura ed alimentati rispettivamente con metanolo puro ed in miscela con acqua, in passato sono stati consegnati al CERDEC per essere sottoposti ad una serie di prove finalizzate a valutarne la rispondenza agli standard militari.



SFC C20 - Smart Fuel Cells

Potenza 20 W  
 Voltaggio 11,1 V  
 Dimensioni 170 x 160 x 85 mm  
 Peso 2 kg (a secco)

All'interno di progetti finanziati da organizzazioni militari statunitensi ed europee, è stato sviluppato un sistema da 20 W (FCPS) e in seguito una versione avanzata da 25 W (Jenny). Questa unità, leggera e poco ingombrante, può essere impiegata per fornire energia a diversi strumenti elettronici in dotazione ai militari (visori notturni, navigatori satellitari palmari, sistemi di trasmissione radio, ecc.) e per la ricarica delle batterie, ma anche per alimentare apparecchiature incustodite in aree remote. Il sistema è stato consegnato ad organismi della difesa di diversi nazioni (Finlandia, Germania, Olanda, Norvegia, Regno Unito, Sud Africa, Svizzera e Svezia) per valutarne le caratteristiche.

Nel 2007 ha ricevuto l'incarico dal US Army OTC (Operational Test Command) di sviluppare un sistema da 250 W. L'unità utilizzerà la tecnologia dell'EFOY e sarà progettato per essere facilmente trasportata.



Unità EFOY	600	900	1200	1600
Potenza nominale, W	25	38	50	65
Capacità di carica, Wh/giorno	600	900	1200	1600
Ah/giorno	50	75	100	130
Tensione nominale, V	12	12	12	12
Corrente nominale, A	2,1	3,1	4,2	5,4
Consumo metanolo, L/kWh	1,1			
Livello rumore, dB	23* / 39**			
Peso, kg	6,3	6,4	7,5	7,6
Dimensioni, cm	43,5 x 20,0 x 27,6			

\* a 7 m distanza \*\* a 1 m distanza

JENNY - Smart Fuel Cells

Potenza: 25 W  
 Voltaggio: 16,8 V  
 Dimensioni: 243 x 154 x 74 mm  
 Peso: 1,3 kg

Cartuccia metanolo: 0.35 L  
 Peso: 0.36 kg



## Toshiba Corporation

Toshiba (Giappone) è tra le società che hanno sviluppato micro celle a metanolo diretto per impieghi in apparecchiature elettroniche come computer portatili, lettori MP3 e telefonia mobile. Nel 2004 Toshiba ha presentato un primo prototipo da 100 mW, che adottava un sistema di rifornimento "passivo" del combustibile (alimentazione diretta in cella adatta per potenze inferiori al watt). In seguito sono state mostrate due unità di potenza 100 e 300 mW.

### Toshiba DMFC

(prototipo 2004)

Potenza: 100 mW  
 Combustibile: metanolo 99,5%  
 Autonomia: 20 ore con 2cm<sup>3</sup> di metanolo  
 Dimensioni: 22 x 56 x 4,5 mm  
 Peso: 8,5 g (inclusa cartuccia di metanolo)



## UltraCell Corporation

UltraCell (Livermore, California, USA), fondata nel 2002, sviluppa dispositivi portatili alimentati a metanolo (RMFC, Reformed Methanol Fuel Cell) di potenza 25 W e 45 W. Questi sistemi, che integrano microcelle a membrana polimerica (tecnologia acquisita da Lawrence Livermore National Laboratories) con un reformer miniaturizzato che genera idrogeno da metanolo ed una batteria, sono in grado di fornire una densità di potenza doppia ed un design più compatto rispetto alle celle a metanolo diretto tradizionali.



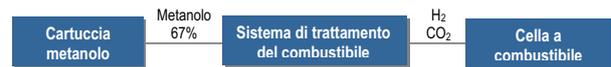
### UltraCell XX25

Potenza: 25 W  
 Combustibile: 67% CH<sub>3</sub>OH / 33% H<sub>2</sub>O  
 Voltaggio stack: 7,2 V (nominale)  
 Voltaggio da DC/DC converter: 6 - 30 V  
 Peso sistema: 1,0 kg  
 Dimensione: 15 x 23 x 4,3 cm (con cartuccia combustibile)  
 Durata: 2000 h  
 Densità di energia (72 h @ 20 W): 490 Wh/kg (3 cartucce di combustibile da 550 ml)  
 Temperatura di esercizio: -20°C - +49°C

#### Confronto Ultracell XX25 / Batteria al litio BB2590

72 h di missione a 20 W	Sistema UltraCell XX25	Batteria BB2590 (batteria Li-ione)
Requisiti configurazione	1 cella e 3 ricariche	9 batterie
Peso del sistema (incluso combustibile)	2,9 kg	12,6 kg
Densità di energia	500 Wh/kg	130 Wh/kg

### RMFC ULTRACELL



### DMFC



In collaborazione con il CERDEC, all'interno del Land Warrior Programme, UltraCell ha sviluppato e provato nel 2005, un sistema portatile da 25 W (RMFC XY90), la cui evoluzione ha consentito la realizzazione dell'XX25 pensato per usi militari. Il sistema, mostrato nel 2006, sarà sottoposto a valutazione per verificarne la corrispondenza alla normative militari e agli standard di sicurezza IEC, all'interno di un contratto con l'Army Power Division del CERDEC.

La società nel 2007 ha avviato una collaborazione con la BASF Venture Capital (Ludwigshafen, Germania) diretta allo sviluppo di unità per computer portatili.

Tra le società che hanno realizzato unità DMFC per dispositivi elettronici portatili si citano ancora compagnie come **Antig Technology**, **Ener1** che ha acquisito la tecnologia della Giner Electrochemical Systems, **Hitachi**, **Motorola Labs**, **NEC**, **Samsung Advanced Institute of Technology** e **Sanyo Electric**. Attività di ricerca e sviluppo su materiali e componenti di cella sono in corso presso il **Forschungszentrum Jülich** e **BASF Fuel Cell** (già PEMEAS) in Germania, **Direct Methanol Fuel Cell Corp.**, **Dupont** e **PolyFuel** negli Stati Uniti e presso il **Korea Institute of Energy Research** (KIER) e **Korea Institute of Science Technology** (KIRST).

In **ITALIA** attività nel settore delle celle a metanolo diretto sono svolte da organizzazioni di ricerca ed istituti universitari. Il Politecnico di Torino, il Centro Ricerche FIAT, ed istituti del CNR (Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia "Nicola Giordano" di Messina e Istituto per la Microelettronica e Microsistemi di Catania) sono tra i partner del **Progetto MorePower** (Compact direct methanol fuel cells for portable applications) finanziato dalla Comunità Europea all'interno del Sesto Programma Quadro. Il progetto, coordinato dal Centro Ricerche GKSS (Geesthacht, D), ha come obiettivo lo sviluppo di un prototipo a metanolo diretto di potenza inferiore a 500 W per applicazioni portatili.

Il Politecnico di Torino sta inoltre coordinando il **Progetto MicroCell** (2005-2008), finanziato dalla Regione Piemonte, finalizzato alla realizzazione di un dispositivo da 1-1,5 W (500 mA e 3,6 V) alimentato a metanolo (o etanolo) funzionante a bassa temperatura, adatto a sostituire le batterie al litio tipiche dei sistemi portatili. Partecipano al progetto: Centro Ricerche FIAT, CNR-IMM, CNR-ITAE, le Università di Torino e del Piemonte Orientale ed Environmental Park.

## APPENDICE A

### Stazioni di rifornimento idrogeno

Anno	Nazione	Sito	Combustibile	Progetto	Partner	Tecnica di produzione
1989	Germania	Monaco	H <sub>2</sub> liquido	Stazione per veicoli BMW	BMW, Linde	Produzione centralizzata
1993	USA	Riverside, California	H <sub>2</sub> compresso	Solar-Hydrogen Production	UC-Riverside, Air Products, City of Riverside, SCAQMD, Proton Energy	Elettrolisi (energia da rinnovabili)
1994	Belgio	Oostmalle	H <sub>2</sub> liquido	Stazione per Belgian Bus Demonstration Project	Messer Griesheim	Produzione centralizzata
1994	Canada	Montreal	Blend H <sub>2</sub> /gas naturale	Stazione della Montreal Transit Co.	Hydrogenics, STCUM (Montreal Transit Company)	Elettrolisi
1994	USA	Thousand Palms, California	H <sub>2</sub> compresso	Schatz Hydrogen Generation Center presso SunLine Transit	Schatz Energy, SunLine Transit	Elettrolisi (energia da rinnovabili)
1995	USA	El Segundo, California	H <sub>2</sub> compresso	Clean Air Project - Xerox facility	Clean Air Now, Xerox Corp., Praxair Inc., PVI Corp, e Kaiser Engineering	Elettrolisi (energia da rinnovabili)
1998	Canada	Vancouver	H <sub>2</sub> compresso	Coast Mountain Hydrogen Transit	Stuart Energy, Coast Mountain Transit, BC Hydro, Ballard Power Systems, Natural Resources Canada	Elettrolisi
1998	Germania	Erlangen e Monaco	H <sub>2</sub> liquido	Progetto dimostrativo autobus MAN	Linde, SWM	Stazione mobile rifornita con idrogeno liquido da impianto centralizzato
1998	Germania	Kirchheim/ Nabern	H <sub>2</sub> liquido e da H <sub>2</sub> liq. a compr.	Stazione presso la DaimlerChrysler FC Research Facility	Linde, DaimlerChrysler	Idrogeno liquido da impianto centralizzato
1998	USA	Chicago, Illinois	da H <sub>2</sub> liquido a compresso	Chicago Transit Authority	Air Products and Chemicals, Inc., Chicago Transit Authority, Ballard Power Systems	Idrogeno liquido da impianto centralizzato
1999	Germania	Amburgo	H <sub>2</sub> compresso	W.E.I.T. project	Gasttechnologie and Messer Griesheim	Elettrolisi on site (energia da rinnovabili)
1999	Germania	Monaco	H <sub>2</sub> compresso/ H <sub>2</sub> liquido & da liquido a compresso	ARGEMUC Project (completato dic. 2006)	Bavaria Ministry of Economics, Transportation and Technology, Linde, BP/Aral, GHW, BMW	H <sub>2</sub> compr. - elettrolisi on site H <sub>2</sub> liq. - prod. centralizzata
1990	Germania	Norinberga	H <sub>2</sub> liquido	Solar Hydrogen Bavaria (SWB)	Bayerwerk AG, Siemens, Linde, MBB (ora DASA), BMW	Produzione centralizzata
1999	Germania	Oberstdorf	H <sub>2</sub> compresso	Stazione autobus Neoplan	Linde, government of Bavaria state. Town of Oberstdorf	Produzione centralizzata
1999	USA	Dearborn, Michigan	da H <sub>2</sub> liquido a compresso e H <sub>2</sub> liquido	Ford Sustainable Mobility Transportation Lab	Ford Motor Co., Air Products and Chemicals	Produzione centralizzata
2000	Germania	Norinberga	H <sub>2</sub> compresso	MAN-Siemens-Linde PEFC Bus Demonstration Project	Linde, LBST, VAG, MAN	Stazione mobile - Produzione centralizzata
2000	USA	Thousand Palms, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione SunLine Transit	Hydrogenics, Hyradix, SunLine Transit Agency	Elettrolisi
2000	USA	West Sacramento, California	H <sub>2</sub> compresso, MeOH	Stazione presso sede CaFCP	Air Products and Chemicals, Inc., BP, ChevronTexaco, ExxonMobil, Praxair, Shell Hydrogen	Idrogeno liquido da impianto centralizzato
2001	Sud Corea	Hwaseung	H <sub>2</sub> compresso	Stazione presso Centro Ricerche Hyundai Motor	Pressure Products Industries, Doojin corp.	Produzione centralizzata
2001	USA	Phoenix, Arizona	H <sub>2</sub> compresso, CNG, & blend H <sub>2</sub> /NG	Arizona Public Service Hydrogen Power Park	Arizona Public Service, DoE	Produzione centralizzata (elettrolisi)
2001	USA	Oxnard, California	H <sub>2</sub> liquido	Stazione BMW North America	BMW, Air Products, Linde AG	Produzione centralizzata
2001	USA	Torrance, California	H <sub>2</sub> compresso	Honda Solar Hydrogen Refueling Station	Honda	Elettrolisi (energia da PV)
2002	Canada	Surrey	H <sub>2</sub> compresso & blend H <sub>2</sub> /GN	PowerTech Station / Vancouver FC Vehicle Programme	BC Hydro, Stuart Energy Systems, Dynetek, Powertech Labs, Fuel Cells Canada	Idrogeno per elettrolisi (energia da rinnovabili)
2002	Germania	Barth	H <sub>2</sub> compresso	Wasserstoff-Initiative-Vorpommern (WIV)	WIV, Proton Energy Systems, Wolters-Ostseebus	Stazione mobile (elettrolisi)
2002	Germania	Berlino	H <sub>2</sub> liquido e H <sub>2</sub> compresso	Stazione Total-BVG (2002-2005)	TotalFinaElf, BVG, Linde, MAN, Opel	Idrogeno liquido da impianto centralizzato. Idrogeno compresso prodotto on site
2002	Germania	Sindelfingen	H <sub>2</sub> compresso	Stazione per flotta DaimlerChrysler	Linde, DaimlerChrysler, BGA Garn	Idrogeno liq. da impianto centralizzato
2002	Giappone	Kawasaki, Tokyo	H <sub>2</sub> compresso	JHFC Demonstration Project	Japan Air Gases Ltd, Ministry of Economy, Trade and Industry, Air Liquide Japan	Reforming on site MeOH
2002	Giappone	Nagoya	H <sub>2</sub> compresso	Stazione per veicoli Prefettura di Aichi e Toho Gas	Toho Gas	Reforming GN
2002	Giappone	Osaka	H <sub>2</sub> compresso	WE-NET Project	NEDO, Osaka Gas	Reforming on site GN
2002	Giappone	Senju, Tokyo	H <sub>2</sub> compresso	JHFC Demonstration Project	Tokyo Gas Co., Ltd., Taiyo Nippon Sanso, QuestAir	Reforming on site GN e GPL
2002	Giappone	Takamatsu	H <sub>2</sub> compresso	Shikoku Research Institute, WE-NET Project	Nippon Sanso Corp., NEDO, ENAA	Elettrolisi on site
2002	Giappone	Tokai, Aichi	H <sub>2</sub> compresso	Laboratori di ricerca Toho Gas	Toho Gas Co.	Steam eforming GN
2002	Giappone	Asahi, Yokohama	H <sub>2</sub> compresso	JHFC Demonstration Project	Nippon Oil Corp., METI	Reforming nafta
2002	Giappone	Tsurumi, Yokohama	H <sub>2</sub> compresso	JHFC Demonstration Project	Tsurumi Soda Co., Iwatani International Corp.	Coprodotto di un impianto cloro-soda
2002	Italia	Torino	H <sub>2</sub> compresso	Progetto Irisbus	Città di Torino, GTT, Irisbus, Sapio, Ansaldo Ricerche, CVA, ENEA	Produzione centralizzata (elettrolisi)
2002	Svizzera	Lenzburg	H <sub>2</sub> compresso	HyStation ESORO	Messer/SL Gas, ESORO AG	Idrogeno da impianto centralizzato
2002	USA	Yucca, Arizona	H <sub>2</sub> compresso	Stazione mobile per veicoli Ford	Ford Motor Co., Hydrogenics	Stazione mobile (elettrolisi)
2002	USA	Los Angeles, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione mobile per veicoli FCX Honda	City of Los Angeles, American Honda, Air Products, Praxair	Stazione mobile

Anno	Nazione	Sito	Combustibile	Progetto	Partner	Tecnica di produzione
2002	USA	Richmond, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione AC Transit	AC Transit, Hydrogenics (Stuart Energy), CaFCP	Elettrolisi on site
2002	USA	Torrance, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Toyota	Toyota, Hydrogenics (Stuart Energy)	Elettrolisi on site
2002	USA	Las Vegas, Nevada	H <sub>2</sub> compresso	Las Vegas Energy Station	Air Products, Plug Power, City of Las Vegas, DoE	Reforming on site GN
2003	Canada	Mississauga	H <sub>2</sub> compresso	Stuart Energy, Hydrogen Energy Station	Hydrogenics (Stuart Energy)	Elettrolisi on site
2003	Francia	Sassenage	H <sub>2</sub> compresso	Air Liquide Advanced Technology Division	Air Liquide, Axane Fuel Cell Systems	Produzione centralizzata
2003	Germania	Dudenhofen	H <sub>2</sub> liquido e H <sub>2</sub> compresso	Stazione Opel Test Center	Opel, Linde	Produzione centralizzata
2003	Germania	Amburgo	H <sub>2</sub> compresso	CUTE Bus Demonstration Project	Vattenfall Europe, Hamburger Hochbahn, BP, Norsk Hydro	Elettrolisi on site - energia da rinnovabili
2003	Germania	Stoccarda	H <sub>2</sub> compresso	CUTE Bus Demonstration Project	BP, NWS, SSB Stuttgart	Produzione, da steam reforming
2003	Giappone	Hadano, Kanagawa	H <sub>2</sub> compresso	JHFC Demonstration Project	Idemitsu Kosan Co. Ltd.	Reforming cherosene
2003	Giappone	Ome, Tokyo	H <sub>2</sub> compresso	JHFC Demonstration Project	Babcock-Hitachi K.K., ENAA, Nippon Sanso Corp., QuestAir	Stazione mobile (reforming GN)
2003	Giappone	Sagamihara, Kanagawa	H <sub>2</sub> compresso	JHFC Demonstration Project	Kurita Water Industries Ltd., Sinanen Co., Ltd., Itochu Enex Co.	Stazione mobile (elettrolisi)
2003	Giappone	Ariake, Tokyo	LH <sub>2</sub> & LCGH <sub>2</sub>	JHFC Demonstration Project	Iwatani Intl. Corp., Tokyo Metropolitan Government, Showa shell Sekiyu KK, Linde	Idrogeno liquido da impianto centralizzato
2003	Giappone	Daikoku, Yokohama	H <sub>2</sub> compresso	JHFC Park – JHFC Demonstration Project	Cosmo Oil Co., Ltd., METI	Steam reforming benzina desolforata
2003	Islanda	Reykjavik	H <sub>2</sub> compresso	ECTOS Demonstration Project	VistOrka, DaimlerChrysler, Shell Hydrogen	Elettrolisi on site
2003	Italia	Pontadera	H <sub>2</sub> compresso	Stazione PIEL	ILT Technologie s.r.l./PIEL, FIAT	Elettrolisi on site
2003	Lussemburgo	Città del Lussemburgo	H <sub>2</sub> compresso	CUTE Bus Demonstration Project	Shell Hydrogen, Air Liquide, Ville de Luxembourg VdL	Produzione centralizzata
2003	Olanda	Amsterdam	H <sub>2</sub> compresso	CUTE Bus Demonstration Project	Shell Hydrogen, DaimlerChrysler, GVB, Dienst Milieu en Bouwtoezicht, HoekLoos, NOVEM, Nuon, Hydrogenics	Elettrolisi on site
2003	Portogallo	Lisbona	H <sub>2</sub> liquido	Stazione TotalFinaElf	TotalFinaElf, Linde, BP	Idrogeno liquido da impianto centralizzato
2003	Portogallo	Porto	H <sub>2</sub> compresso	CUTE Bus Demonstration Project	BP, Linde	Produzione centralizzata (reforming GN)
2003	Spagna	Barcellona	H <sub>2</sub> compresso	CUTE Bus Demonstration Project	BP, Transports Metropolitans de Barcelona	Elettrolisi on site
2003	Spagna	Madrid	H <sub>2</sub> compresso	CUTE Bus Demonstration Project e CityCell Bus Demonstration	Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT), Air Liquide, Natural Gas-Repsol YPF	Reforming GN on site + idrogeno prodotto centralmente
2003	Svezia	Malmö	H <sub>2</sub> compresso, GN	Stazione idrogeno	Sydskraft, Stuart Energy Systems, Vandenberg	Elettrolisi on site
2003	Svezia	Stoccolma	H <sub>2</sub> compresso	CUTE Bus Demonstration Project	SL Stockholm, Busslink, Stad Stockholm, Fortum, Birka Energie	Elettrolisi on site (energia da rinnovabili)
2003	USA	Chula Vista, California	H <sub>2</sub> compresso	Chula Vista	Chula Vista, Ford, Toyota, SunLine Transit Agency, Hydrogenics	Stazione mobile - elettrolisi
2003	USA	Irvine, California	H <sub>2</sub> compresso	University of California - Irvine	NFCRC at UC Irvine, Air Products and Chemicals	Stazione mobile
2003	USA	Torrance, California	H <sub>2</sub> compresso	Honda Home Energy Station	Honda	Home Energy Station (dal 2007 HES IV gen)
2004	Australia	Perth	H <sub>2</sub> compresso	Sustainable Transport Energy for Perth (STEP) Project	Western Australian Conservation Council, DaimlerChrysler, BP, Path Transit	Prod. centralizzata, consegna come H <sub>2</sub> compr.
2004	Canada	Toronto	H <sub>2</sub> compresso	Canadian National Exhibition - Hydrogen Village	Hydrogenics, Exhibition Place, City of Toronto, h2ea, Canadian Transportation Fuel Cell Alliance	Elettrolisi on site (energia da rinnovabili)
2004	Germania	Berlino	H <sub>2</sub> liquido e H <sub>2</sub> compresso	Clean Energy Partnership Project	Aral, BMW, BVG, DaimlerChrysler, Ford, GM/Opel, Hydro, Linde, TOTAL and Vattenfall Europe	Idrogeno compresso ed elettrolisi on site
2004	Germania	Aachen	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Centro Ricerche Ford	Ford, BP	Idrogeno da impianto centralizzato. Idrogeno liquido da impianto centralizzato
2004	Hong Kong	Hong Kong	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Cheung Kong Infrastructure	Cheung Kong Infrastructure Holdings, Ltd., Hydrogenics	Elettrolisi on site
2004	Singapore	Singapore	H <sub>2</sub> compresso	Stazione BP / Sinergy Project	Air Products and Chemicals Inc., BP, Singapore Econ. Dev. Board, Min. of Env. & Land Transport Auth., DaimlerChrysler	Elettrolisi e reforming GN
2004	USA	Auburn, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione PG&E Center	Ztek, CaFCP, Pacific Gas & Electric	Reforming GN on site
2004	USA	Davis, California	H <sub>2</sub> compresso, CNG/H <sub>2</sub>	Stazione UC Davis	University of California at Davis, Air Products and Chemicals Inc.	Idrogeno liquido da impianto centralizzato
2004	USA	Diamond Bar, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione sede SCAQMD	South Coast Air Quality Management District, Hydrogenics	Elettrolisi
2004	USA	Los Angeles, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Praxair- BP Los Angeles International Airport	Praxair, BP, SCAQMD, CARB, DOE, LAWA, Hydrogenics	Elettrolisi on site
2004	USA	San Francisco, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione mobile per flotta FCX Honda	City of San Francisco, American Honda, Air Products and Chemicals	Stazione mobile
2004	USA	San Jose, California	H <sub>2</sub> liquido e H <sub>2</sub> compresso	Stazione Santa Clara Valley Transportation Authority (VTA)	Santa Clara VTA, CEC, Ballard, Gillig, FTA, BAAQMD, DoE, Cal EPA, Air Products and Chemicals Inc, CARB, CaFCP, NREL, SamTrans	Idrogeno liquido da impianto centralizzato
2004	USA	Washington, DC	H <sub>2</sub> liquido e H <sub>2</sub> compresso	Stazione Benning Road Shell	General Motors, Shell Hydrogen, Air Products and Chemicals	Idrogeno liquido da impianto centralizzato
2004	USA	Honolulu, Hawaii	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Hickam AFB	HCATT, Hydrogenics, Stuart Energy	Idrogeno da impianto centralizzato.
2004	USA	Crane, Indiana	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Naval Surface Warfare Center	US Navy, Hydrogenics	Elettrolisi on site
2004	USA	Ann Arbor, Michigan	da H <sub>2</sub> liquido a H <sub>2</sub> compresso	Stazione EPA National Vehicle and Fuel Emissions Lab	EPA, DaimlerChrysler, UPS, Air Products and Chemicals	Idrogeno liquido da impianto centralizzato
2004	USA	Milford, Michigan	H <sub>2</sub> compresso	Stazione General Motors Milford Proving Ground	APCI, GM	Produzione centralizzata
2004	USA	Southfield, Michigan	H <sub>2</sub> compresso	Stazione DTE Hydrogen Technology Park	DTE Energy, Hydrogenics, BP, DaimlerChrysler, DoE	Elettrolisi on site

Anno	Nazione	Sito	Combustibile	Progetto	Partner	Tecnica di produzione
2004	USA	Latham, New York	H <sub>2</sub> compresso	Home Energy Station	Honda R&D Americas, Plug Power	Home Energy Station (reforming GN)
2004	USA	Charlotte, North Carolina	H <sub>2</sub> compresso	Stazione John Deere Southeast Engineering Center	APCI, John Deere, Hydrogenics	Elettrolisi
2004	USA	University Park, Pennsylvania	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Penn State/Air Products	DOE, Air Products and Chemicals, Penn State	Reforming on site GN
2005	Austria	Graz	H <sub>2</sub> liquido e H <sub>2</sub> compresso	Stazione Hydrogen Center Austria (HyCentA)	Università di Graz, JRARC, Magna Steyr, MAGNA, OMV, AVL, FVT, StGW.	Idrogeno da impianto centralizzato
2005	Canada	Toronto	H <sub>2</sub> compresso	Purolator West Toronto	Hydrogenics, Canadian Transportation Fuel Cell Alliance, City of Toronto, h2ea, Purolator	Elettrolisi on site
2005	Canada	Toronto	H <sub>2</sub> compresso	Toronto Hydrogen Village	Hydrogenics, Canadian Transportation Fuel Cell Alliance	Elettrolisi on site
2005	Canada	Vancouver	H <sub>2</sub> compresso	Pacific Spirit Station	National Research Council Institute for FC Innovation, Canadian Transportation Fuel Cell Alliance, BOC Canada, General Hydrogen	Produzione centralizzata, pronta per produz. on site
2005	Germania	Isenbüttel	H <sub>2</sub> compresso	Volkswagen Technology Center Solar	Solvis, Volkswagen AG	Elettrolisi on site (energia da rinnovabili)
2005	Giappone	Hiroshima	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Mazda a Ujina	Mazda	Idrogeno da impianto centralizzato
2005	Giappone	Seto Sud	H <sub>2</sub> compresso	Expo 2005 Aichi Japan,	Toho Gas Co., Taiyo Nippon Sanso Corp	Idrogeno da impianto centralizzato (reforming GN)
2005	Giappone	Seto Nord	H <sub>2</sub> compresso	The Expo 2005 Aichi Japan	Nippon Steel, Taiyo Nippon Sanso Corp.	Idrogeno da impianto centralizzato (da gas da carbone)
2005	Grecia	Keratea	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Center for Renewable Energy Sources (CRES) Wind Energy Park	ROKAS (Grecia), FIT (Cipro), Planet (Germania), INABENSA (Spagna)	Elettrolisi on site
2005	India	Faridabad	Blend H <sub>2</sub> /GN e H <sub>2</sub> compresso	Stazione Indian Oil Corp. R&D Center	Indian Oil Corp., Ltd., Air Products and Chemicals, INOX Air Products	Reforming on site GN
2005	Regno Unito	Londra	H <sub>2</sub> compresso	CUTE Bus Demonstration	BP	Idrogeno liquido da impianto centralizzato (steam reforming)
2005	Singapore	Singapore	H <sub>2</sub> compresso	Stazione BP Singapore	BP, Air Liquide, SOXAL	Elettrolisi on site
2005	USA	Chino, California	H <sub>2</sub> compresso	Programma DOE - Stazione Kia-Hyundai America Technical Center	ChevronTexaco, Hyundai Motor Co., UTC Fuel Cells	Reforming on site GN
2005	USA	Irvine, California	H <sub>2</sub> compresso	University of California-Irvine	Air Products and Chemicals, Inc., National Fuel Cell Research Center at UC Irvine, Air Quality Management District	Stazione mobile
2006	Canada	Victoria	H <sub>2</sub> compresso	BC Hydrogen Highways - Langford Transit Centre	BOC/Linde, Natural Resources Canada's Canadian Transportation Fuel Cell Alliance (CTFCA), BC Hydrogen Highway, BC Hydro, BC Transit, Powertech Labs	Idrogeno da impianto centralizzato
2006	Cina	Pechino	H <sub>2</sub> compresso	Stazione SinoHytec /programma GEF-UNDP	SinoHytec, BP, GEF-UNDP, Ministry of Science and Technology, Beijing Municipal Government, BP, U.S. DoE, Beijing Tongfang Co, APCI	Produzione centralizzata, in una seconda fase reforming on site carbone
2006	Cina	Pechino	H <sub>2</sub> compresso	GEF-UNDP Programme	GEF-UNDP, Ministry of Science and Technology, Beijing Municipal Government, BP, U.S. DoE, Beijing SinoHytec Limited, Beijing Tongfang Co.	Idrogeno da impianto centralizzato
2006	Francia	Sassenage	H <sub>2</sub> compresso	Stazione mobile Air Liquide Advanced Technology Division	Air Liquide, Axane Fuel Cell Systems	Stazione mobile
2006	Germania	Berlino	H <sub>2</sub> liquido e H <sub>2</sub> compresso	Clean Energy Partnership Project	Aral, BMW, BVG, DaimlerChrysler, Ford, GM/Opel, Hydro, Linde, TOTAL and Vattenfall Europe	Reformer on site
2006	Germania	Francoforte	H <sub>2</sub> liquido e H <sub>2</sub> compresso	Progetto Zero Regio -Stazione multiEnergy AGIP presso Höchst Industrial Park	Varie industrie ed organizzazioni di ricerca europee	Idrogeno da impianto centralizzato
2006	Germania	Lohhof (Monaco)	H <sub>2</sub> liquido e H <sub>2</sub> compresso	Stazione Linde Group Hydrogen Research Center	Linde Group	Idrogeno da impianto centralizzato
2006	Germania	Monaco	H <sub>2</sub> liquido	Stazione TOTAL	BMW Group, TOTAL	Produzione centralizzata
2006	Germania	Dresda	H <sub>2</sub> compresso	Unità di rifornimento mobile HyTra	Fraunhofer Institute for Transportation and Infrastructure Systems, TÜV Industrie Service, Proton Energy Systems, Wystrach, GreenField, CHRIST AG, Sempa Systems, WEH GmbH	Stazione mobile (elettrolisi PEM)
2006	Giappone	Nagoya	H <sub>2</sub> compresso	JHFC Demonstration Project - Central Japan International Airport	Centrair, Toho Gas Co., Ltd., Taiyo Nippon Sanso Corp., Nippon Steel Corp.	Idrogeno da impianto centralizzato (componenti dalla stazione Seto Sud)
2006	Italia	Collesalvetti	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Multienergy AGIP	Eni, AGIP	Elettrolisi on site
2006	Norvegia	Stavanger	H <sub>2</sub> compresso, HCNG, Natural Gas	HyNor Project / Scandinavian Hydrogen Highway Partnership	Stavanger Kommune, RF, Rogaland Fylkeskommune, Energyparken, Statoil, Lyse, Rogaland Taxi	Reforming GN con cattura CO <sub>2</sub>
2006	Olanda	Petten	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Energy Research Center (ECN)	ECN, Air Products	Reforming gas naturale centralizzato
2006	Sud Corea	Incheon	H <sub>2</sub> compresso	Stazione presso Centro di R&S Korean Gas Technology Corp.	QuestAir Technologies Inc., Hydrogenics	Reforming GN
2006	USA	Columbus, Ohio	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Ohio State University	Praxair, Ohio State University, Honda	Idrogeno da impianto centralizzato
2006	USA	Burbank, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Burbank	Air Products and Chemicals, Inc., City of Burbank, SCAQMD, Proton Energy	Elettrolisi on site
2006	USA	Ontario, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Ontario	Air Products and Chemicals, Inc., City of Ontario, SCAQMD	Stazione mobile
2006	USA	Riverside, California	H <sub>2</sub> compresso	SCAQMD "5 Cities Project"	City of Riverside, SCAQMD, Air Products e Chemicals, Inc.	Elettrolisi
2006	USA	Oakland, California	H <sub>2</sub> compresso	AC Transit Oakland	AC Transit, ChevronTexaco	Reforming GN on site
2006	USA	Sacramento, California	H <sub>2</sub> compresso	Programma DoE, Sacramento Municipal Utility District (SMUD)	DoE, BP, Ford, APCI	Stazione mobile temporanea
2006	USA	San Francisco, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione PG&E	PG&E, Air Products, DaimlerChrysler	Stazione mobile

Anno	Nazione	Sito	Combustibile	Progetto	Partner	Tecnica di produzione
2006	USA	Santa Ana, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Santa Ana	Air Products and Chemicals, Inc., Municipalità di Santa Ana, SCAQMD	Stazione mobile
2006	USA	Santa Monica, California	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Santa Monica	APCI, City of Santa Monica, South Coast Air Quality Management District, Proton Energy Systems, U.S. DoE, Quantum Technologies	Elettrolisi on site
2006	USA	Honolulu, Hawaii	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Hickam AFB	Hydra FLX Systems LLC, USAF	Elettrolisi on site
2006	USA	Detroit, Michigan	H <sub>2</sub> compresso	Stazione NextEnergy Center	NextEnergy, BP, APCI, Albert Kahn Assoc., DMA Technical Services, Praxair, REB Research and Consulting, DaimlerChrysler	Da impianto centralizzato. Dal 2007 produzione on site
2006	USA	Taylor, Michigan	H <sub>2</sub> compresso	Stazione City of Taylor	Ford Motor Company, BP, Città di Taylor, US DoE	Idrogeno da impianto centralizzato
2006	USA	Burlington, Vermont	H <sub>2</sub> compresso	Stazione EVermont	EVERmont, Northern Power Systems, Proton Energy Systems, APCI, Burlington Dept. of Public Works, Burlington Electric Department, U.S. DOE	Elettrolisi (energia da rinnovabili)
2006	USA	Lake Forest, California	H <sub>2</sub> compresso	Programma DOE	U.S. DoE, GM, Quantum Technologies	Idrogeno da impianto centralizzato
2006	USA	Wallingford, Connecticut	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Proton Energy Systems	Proton Energy Systems	Elettrolisi
2007	Argentina	Pico Truncato	H <sub>2</sub> compresso	Stazione non aperta al pubblico	Impianto dimostrativo Pico Truncato	Elettrolisi on-site (energia da impianto eolico)
2007	Canada	Ottawa	H <sub>2</sub> compresso	Progetto "Hydrogen on the Hill"	Natural Resources Canada, Ford, Air Liquide	
2007	Brasile	S. Paolo	H <sub>2</sub> compresso	GEF programme	UNDP, GEF, Brazilian Ministry of Mines and Energy Sao Paulo Metropolitan Urban Transport Company, Hydrogenics	Elettrolisi on site
2007	Germania	Amburgo	H <sub>2</sub> compresso	Stazione mobile presso Aeroporto di Amburgo	Linde, Hamburg Regional Initiative for Hydrogen and Fuel Cell Technology, Wasserstoffgesellschaft Hamburg, KION Group (STILL GmbH), Municipalità di Amburgo	Idrogeno da impianto centralizzato
2007	Germania	Monaco	H <sub>2</sub> liquido	Stazioni di rifornimento Total nei pressi del Centro Ricerche BMW	BMW, Total	Idrogeno da impianto centralizzato
2007	Grecia	Skaramanga (Atene)	H <sub>2</sub> liquido	Stazione per sottomarini HDW Class 214	Air Products, Howaltwerke Deutsche Werft GmbH (HDW), Hellas Air Pro Ld., Hellenic Shipyards S.A.	Produzione centralizzata
2007	Italia	Mantova	H <sub>2</sub> compresso	Progetto Zero Regio - Stazione MultiEnergy Agip-ENI	Varie industrie ed organizzazioni di ricerca europee	Idrogeno da impianto centralizzato nella 1 <sup>a</sup> fase; quindi produzione on site da gas naturale
2007	Norvegia	Porsgrunn	H <sub>2</sub> compresso	Centro ricerche Norsk Hydro di Heroya,	Norsk Hydro, Norwegian Ministry of Transport and Communication	Produzione centralizzata
2007	Corea del Sud	Seul	H <sub>2</sub> compresso	Università di Yongsei	Ministry of Commerce, Industry and Energy, Korea Energy Management Corp, GS Caltex Corp. e Univ. di Yongsei	Produzione centralizzata da nafta
2007	USA	Rosemead California	H <sub>2</sub> compresso	Programma DoE Sede Southern California Edison	Chevron, Hyundai-Kia, UTC Power, Southern California Edison, DoE	Elettrolisi on site
2007	USA	South Windsor Connecticut	H <sub>2</sub> compresso	Sede UTC Power, Dimostrazione autobus CT Transit	UTC Power, CT Transit, Greater Hartford Transit District	Produzione centralizzata (energia da rinnovabili)
2007	USA	Des Plaines Illinois	H <sub>2</sub> compresso	Programma DoE / Stazione presso Gas Technology Institute	Gas Technology Institute, GreenField Compression, DoE	Idrogeno prodotto da GN o etanolo e da elettrolisi
2007	USA	Las Vegas Nevada	H <sub>2</sub> compresso	Las Vegas Valley Water District	University of Las Vegas, Las Vegas Valley Water District, DOE, Proton Energy	Elettrolisi on-site (energia da PV)
2007	USA	Selfridge, Michigan,	H <sub>2</sub> compresso	Base militare a Selfridge - Programma DoE	Chevron Hydrogen Company, Hyundai-Kia, UTC Power, Tank Automotive Research, Development and Engineering Center, DoE	Reforming on site gas naturale
2007	USA	Orlando, Florida	H <sub>2</sub> compresso	Stazione Progress Energy Chevron Texaco	Chevron, Ford, Progress Energy, Florida Department of Environmental Protection H2Gen, Air Products	Reforming on site gas naturale
2007	USA	Oviedo Florida	H <sub>2</sub> compresso	Programma DoE /Progetto "Hydrogen to the Highway"	BP, Ford, Florida Department of Environmental Protection, Progress Energy, DoE	Elettrolisi on-site (energia da PV)

Fonti:  
National Hydrogen Association, Fuel Cells 2000, LBST

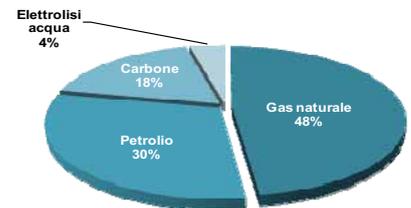
 Stazione non più operativa

## APPENDICE B

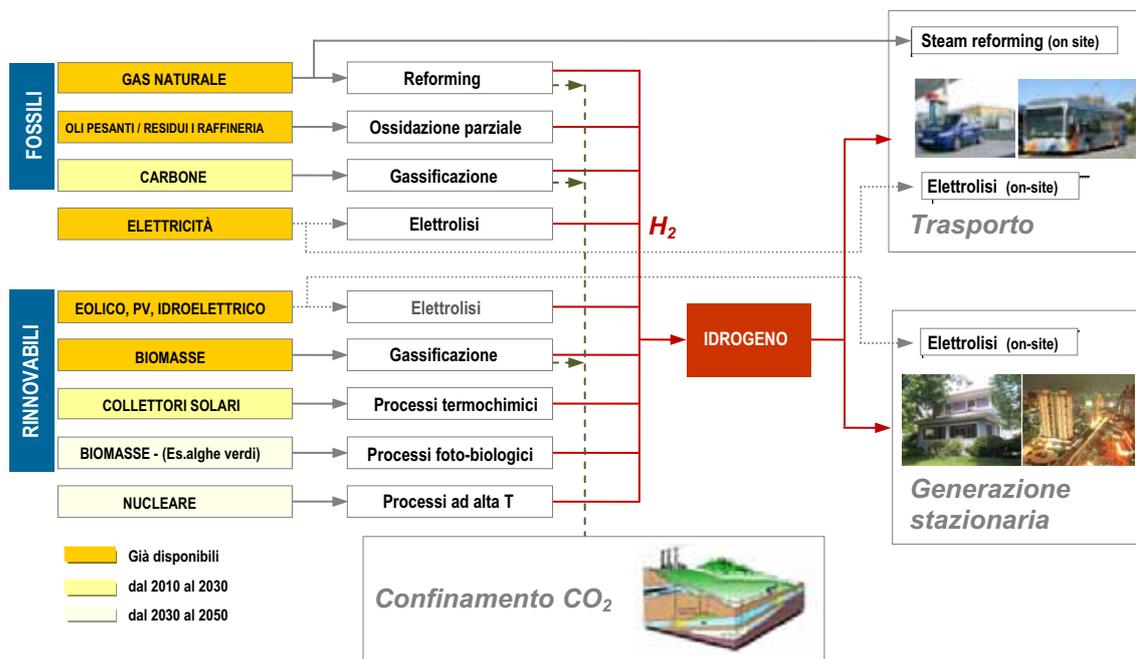
### Produzione di idrogeno

L'idrogeno, come l'elettricità, non è una fonte energetica ma è un "vettore energetico", deve pertanto essere derivato da una sorgente primaria (gas naturale, carbone, acqua, biomasse, ecc.). Attualmente su scala mondiale vengono prodotti circa 550 miliardi di Nm<sup>3</sup> all'anno di idrogeno, la maggior parte del quale proveniente da fonti fossili (oltre il 96%) ed usato a fini non energetici direttamente sul luogo di produzione a scopo di trasformazione interna (*captive use* presso l'industria chimica).

Di seguito viene fornita una breve panoramica dei processi di produzione dell'idrogeno, con descrizione più dettagliata delle tecnologie applicabili nel breve-medio termine.



Contributo delle varie fonti alla produzione di idrogeno



### Produzione da fonti fossili

Le tecnologie di produzione di idrogeno a partire dai combustibili fossili (steam reforming, ossidazione parziale, reforming autotermico, gassificazione) sono mature ed ampiamente diffuse, anche se per una produzione su ampia scala dell'idrogeno come vettore energetico vanno ancora ottimizzate, da un punto di vista energetico, di impatto ambientale, ma soprattutto economico.

Oggi circa la metà dell'idrogeno prodotto nel mondo è estratto da gas naturale (metano o da frazioni leggere del petrolio) attraverso **steam reforming**. Nel processo il gas naturale, dopo desolfurazione, è fatto reagire con vapor d'acqua, ad alta temperatura (700-925°C) e pressioni di 3-25 bar, in presenza di un catalizzatore (normalmente a base di nichel) per formare un gas di sintesi costituito da idrogeno e monossido di carbonio. Il gas di sintesi viene quindi trattato con produzione di ulteriore idrogeno e conversione del CO in CO<sub>2</sub>. Nella maggior parte dei moderni impianti, per ottenere idrogeno ad elevata purezza, dopo la rimozione del monossido di carbonio nel reattore di shift, si adottano unità PSA (pressure-swing adsorption) che rimuovono anidride carbonica ed altre impurezze presenti; in passato la rimozione della CO<sub>2</sub> e la metanazione venivano condotte in unità separate (processo wet scrubbing).



Impianto di steam reforming realizzato dalla Linde (Milazzo, Italia) - Capacità produttiva 65.000 Nm<sup>3</sup>/h



Diagramma di flusso semplificato di un impianto per la produzione di idrogeno per reforming del metano

L'efficienza energetica di impianti di grandi capacità è in media del 75-80%; nel caso di recupero ed uso del calore di scarto l'efficienza può raggiungere anche l'85%.

La produzione su scala industriale di idrogeno avviene in impianti con capacità produttive dell'ordine 50.000-100.000 Nm<sup>3</sup>/h. Sono in sviluppo sistemi compatti con bassa capacità produttiva per usi con celle a combustibile. L'H2Gen ad esempio realizza generatori di idrogeno on-site con capacità produttive da 27 Nm<sup>3</sup>/h a 1.320 Nm<sup>3</sup>/h.

#### Reazioni nei processi di produzione di idrogeno

	$\Delta H$ [kJ/mole]
<b>Steam reforming</b>	
$C_nH_m + n H_2O \rightarrow n CO + (n + m/2) H_2$	1.175 *
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3 H_2$	206
<b>Ossidazione parziale (metano)</b>	
$C_nH_m + n/2 O_2 \rightarrow n CO + m/2 H_2$	- 36
<b>Reazione di water gas shift</b>	
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	- 41
<b>Metanazione</b>	
$CO + 3 H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	- 206
$CO_2 + 4 H_2 \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$	- 165
<b>Separazione dello zolfo attraverso H<sub>2</sub>S</b>	
$ZnO + RHS \rightarrow ZnS + ROH$	

\* per C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>

Considerando i costi capitale e di funzionamento si stimano costi di produzione dell'idrogeno che variano nell'intervallo 5-8 \$/GJ, assumendo un costo del gas naturale di 3 \$/GJ. Il costo del gas naturale incide notevolmente sul prezzo finale dell'idrogeno, secondo alcune analisi costituisce il 52-68% del costo totale per impianti di grosse dimensioni e circa il 40% per impianti di dimensioni minori.

La separazione ed il confinamento della CO<sub>2</sub> emessa durante il processo di produzione aumenta i costi dell'idrogeno del 20-25%.

Altro processo utilizzato per produrre idrogeno da idrocarburi è quello dell'**ossidazione parziale**. Il processo consiste nella reazione di un idrocarburo con una limitata quantità di ossidante (ossigeno puro o aria) per formare gas di sintesi (idrogeno e ossido di carbonio).

Il processo può essere applicato a gas naturale, nafta, oli pesanti o a carbone. La reazione può avvenire sia in presenza, che in assenza di un catalizzatore, in questo caso il processo richiede temperature più elevate (per il metano 1100-1500 °C, contro 700-800 °C). La separazione dell'idrogeno e la sua purificazione avvengono come per lo steam reforming in reattori di shift e sistemi PSA. I grandi impianti prevedono un'unità di generazione dell'ossigeno; operare con ossigeno anziché aria, consente di ridurre costi e dimensioni dell'impianto. L'efficienza del processo è dell'ordine del 70%.

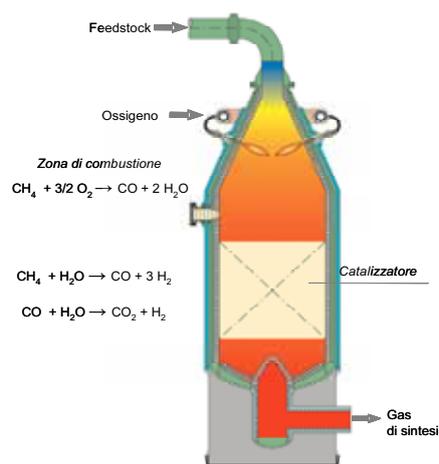
Il processo di ossidazione parziale è tecnologicamente maturo per impianti di grandi dimensioni (tecnologie Texaco e Shell), ma è stato utilizzato, anche se solo a livello dimostrativo, per piccole unità (potenze inferiori a 100 kW), soprattutto per applicazioni con sistemi a celle a combustibile.

Un'alternativa ai processi di steam reforming e di ossidazione parziale è il **reforming autotermico**, che combina le caratteristiche migliori delle due tecnologie. A differenza dello steam reforming il processo non richiede sorgenti esterne di calore, il sistema si presenta quindi meno complesso e più compatto. In un reformer di tipo autotermico, l'esotermicità della reazione di ossidazione parziale va a sostenere l'endotermicità di quella di steam reforming, anche nell'autothermal reforming, per l'arricchimento in idrogeno sono necessari processi di shift e di purificazione del gas.

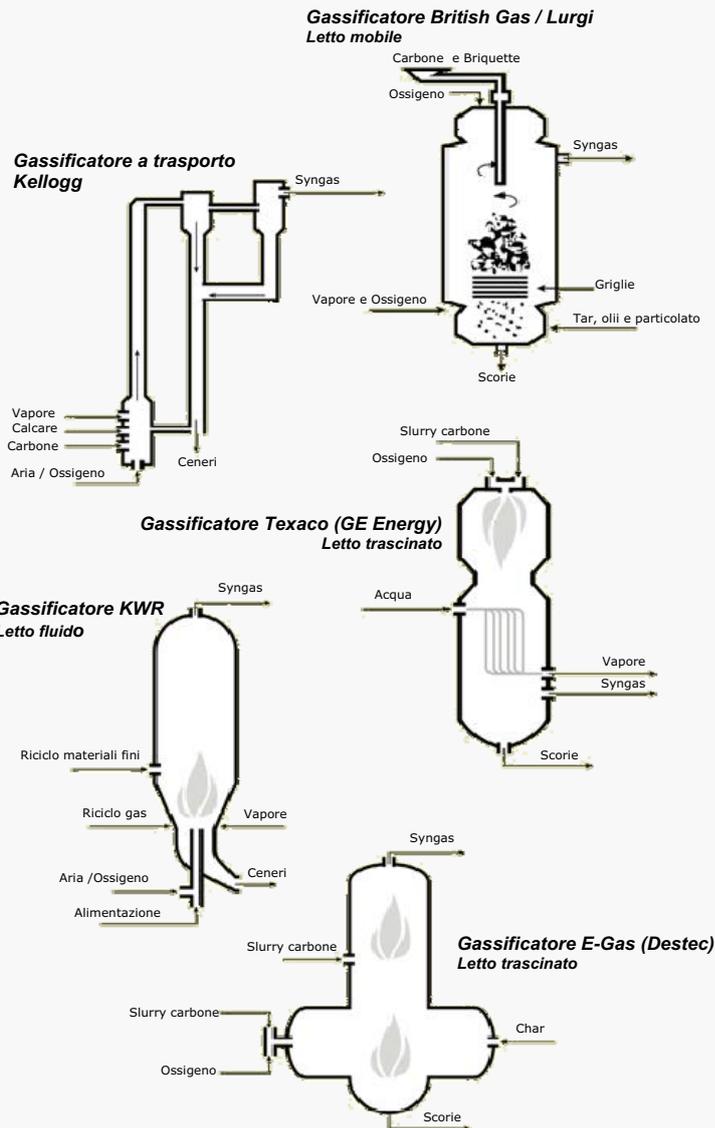
Sono stati sviluppati reformer di piccola taglia da integrare con sistemi con celle a combustibile, destinati sia ad usi residenziali che ad applicazioni nel trasporto (5-50 kW).

Il processo di **gassificazione del carbone** consiste nella trasformazione in condizioni di alta pressione e temperatura e in presenza di ossigeno e vapore, del carbone (o comunque di sostanze carboniose) in gas di sintesi. Il calore necessario è fornito dalla ossidazione parziale del combustibile di alimentazione.

La temperatura, e quindi la composizione del gas prodotto, dipendono dalla quantità dell'agente ossidante e del vapore, nonché dal tipo di reattore utilizzato nell'impianto; a seconda della tecnologia impiegata nel gas di sintesi possono essere presenti significative quantità di acqua, CO<sub>2</sub> e metano, che debbono essere rimosse. Sostanzialmente i reattori di gassificazione sono riconducibili a tre tipi: a letto mobile, a letto fluido e a flusso trascinato.



Reforming autotermico (ATR)



## Tipologie di gassificatori

**Gassificatore a letto mobile** - il carbone viene immesso dall'alto e si muove controcorrente al flusso di gas ossidante. In genere a basse temperature (425-650 °C), si produce un gas contenente prodotti come metano, etano ed idrocarburi come nafta, catrame, oli.  
Tecnologie Sasol, Lurgi, British Gas Lurgi (BGL)

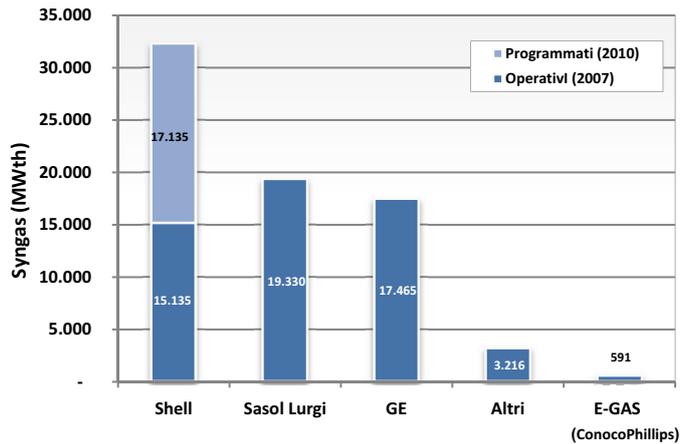
**Gassificatore a letto fluido** - operano a temperature di 925-1040 °C e vengono alimentati dall'alto con polverino di carbone, mentre dal basso giunge una corrente di aria (o ossigeno) e vapore.  
Tecnologie Kellogg Rust Westinghouse (KRW), Winkler, U-Gas, Transport Reactor

**Gassificatore a letto trascinato** - il carbone è alimentato direttamente nella fiamma con l'agente ossidante, con un tempo di permanenza dell'ordine del secondo. Il gas in uscita è costituito quasi interamente da idrogeno, monossido di carbonio e biossido di carbonio, date le alte temperature la maggior parte delle ceneri viene rimossa allo stato fuso.  
Tecnologie: GE Energy (Texaco), Shell, E-Gas, Prenflo, Hitachi

	BGL (letto mobile)	Texaco (letto trascinato)	Prenflo (letto Trascinato)	KWR (letto fluido)
<b>Pressione [bar]</b>	20÷28	25÷85	30÷40	9
<b>Temperatura [°C]</b>	1200÷1600	1200÷1500	1350÷2000	950÷1000
<b>Dimensioni del carbone [mm]</b>	0÷50	0.05-0.1	0.05-0.1	0÷60
<b>Tempo di permanenza [min]</b>	30÷60	ND	1÷2	ND
<b>Stato rimozione delle ceneri</b>	Fuso	Secco	Fuso	Agglomerati
<b>Composizione tipica del gas di sintesi [% in volume su base secca]</b>				
<b>Tipo di carbone</b>	Bituminoso	Bituminoso	Bituminoso	Bituminoso
<b>CO</b>	54,9	42,0	59,6	48,6
<b>CO<sub>2</sub></b>	3,4	20,8	3,7	31,1
<b>H<sub>2</sub></b>	29,8	36,0	26,0	18,2
<b>CH<sub>4</sub></b>	7,1	0,4	ND	1,7
<b>N<sub>2</sub></b>	4,4	ND	1,1	ND
<b>H<sub>2</sub>S+COS</b>	0,5	0,8	0,4	0,4
<b>Tar</b>	0,8	ND	ND	ND

<b>Gassificazione con ossigeno</b> $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	<b>Prodotti della gassificazione</b> (% vol)	
<b>Combustione con ossigeno</b> $C + O_2 \rightarrow CO_2$		
<b>Gassificazione con anidride carbonica</b> $C + CO_2 \rightarrow 2CO$		
<b>Gassificazione con vapore</b> $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$		
<b>Gassificazione con idrogeno</b> $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$		
<b>Reazione di shift</b> $CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$		
<b>Metanazione</b> $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$		
$H_2$		25-30
$CO$		30-60
$CO_2$		5-15
$H_2O$		2-30
$CH_4$		0-5
$H_2S$		0.2-1
$COS$		0-0,1
$N_2$		0,5-4
$Ar$	0,2-1	
$NH_3 + HCN$	0-0,3	
Ceneri/residui		

*Chimica della gassificazione*

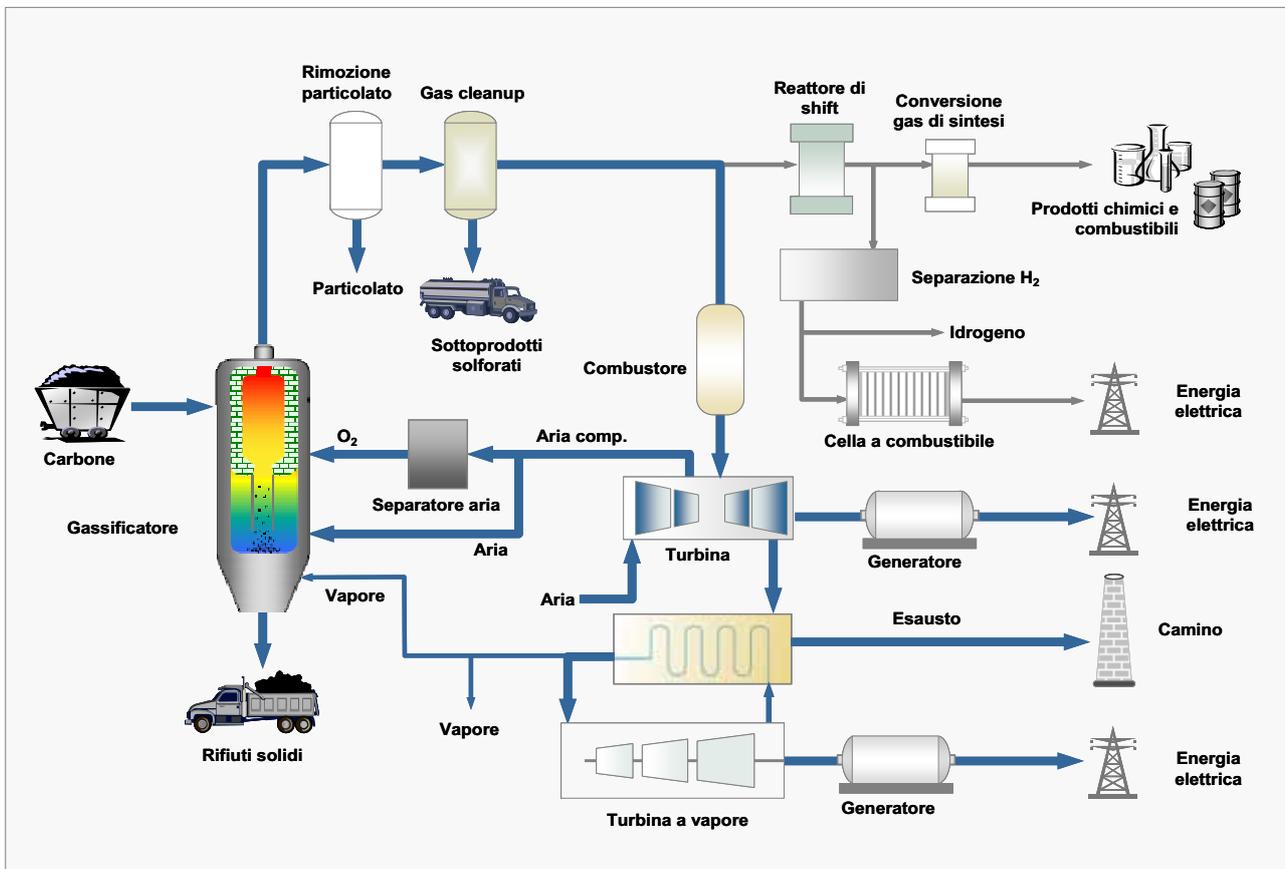


*Gassificazione - Capacità installata per tecnologia*

La tecnologia di gassificazione del carbone è considerata matura, ci sono diversi processi commerciali, con tre tecnologie che dominano il mercato (Sasol Lurgi, GE Energy e Shell).

Nonostante la percentuale di idrogeno nel gas ottenuto non sia molto elevata, attraverso la gassificazione del carbone si produce circa il 18% dell'idrogeno mondiale. Il costo dell'idrogeno prodotto con questi processi è di 10 - 12 \$/GJ con impianti di capacità dell'ordine di 100.000-200.000 Nm<sup>3</sup>/h di idrogeno.

Il gas di sintesi ottenuto dalla gassificazione può avere diversi utilizzi, purificato può essere impiegato come combustibile in impianti a ciclo combinato (IGCC) per la generazione di energia elettrica oppure come materia prima per la produzione di combustibili sintetici (metanolo, dimetiletere e benzine sintetiche) o altri prodotti chimici. L'idrogeno separato dal gas di sintesi può essere inoltre usato in celle a combustibile, turbine a gas o come carburante per i trasporti.



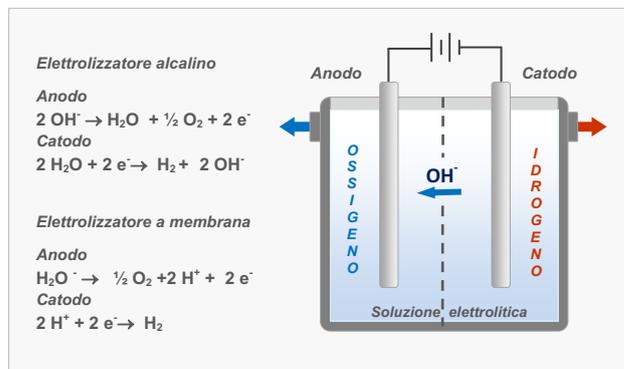
*Processo di gassificazione integrato con impianti a ciclo combinato*

Le efficienze energetiche stimate per la gassificazione del carbone sono dell'ordine del 45-60 %. Le emissioni di CO<sub>2</sub> associate al processo sono rilevanti e, a seconda dell'efficienza energetica, sono dell'ordine di 27-36 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>. Un eventuale impiego su larga scala del processo richiede perciò l'integrazione con sistema di abbattimento e confinamento della CO<sub>2</sub>. La gassificazione del carbone rimane un processo indicato per produzioni di idrogeno centralizzate, il sequestro e il confinamento della CO<sub>2</sub> in sistemi di piccola taglia risulterebbero infatti difficili e costosi.

### Elettrolisi dell'acqua

L'elettrolisi permette di separare l'acqua nei suoi costituenti usando energia elettrica. Come abbiamo accennato solo il 4% della produzione mondiale di idrogeno attualmente avviene per elettrolisi dell'acqua e solo per soddisfare richieste limitate di idrogeno ad elevata purezza. I diversi tipi di elettrolizzatori disponibili sono elencati nella seguente tabella, insieme con una breve descrizione delle loro caratteristiche.

L'efficienza teorica massima degli elettrolizzatori è intorno all'85%, ma gli elettrolizzatori attuali sono meno efficienti. In letteratura per l'intero processo di produzione a partire dal combustibile utilizzabile per generare l'energia elettrica necessaria, fino ad arrivare all'idrogeno prodotto si riportano efficienze che non superano il 40%.



### Caratteristiche delle diverse tecnologie di elettrolizzatori

Tecnologia	Elettrolizzatori alcalini		Elettrolizzatori a membrana inorganica	Elettrolizzatori a polimero solido (PEM)	Elettrolizzatori ad alta temperatura (HTE)
	Convenzionali	Avanzati			
Stadio di sviluppo	Commerciale per le grandi taglie	Prototipi e unità commerciali	Unità commerciali	Prototipi e unità commerciali	Unità da laboratorio
Elettrolita	25-35% KOH	25-40% KOH	14-15% KOH	Membrana Nafion	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub>
Temperatura, °C	70-90	80-145	90-120	80-150	900-1000
Pressione, bar	1-2	Fino a 120	Fino a 40	Fino a 400	Fino a 30
Voltaggio di cella, V	1,8-2,2	1,5-2,5	1,6-1,9	1,4-2,0	0,95-1,3
Densità di corrente, A/cm <sup>2</sup>	0,13-0,25	0,20-2,0	0,20-1,0	1,0-4,0	0,3-1,0
Efficienza di cella, JG H <sub>2</sub> /JG el	66-69	69-70	73-81	73-84	81-86
Consumo di energia, kWh/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>	4,3+4,9	3,8+4,3	4,8	3,6-4,0	2,5-3,5

Fonte: IEA 2005

L'elettrolisi è il metodo più conosciuto per la produzione di idrogeno, ma anche il meno utilizzato industrialmente per i costi ancora elevati (20-24 \$/GJ con costi dell'energia elettrica di 0,02-0,04 \$/kWh), nettamente superiori a quelli ottenuti con le tecnologie fin qui menzionate; si stima che il 70-80% del costo dell'idrogeno ottenuto per elettrolisi sia da attribuire al costo dell'elettricità. L'elettrolisi può risultare competitiva solo per piccole produzioni di idrogeno, con impianti realizzati in prossimità del sito di utenza (es. stazioni di servizio), dal momento che si evitano i costi di distribuzione ed accumulo.

Per rendere l'elettrolisi competitiva una soluzione proposta è quella di ricorrere alla tecnologia ad alta temperatura (HTE, 900-1000 °C). L'alta temperatura accelera le reazioni, riduce le perdite di energia dovute a polarizzazione degli elettrodi ed accresce l'efficienza complessiva del sistema. Il consumo di energia potrebbe essere ridotto fino al 35% rispetto agli attuali elettrolizzatori. Un elettrolizzatore a vapore che funziona a 900 °C consuma circa 3 kWh/Nm<sup>3</sup> di idrogeno prodotto contro i 4,3-5 kWh/Nm<sup>3</sup> di un elettrolizzatore convenzionale.



Norsk Hydro Electrolysers (485 Nm<sup>3</sup>/h)

Alcuni costruttori di elettrolizzatori (Hydrogenics, Norsk Hydro, Distributed Energy Systems e Teledyne Energy Systems) hanno costruito unità con capacità nell'intervallo 10-100 Nm<sup>3</sup>/h adatte alla generazione on-site. Molte delle stazioni di servizio realizzate nell'ambito dei diversi progetti dimostrativi generano idrogeno localmente attraverso un elettrolizzatore.

### Caratteristiche di alcuni elettrolizzatori commerciali

Costruttore		Tecnologia	Produzione H <sub>2</sub> [Nm <sup>3</sup> /h]	Consumo energia [kW/Nm <sup>3</sup> ]
Hydrogenics	HySTAT IMET serie 300	Membrana inorganica	1-3	4,2
	HySTAT IMET serie 1000	Membrana inorganica	4-60	4,2
Norsk Hydro Electrolysers	Inergon	PEM	10	4,4
	HPE*	Alcalina	10-60	4,8
	P atmosferica	Alcalina	60- 485	4,2
Distributed Energy Systems**	Hogen S40	PEM	1,05	6,7
	Hogen 6H	PEM	6	6,8
Teledyne Energy Systems	TITAN EC-1000	Alcalina	56	5,6
Avalence H <sub>2</sub> Energy Systems	Hydrofiller 175	Alcalina	4,6	5,4

\* Elettrolizzatori ad alta pressione

\*\* In precedenza Proton Energy Systems



Hydrogenics (HySTAT)

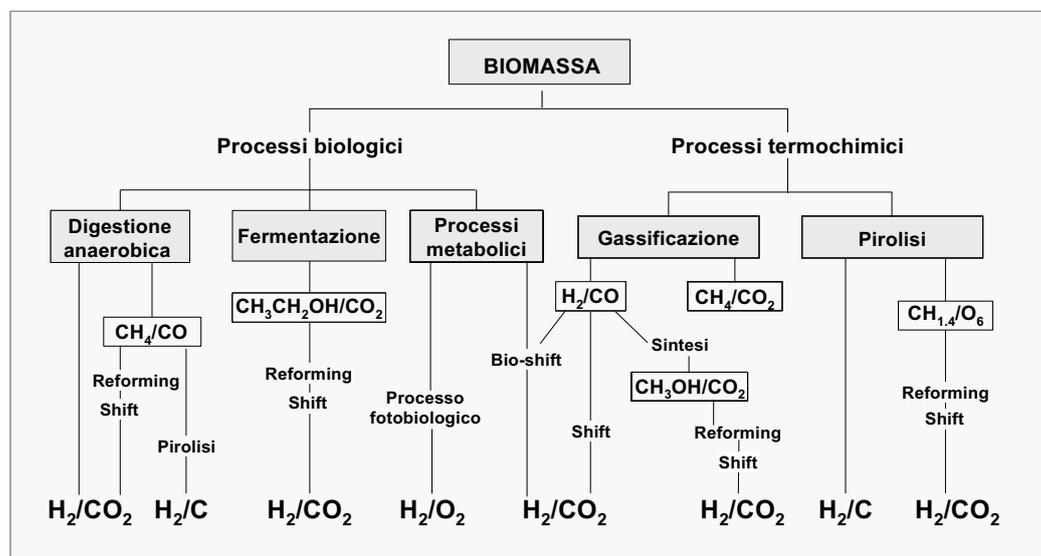


Distributed Energy Systems (Hogen Serie H e S)

### Produzione da biomasse

La produzione di idrogeno da biomasse si presenta particolarmente interessante, tuttavia nessuno dei processi proposti ha ancora raggiunto un livello di sviluppo tale da consentirne l'utilizzo su scala industriale. Le diverse tecnologie (gassificazione; pirolisi e successivo reforming della frazione liquida prodotta; produzione di etanolo e reforming dello stesso; produzione biologica attraverso processi basati su fenomeni di fotosintesi o di fermentazione) richiedono tutte, anche se a livelli diversi, un impegno notevole di ricerca e sviluppo.

La trasformazione di biomasse può avvenire per via termochimica o biochimica. La produzione di idrogeno può essere diretta o si può avere il passaggio attraverso prodotti intermedi, solidi o liquidi, che possono essere più facilmente accumulati e trasportati.



Produzione di idrogeno d biomasse

Il processo di **gassificazione**, come abbiamo già visto per il carbone, consiste nella trasformazione di un combustibile solido, in questo caso la biomassa, in gas di sintesi tramite ossidazione parziale con l'ossigeno o aria effettuata con l'apporto di calore necessario allo svolgimento del processo endotermico. Il calore (si opera a temperature intorno a 700-900 °C) può essere fornito attraverso la combustione di parte della biomassa all'interno dello stesso reattore o da una fonte energetica esterna. Il gas prodotto è costituito principalmente da monossido di carbonio, idrogeno ed idrocarburi leggeri. Abbiamo inoltre componenti non volatili costituiti dall'eventuale azoto presente nell'aria, ossidi di azoto derivati dall'ossidazione dell'azoto

legato alla biomassa, anidride carbonica e vapor d'acqua e ridotte quantità di composti solforati e di alogeni. La proporzione tra i vari componenti varia notevolmente in funzione del tipo di gassificatore e del materiale di partenza (materiali e residui di origine agricola e forestale, prodotti secondari dell'industria agro-alimentare, i reflui di origine zootecnica, rifiuti urbani).

La gassificazione di biomasse nelle sue varie configurazioni è già da tempo a livello dimostrativo o commerciale.

La produzione diretta di idrogeno dalla biomassa è, rispetto ad altre tecnologie di produzione, svantaggiata dal minore contenuto presente nella materia prima (circa il 6% contro il 25% del metano). Analisi effettuate negli Stati Uniti per impianti con produttività massima di 250.000 m<sup>3</sup>/giorno, valutano costi di produzione variabili dai 10 ai 15 \$/GJ, per un costo della biomassa secca compreso tra 16 e 46 \$/t. Per impianti di taglia cinque volte inferiori, i costi corrispondenti di idrogeno si portano a valori di 14-20 \$/GJ.

Queste cifre non tengono conto dei vantaggi ambientali derivanti dall'uso della biomasse. Ricordiamo che l'anidride carbonica emessa nella conversione delle biomasse, non contribuisce ad aumentare la quantità totale di gas serra nell'atmosfera. La CO<sub>2</sub> è assorbita dalle biomasse durante la crescita e solo la stessa quantità viene rilasciata nell'aria durante il processo di conversione.

Metodo alternativo di produzione di idrogeno da biomasse è la **pirolisi**. Il processo di pirolisi opera una decomposizione della biomassa in atmosfera inerte ad alte temperature (400÷800 °C), per formare un "bio-olio" sintetico costituito da sostanze organiche ossigenate, per l'85%, e acqua, per il 15%. Il bio-olio quindi, viene sottoposto al processo usuale di steam reforming per la produzione di idrogeno. Il calore necessario per il processo, in parte viene dall'esterno, in parte viene prodotto internamente alla massa mediante la combustione di una sua parte.

Attraverso la pirolisi si trasforma un combustibile a bassa densità energetica (12.5-16.5 MJ/kg) e di difficile gestione, dal punto di vista del trasporto ed immagazzinamento, quale è la biomassa, in un prodotto a più elevato contenuto energetico (21-25 MJ/kg) più facilmente gestibile, riducendone di conseguenza i costi. In tal modo è possibile ipotizzare l'installazione di una serie di piccoli impianti distribuiti sul territorio che producono il bio-olio, per poi trasportarlo in impianti per la produzione di idrogeno centralizzati di grande taglia, la cui collocazione sarebbe individuata non in funzione della disponibilità della materia prima, ma in base alla richiesta di idrogeno.

Il processo attualmente più vicino alla fattibilità commerciale è quello della fast pirolisi.

I processi biochimici, sui quali non ci soffermeremo, sfruttano invece l'azione di enzimi, funghi e microrganismi, che si formano nella biomassa sotto particolari condizioni, e vengono impiegati per quelle biomasse in cui il rapporto carbonio/azoto sia inferiore a 30 e l'umidità alla raccolta superiore al 30%.

### Produzione da fonti rinnovabili

Nel lungo termine l'idrogeno potrà essere ottenuto per elettrolisi utilizzando energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili (solare, eolico, idroelettrico, geotermico) o attraverso termolisi che consiste nella scissione dell'acqua nei suoi costituenti ad elevate temperature.

Attualmente l'idrogeno prodotto per elettrolisi dell'acqua in impianti alimentati con fonti rinnovabili non è economicamente competitivo non soltanto rispetto a quello prodotto da combustibili fossili, ma anche rispetto a quello ottenuto attraverso elettrolisi tradizionale. L'elettrolisi a partire da energia prodotta da sorgenti rinnovabili nonostante gli evidenti vantaggi ambientali, si presenta ancora poco efficiente dal punto di vista energetico. Questa soluzione non appare quindi oggi

### Processi di pirolisi

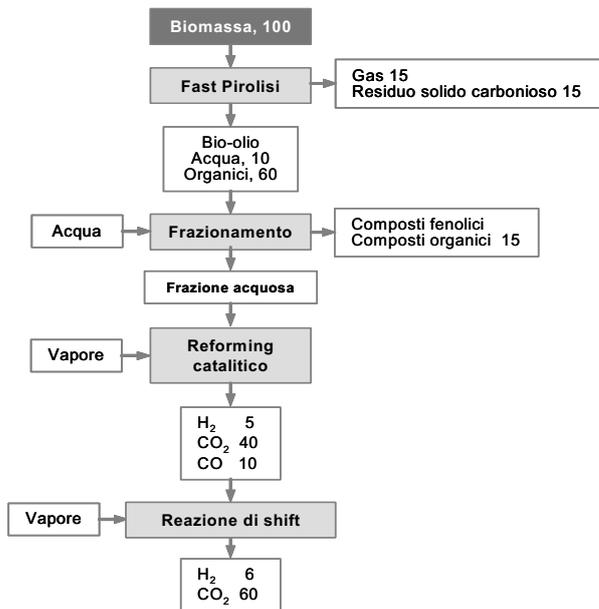
La **pirolisi lenta**, che avviene a basse temperature e con lunghi tempi di permanenza in ambiente povero d'ossigeno. Produce maggiormente carbone avente peso pari al 30% di quello della biomassa di partenza. Se il prodotto di partenza è legna la pirolisi è detta **carbonizzazione**.

La **fast pirolisi**, condotta ad una temperatura relativamente bassa (tra 500 e 650 °C) e tempo relativamente breve, produce principalmente liquidi (fino fino al 70-80% in peso del materiale organico alimentato). Questi oli dovranno subire ulteriori processi per ottenere un prodotto detto "bio-olio".

La **flash pirolisi**, condotta ad una temperatura molto elevata (temperatura superiore ai 650 °C) e tempi di permanenza inferiori al secondo, produce principalmente gas, composto da idrogeno, monossido di carbonio e da una piccola percentuale di anidride carbonica.

La **pirolisi convenzionale** dà origine a prodotti gassosi, liquidi e solidi in proporzioni più o meno uguali.

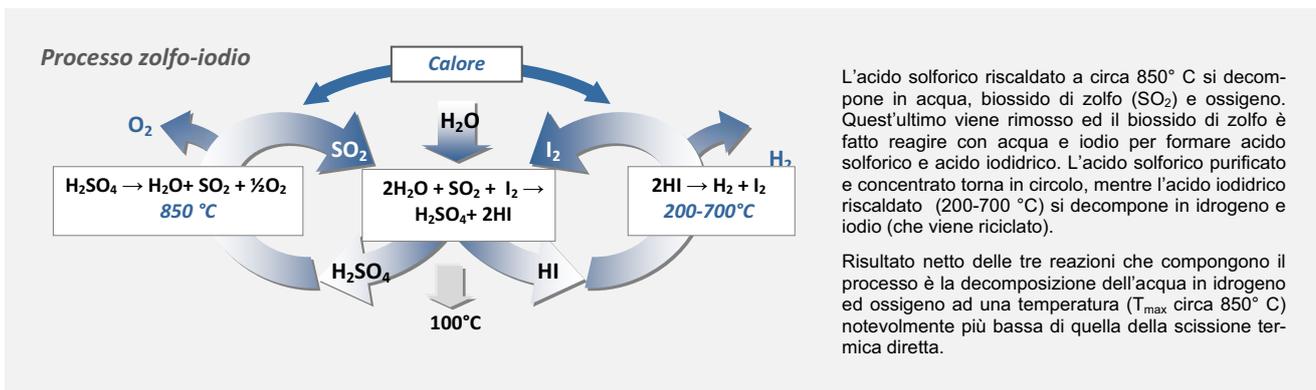
### Bilancio di massa del processo di produzione di idrogeno attraverso "fast pirolisi"



perseguibile se non per applicazioni particolari (aree remote isolate dalla rete elettrica o impieghi a fini dimostrativi) e su piccola scala (es. produzione di idrogeno presso stazioni di rifornimento).

La produzione di idrogeno a partire dalla **dissociazione termica dell'acqua**, è un processo termodinamicamente possibile solo ad elevate temperature (superiori ai 2500 °C) e che presenta difficoltà nella separazione dell'ossigeno ed dell'idrogeno, una volta che questi si sono formati. L'impiego di processi termochimici (**termolisi indiretta**) consente di ridurre notevolmente le temperature di reazione (sino a 800-1500 °C) e di effettuare la separazione dell'idrogeno e dell'ossigeno in fasi diverse del ciclo, aumentando il rendimento globale del sistema. Ciascun processo termochimico è costituito da una serie di reazioni che coinvolgono composti intermedi di natura diversa, fino alla dissociazione dell'acqua.

Sono stati analizzati circa 150 cicli termochimici, che in teoria potrebbero essere usati per generare idrogeno utilizzando calore ad alta temperatura prodotto da impianti solari a concentrazione o da reattori nucleari di nuova generazione, ma solo una decina sono stati giudicati interessanti e divenuti oggetto di ulteriori indagini. Tra questi il ciclo delle ferriti miste e quello zolfo-iodio, forse il più studiato a livello mondiale e quindi ad un livello di sviluppo più avanzato rispetto agli altri.



Tra i processi di produzione di idrogeno validi per il lungo termine, essendo ancora in fase di ricerca di laboratorio, si ricordano i **processi fotolitici** che impiegano energia solare per decomporre l'acqua nei suoi componenti. Nei processi fotobiologici l'idrogeno viene prodotto dall'acqua usando luce solare e alcuni micro-organismi specializzati (come alghe verdi e cianobatteri). Questi assorbono l'energia solare e gli enzimi delle cellule agiscono da catalizzatori, per dissociare l'acqua in idrogeno ed ossigeno.

Nei processi fotoelettrochimici invece si utilizza la tecnologia dei semiconduttori ed in un processo ad un solo stadio si decompone l'acqua nei suoi costituenti sfruttando la luce solare. In pratica nel sistema si combina una cella fotovoltaica (materiale che produce corrente elettrica se esposto alla luce) ed un elettrolizzatore.

## ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

ACEA	European Automobile Manufacturers' Association
ADG	Gas da digestore anaerobico
AFC	Alkaline fuel cell
AFCo	Ansaldo Fuel Cells
AFRL	Air Force Research Laboratory
APU	Auxiliary power system
ARL	Army Research Laboratory
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ATR	Reforming autotermico
BC	British Columbia
CaFCP	California Fuel Cell Partnership
CARB	California Air Resources Board
CE	European Conformity
CEN	European Committee for Standardization
CERDEC	Communications, Electronics Research Development and Engineering Center
CERL	Construction Engineering Research Laboratory
CHP	Combined heat and power
CO	Monossido di carbonio
CSA	Canadian Standards Association
DARPA	Defence Advanced Research Projects Agency
DFC	Direct fuel cell
DFRC	Dryden Flight Research Center
DMFC	Direct methanol fuel cell
DoD	Department of Defense
DoE	Department of Energy
EERE	Office of Energy Efficiency and Renewable del DoE
EPA	Environmental Protection Agency
EPFC	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
ERDC	Engineer Research and Development Center
EVD	Deposizione elettrochimica in fase vapore
FCE	FuelCell Energy
FC1	Certificazione per sistemi stazionari a celle a combustibile
FE	Office of Fossil Energy del DoE
FELIN	Fantassin à Equipements et Liaisons Intégrés
FISR	Fondo integrative Speciale per la Ricerca
FTA	Federal Transit Administration
GN	Gs naturale
GPU	Unità di purificazione gas
HDW	Howaldtswerke-Deutsche Werft
HES	Home energy station
HFCIT	Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies
HHV	High heat value (potere calorifico superiore)
HOD	Hydrogen on Demand
HPD	High Power Density
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
ITAE	Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia
JARI	Japan Automobile Research Institute
JTI	Joint Technology Initiative

KEPRI	Korean Electric Power Research Institute
KIST	Korea Institute of Science and Technology
LBST	Ludwig-Bölkow Systemtechnik
LHV	Low heat value (potere calorifico inferiore)
MCFC	Molten carbonate fuel cell
MEA	Assemblato membrana/elettrodi
MEGA	Membrane electrode gasket assembly
MHI	Mitsubishi Heavy industries
MIR	Modular Integrated Reformer
MOCIE	Ministero dell'Industria, Commercio ed Energia della Corea del Sud
MOST	Ministero della Ricerca della Corea del Sud
NAC	National Automotive Center
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organisation
NEF	New Energy Foundation
NETL	National Energy Technology Laboratory
NiMH	Nichel idruri metallici
NYPA	New York Power Authority
NREL	National Renewable Energy Laboratory
ONR	Office of Naval Research
PDA	Personal data assistance
PQ	Programma Quadro della Commissione Europea
PSA	Pressure-swing adsorption
PAFC	Phosphoric acid fuel cell
PCI	Potere calorifico inferiore
PEFC	Polymer electrolyte fuel cell
PNGV	Partnership for a New Generation Vehicles
POX	Ossidazione parziale
PROX	Ossidazione preferenziale
PSA	Pressure swing adsorption
SECA	Solid State Energy Conversion Alliance
SOFC	Solid oxide fuel cell
TFCP	Toshiba Fuel Cells Power Systems
TG	Turbina a gas
TÜV	Technischer Überwachungs-Verein (Associazione di Controllo Tecnico)
UAV	Unmanned aerial vehicle
UE	Unione Europea
UPS	Uninterruptible power supply
UUV	Unmanned Undersea Vehicle
WMATA	Washington Metropolitan Area Transit Authority
ZEV	Veicolo ad emissioni zero

$\Delta E$	Differenza di potenziale
$\Delta G$	Energia libera di Gibbs
$\Delta H$	Entalpia di reazione
$\Delta H_c$	Calore disponibile dal combustibile
$\Delta S$	entropia di reazione
<b>b</b>	Pendenza di Tafel
$C_b$	Concentrazione di bulk
$C_s$	Concentrazione sulla superficie dell'elettrodo
<b>D</b>	Coefficiente di diffusione
<b>e-</b>	Elettrone

$E_{rev}$	Potenziale reversibile di cella
$E^\circ$	Potenziale standard
$F$	Costante di Faraday
<b>GW</b>	Gigawatt
<b>h</b>	Ora
<b>I</b>	Corrente
$i$	Densità di corrente
$i_L$	Densità di corrente limite
$i_o$	Densità di corrente di scambio
<b>K</b>	Costante di equilibrio
<b>kW</b>	kilowatt
<b>mol</b>	Mole
<b>MW</b>	Megawatt
<b>MWh</b>	Megawatt-ora
$n$	Numero di elettroni partecipanti alla reazione
<b>P</b>	Pressione
<b>ppm</b>	Parti per milione
<b>Q</b>	Calore
<b>R</b>	Resistenza di cella
<b>R</b>	Costante universale dei gas
<b>T</b>	Temperatura
<b>U</b>	Utilizzazione
<b>V</b>	Tensione di cella
<b>V</b>	Volume
$\alpha$	Coefficiente di trasferimento di carica
$\delta$	Spessore dello strato di diffusione
$\epsilon_T$	Rendimento termodinamico
$\epsilon_v$	Rendimento di tensione
$\epsilon_i$	Rendimento di corrente
$\epsilon_{cella}$	Rendimento di cella
$\eta_{att}$	Polarizzazione di attivazione
$\eta_{conc}$	Polarizzazione di concentrazione
$\eta_{ohm}$	Polarizzazione ohmica

## RIFERIMENTI

- Fuel Cell Handbook (7<sup>a</sup> edizione), U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory (NETL), novembre 2004.
- Abstract del 2006 Fuel Cell Seminar, Honolulu, Hawaii (USA), 13-17 novembre 2006
- Abstract del 2007 Fuel Cell Seminar, San Antonio, Texas (USA), 15-19 ottobre 2007
- Proceeding del 10<sup>th</sup> Grove Fuel Cell Symposium, London, (UK), 25-27 settembre 2007.
- Proceeding of the 2<sup>nd</sup> European Fuel Cell Technology and Application Conference, Roma (Italia) Dicembre 2007.
- FY 2006 Progress Report for the DOE Hydrogen Program, November 2006. [http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_progress06.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress06.html)
- FY 2007 Progress Report for the DOE Hydrogen Program, November 2007. [http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_progress07.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress07.html)
- "Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program", Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan: Planned Program Activities for 2005-2015, October 2007. <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp/index.html>
- Proceeding del 2007 Annual Merit Review, Arlington (Virginia). May 15-18, 2007, [http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_review07\\_proceedings.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review07_proceedings.html)
- FreedomCAR and Vehicle Technologies (FCVT) Multi-Year Program Plan [http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/fcvt\\_mypp.html](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/fcvt_mypp.html)
- National Energy Technology Laboratory, 2007 Office of Fossil Energy Fuel Cell Program Annual Report, DOE/NETL, agosto 2007
- National Energy Technology Laboratory, SECA 8<sup>th</sup> Annual Workshop, DOE/NETL, 7-9 agosto 2007
- NEDO, 2006 Fuel Cell/Hydrogen Technology Development Roadmap, aprile 2006 <http://www.fuelcelltoday.com/events/archive/2006-11/2006-Fuel-Cell-Hydrogen-Technolo>
- H2FC RD & D Program II, National RD & D Organization for Hydrogen & Fuel Cell (Corea), Agosto 2007, <http://www.h2fc.or.kr>
- Commissione Europea, "Hydrogen Energy and Fuel Cells - A vision of our future", 2003 <https://www.hfpeurope.org/hfp/keydocs>
- European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform - Deployment Strategy, <https://www.hfpeurope.org/hfp/keydocs>
- European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform - Strategic Research Agenda. <https://www.hfpeurope.org/hfp/keydocs>
- European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform, Implementation Plan - Marzo 2007, [https://www.hfpeurope.org/uploads/2097/HFP\\_IP06\\_FINAL\\_20APR2007.pdf](https://www.hfpeurope.org/uploads/2097/HFP_IP06_FINAL_20APR2007.pdf)
- Commissione Europea, Libro verde: una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura, COM(2006)105 def., Marzo 2006, <http://europa.eu/scadplus/leg/it/lvb/l27062.htm>
- "Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European Context", CONCAWE, EUCAR, EC DG JRC, Dicembre 2005 e Versione 2c Marzo 2007.
- Sixth Framework Programme, <http://www.cordis.lu/fp6/projects.htm>
- International Energy Agency "Prospects for Hydrogen and Fuel Cells", Dicembre 2005.
- "Canadian Hydrogen and Fuel Cell Sector Profile 2006 (Survey del Government of Canada", Hydrogen & Fuel Cells Canada e PricewaterhouseCoopers. <http://www.hydrogeneconomy.gc.ca>
- "Distributed Energy Resources Emissions Survey and Technology Characterization", E2I, Palo Alto, CA, Ameren, St. Louis, MO, California Energy Commission, Sacramento, CA, New York Independent System Operator, Albany, NY, and New York Power Authority, White Plains, NY:2004. 1011256.
- European Federation for Transport and Environment, "Reducing CO<sub>2</sub> emissions from new cars", 2006 progress report on the car industry's voluntary commitment, Settembre 2007. <http://www.transportenvironment.org/Article459.html>
- COM(2007) 19 "Risultati del riesame della strategia comunitaria per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> delle autovetture e dei veicoli commerciali leggeri", 7 febbraio 2007
- GM Well-to-Wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of Advanced Fuel/vehicle systems – A European study, Rapporto LBST, Settembre 2002.
- Proceeding del 8<sup>th</sup> Annual International Symposium "Small Fuel Cells 2006", Washington, 3-4 Aprile 2006
- K. Cowey, K.J. Green, G.O. Mepsted, R. Reeve, "Portable and military fuel cells", Solid State & Material Science 8 (2004) 367.
- S. Patil, T. G. Dubois, N. Sifer, E. Bostic, K. Gardner, M. Quah, C. Bolton "Portable fuel cell systems for America's army: technology transition to the field", J. Power Sources 136 (2004) 220-225.

Rapporto "Meeting the Energy Needs of Future Warriors", National Academies Press (Washington, DC), 2004. <http://www.nap.edu>

G. Crawley, "Fuel Cell Today 2007 Military Survey", Maggio 2007, <http://www.fuelcelltoday.com>

L. Eudy, K. Chandler, C. Gikakis, "Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Summary of Experiences and Current Status", Rapporto NREL/TP-560-41967, Settembre 2007

L. Eudy, K. Chandler, "Hickam Air Force Base Fuel Cell Vehicles: Early Implementation Experience", Rapporto NREL/TP-560-42233, Ottobre 2007

K. Chandler, L. Eudy, "AC Transit Fuel Cell Transit Buses: Evaluation Results Update", Rapporto NREL/TP-560-42249, Ottobre 2007

K. Chandler, L. Eudy, "SunLine Transit Agency, Hydrogen-Powered Transit Buses: Evaluation Results Update", Rapporto NREL/TP-560-42080, Settembre 2007

K. Wipke, S. Sprick, J. Kurtz, e H. Thomas, "Learning Demonstration Progress Report-September 2007", Rapporto NREL/TP-560-42264, Novembre 2007

On-board fuel processing Go/no-Go decision, DoE Decision Team Committee Report, Agosto 2004  
[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/committee\\_report.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/committee_report.pdf)

S. Satyapal, J. Petrovic, C. Read, G.Thomas, G. Ordaz, "The U.S. Department of Energy's National Hydrogen Storage Project: Progress towards meeting hydrogen-powered vehicle requirements", Catalysis Today 120 (2007) 246–256

J. X. Weinerte, T.E. Lipman "An assessment of the near-term costs of hydrogen refueling stations and station components", Rapporto UCD-ITS-RR-06-03, gennaio 2006.

T.E. Lipman, "What Will Power the Hydrogen Economy? Present and Future Sources of Hydrogen Energy", Rapporto UCD-ITS-RR-04-10, Luglio 2004

J. Ivy, "Summary of Electrolytic Hydrogen Production", Rapporto NREL/MP-560-35948, Settembre 2004

T. A. Milne, C. C. Elam, and R. J. Evans, , "Hydrogen from Biomass: State of the Art and Research Challenges," Rapporto IEA/H2/TR-02/001, 2001

"The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs", National Research Council Report, 2004,  
<http://www.nap.edu/catalog/10922.htm>

## SITI WEB

ACEA

<http://www.acea.be>

Air Force Research Laboratory (AFRL)

<http://www.afrl.af.mil/>

Army Research Laboratory (ARL)

<http://www.arl.army.mil/main/main/default.htm>

California Air Resources Board, "Distributed Generation Certified Technologies"

<http://www.arb.ca.gov/energy/dg/dg.htm>

Defense Advanced Research Project Agency

<http://www.darpa.mil/index.html>

ERDC/CERL – Attività sulle celle a combustibile

<http://dodfuelcell.cecer.army.mil/intro.html>

Fuel Cells 2000

<http://www.fuelcells.org>

Fuel Cells Today

<http://www.fuelcelltoday.com>

NASA Glenn Research Center

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/Electrochemistry/doc/fuelcellapps.html>

National Energy Technology Laboratory

<http://www.netl.gov>

National Hydrogen Association

[www.hydrogenassociation.org](http://www.hydrogenassociation.org)

Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) - Attività

NEDO <http://www.nedo.go.jp/english/activities/index.html>

Office of Naval Research (ONR)

<http://www.onr.navy.mil>

Adaptive Materials inc

<http://www.adaptivematerials.com>

AeroVironment

<http://www.aerovironment.com>

Ansaldo Fuel Cells

<http://www.ansaldofuelcells.com>

Arcotronics Fuel Cells  
<http://www.arcotronicsfuelcells.com>

Axane  
<http://www.axane.net>

Ballard Power Systems  
<http://www.ballard.com>

BC transit  
<http://www.bctransit.com>

Ceramic Fuel Cells  
<http://www.cfcl.com.au>

Cesi Ricerca  
<http://www.cesiricerca.it>

CFC Solution  
<http://www.cfc-solutions.com>

CNR-ITAE  
<http://www.itae.cnr.it>

CRF Centro Ricerche FIAT  
<http://www.crf.it>

Daimler AG  
<http://www.daimler.com>

ENEA  
<http://www.enea.it>

Ford Motor Co.  
<http://www.ford.com>

FuelCell Energy  
<http://www.fce.com>

Fuji Electric Co., Ltd.  
<http://www.fujielectric.co.jp/eng>

Fuelcell Propulsion Institute  
[www.fuelcellpropulsion.org](http://www.fuelcellpropulsion.org)

General Electric  
<http://www.gm.com>

General Hydrogen Corp.  
<http://www.generalhydrogen.com>

General Motors  
[http://www.gm.com/explore/technology/news/2007/fuel\\_cells/index.jsp](http://www.gm.com/explore/technology/news/2007/fuel_cells/index.jsp)

Georgetown University  
<http://fuelcellbus.georgetown.edu>

Hexis AG  
[http://www.hexis.com/index\\_e.htm](http://www.hexis.com/index_e.htm)

Hitachi, Ltd  
<http://www.hitachi.com/>

Howaldtswerke-Deutsche Werft Ag  
[http://www.hdw.de/index\\_en.php?](http://www.hdw.de/index_en.php?)

Honda Motor Co  
<http://world.honda.com>

Hydrocell  
<http://www.hydrocell.fi/en/index.html>

Hydrogenics Corp  
<http://www.hydrogenics.com>

Hyundai Motor Co  
<http://www.hyundai-motor.com>

IdaTech  
<http://www.idatech.com/>

Idemitsu Kosan Co., Ltd.  
<http://www.idemitsu.co.jp/e>

Intelligent Energy Limited  
<http://www.intelligent-energy.com>

Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability  
<http://ies.jrc.ec.europa.eu>

Ludwig-Bölkow Systemtechnik  
<http://www.lbst.de>

Los Alamos National Laboratory  
<http://www.lanl.gov>

Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)  
<http://www.kepri.re.kr>

Korea Institute of Energy Research (KIER)  
<http://nfcrc.kier.re.kr>

Korea Institute of Science and Technology (KIST)  
<http://www.kist.re.kr>

Medis Technologies  
<http://www.medistechnologies.com/index.asp>

Mesoscopic Devices  
<http://www.mesoscopic.com>

Millennium Cell  
<http://www.millenniumcell.com>

MTI Micro  
<http://www.mtimicrofuelcells.com/company/>

NanoDynamics  
<http://www.nanodynamics.com>

Neah Power Systems  
<http://www.nanodynamics.com>

Nedstack  
<http://www.nedstack.com>

Nippon Oil Corp.  
<http://www.eneos.co.jp/english>

Nissan Motors Co.  
<http://www.nissan.co.jp/EN>

NuCellSys  
<http://www.nucellsys.com>

Nuvera Fuel cells  
<http://www.nuvera.com>

Osaka Gas Co., Ltd.  
<http://www.osakagas.co.jp/indexe.htm>

Panasonic / Matsushita Electric Industrial Co.  
<http://panasonic.co.jp/appliance/global/FC/index.htm>

Psa Peugeot Citroen  
[http://www.psa-peugeot-citroen.com/en/psa\\_group/research\\_development\\_b3.php](http://www.psa-peugeot-citroen.com/en/psa_group/research_development_b3.php)

Protonex Technology Corp.  
<http://www.protonex.com>

Proton Motor Fuel Cell GmbH  
[www.proton-motor.de](http://www.proton-motor.de)

ReliOn  
<http://www.relion-inc.com>

Samsung  
<http://www.sait.samsung.com/eng/main.jsp>

Sanyo Electric Co., Ltd.  
<http://www.sanyo.co.jp>

Siemens AG  
<http://www.siemens.de>

Smart Fuel Cell  
<http://www.smartfuelcell.com>

Tokyo Gas Co., Ltd  
[http://www.tokyo-gas.co.jp/index\\_e.html](http://www.tokyo-gas.co.jp/index_e.html)

Toshiba Corp.  
<http://www.toshiba.co.jp/explore/en/no4/index.html>

Toyota Motor Co  
<http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/fchv/>

UltraCell Corporation  
<http://www.ultracellpower.com>

UTC Power  
<http://www.utc.com>

Vaillant GmbH  
<http://www.vaillant.com>

VersaPower  
<http://www.versa-power.com>

Voller Energy  
<http://www.voller.com>

Wärtsilä  
<http://www.wartsila.com/>

ZTek  
<http://www.ztekccorporation.com>

ARGEMUC Project  
<http://www.argemuc.com>

California Fuel Cell Partnership  
<http://www.cafcp.com>

CEP - Clean Energy Partnership  
<http://www.cep-berlin.de>

GEF Fuel Cell Bus Demonstration Project  
<http://www.undp.org/gef/fuel-cell/index.html>

Hydrogen, Fuel Cell & infrastructure Technologies Program  
<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/>

Hydrogen Highway Program  
<http://www.hydrogenhighway.ca>

Hydrogen Village  
<http://www.hydrogenvillage.ca>

Progetto EOS  
<http://www.eos.polito.it/home.htm>

Progetto HYCHAIN Mini-Trans  
<http://www.hychain.org>

Progetto HyFleet:CUTE  
<http://www.global-hydrogen-bus-platform.com>

Progetto NessHy  
<http://www.nhy.net>

Progetto StorHy  
<http://www.storhy.net>

Progetto Zero Regio  
<http://www.zeroregio.com>

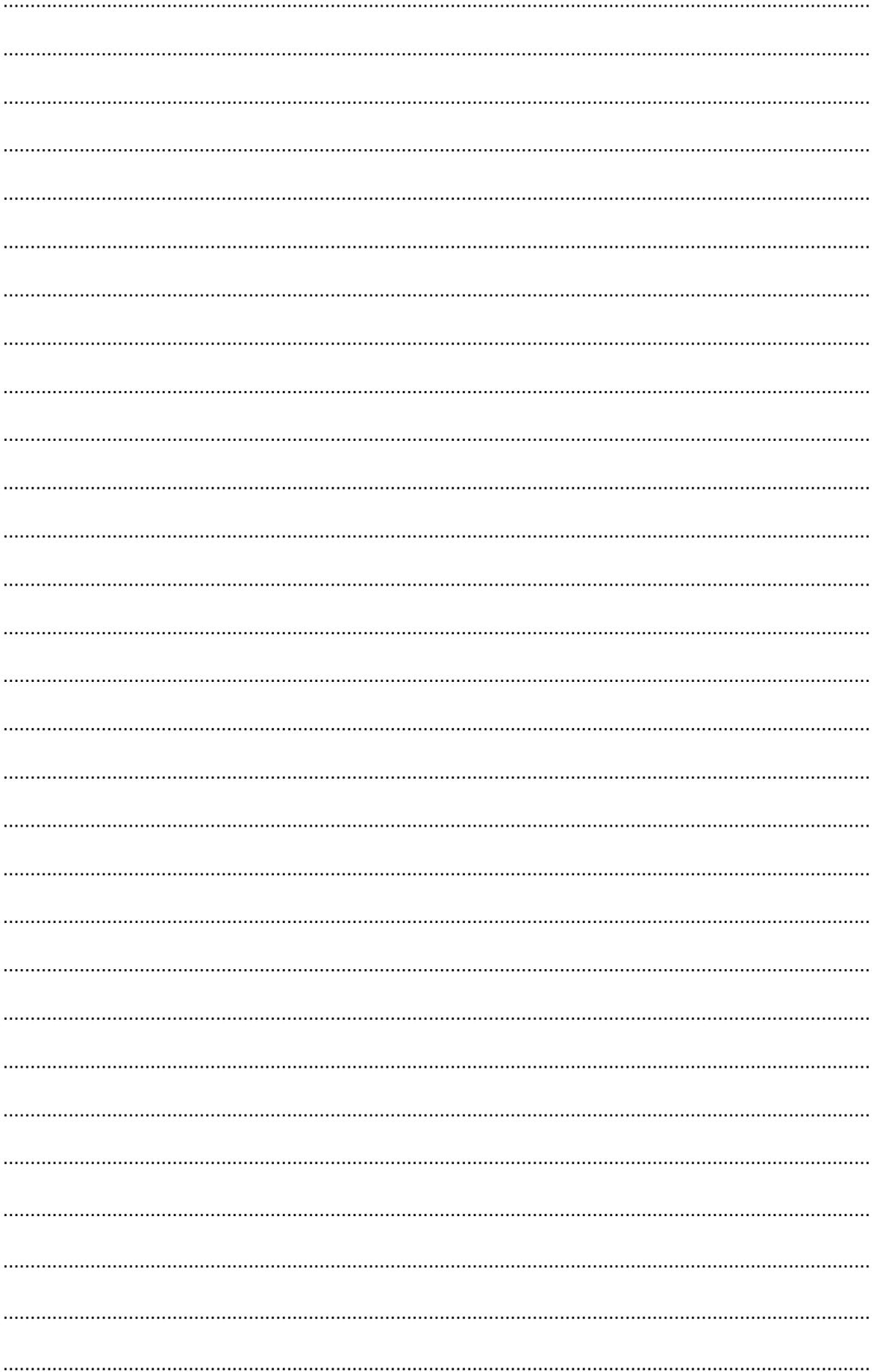
Japan Hydrogen & Fuel Cell (JHFC) Project  
<http://www.jhfc.jp/e/index.html>

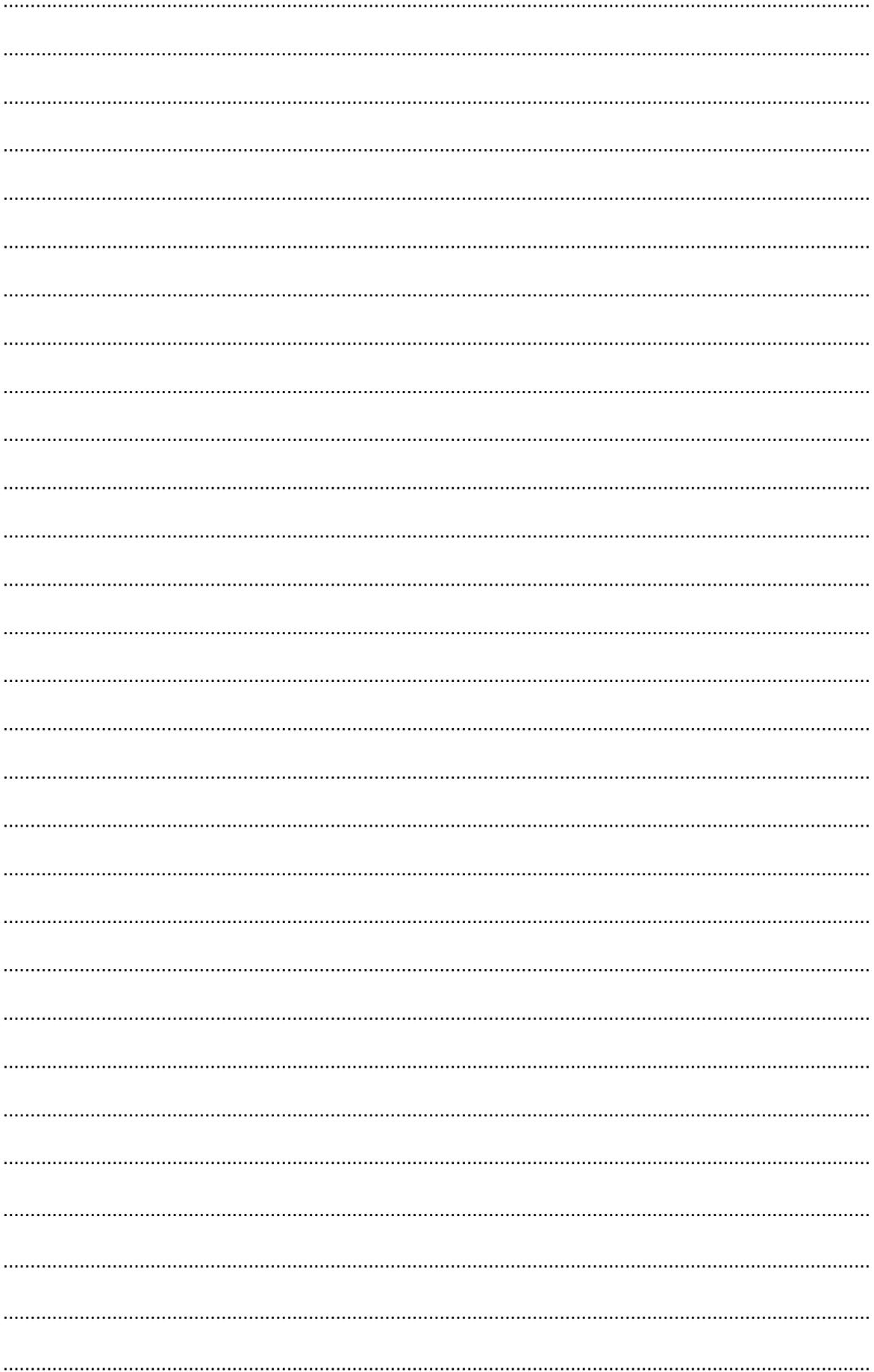
Vancouver Fuel Cell Vehicle Program  
<http://www.vfcvp.gc.ca>

Le fotografie degli impianti di generazione di potenza stazionaria e dei veicoli con celle a combustibile riportate nel documento appartengono alle società ed istituzioni sotto elencate e sono state tratte dai loro siti web.

Acumentrics: p. 128-129, 137. Adaptive Materials Inc: p. 129. Air Products: p. 88. Aprilia: p. 100. Astris Energi: p. 139. Ballard Power Systems: p. 37-38, 53, 66. Ceramics Fuel Cells: p. 129-130. Daimler AG: p. 55-57, 72, 74. CFC Solutions: p. 114-115. Distributed Energy Systems: p. 154. DoE/EERE: p. 66, 69, 71. DoE/NETL: p. 130. Electro Power Systems: 97. Eni: p. 74, 87. Ford Motors Co.: p. 57-58. FuelCell Energy: p.110-112. Fuelcell Propulsion Institute: p. 91. Fuji Electric Advanced Technology: p. 105. Gen Cell: p. 111. General Motors/Opel: p. 38-39, 53, 59-61. Hexis: p. 125, 131. Honda: p. 15, 43, 54, 61-62, 88. HydroGen LLC: p. 104. Hydrogenics: p. 39, 54, 67, 90, 154. HysyLab: p. 97. Hyundai Motor Co.: p.62. HyWeb: p. 68. Idatech: p. 40. Idemitsu Kosan Co.: p. 40. Intelligent Energy: p. 41,91. Ishikawajima-Harima Heavy Industries: p. 113. JHFC: p. 6, 87-88. Kansai Electric Power Co.: p. 133. Kyocera Corp: p. 131. Linde AG: p. 81, 149. Los Alamos National Laboratory : p. 141. MAN: 68. Mesoscopic Devices: p. 132, 141. Millenium Cell: 44. Mitsubishi Heavy Industries: p. 132. MTI Micro Fuel Cell: p. 142-143. NanoDynamics Inc.; p. 133. Neah: 143. NEDO/METI: p. 113. Nedstack: p. 41. Neoplan: p. 68. Nissan: p 63. Norsk Hydro: p. 153. Nuvera Fuel Cells: p. 41-42, 53, 79, 92-93. Ovonics: p. 82. Plug Power: p. 43. Protonex Technology Corp: p. 44. PSA/Peugeot/Citroen: p. 64. Quantum Technology: p. 80. ReliOn: p. 45. Rolls Royce: p. 125, 134. Siemens Power Systems: p. 90-91, 124, 127-128. Smart Fuel Cells: p. 16, 143. SOFCPower: p. 136. Tokyo Gas: p. 45,134. Toto ltd.: p. 134. Toshiba Corp.: p. 144. Toyota: p. 65, 69, 90. TurboCare : p. 136. UltraCell Corp. : p. 144. UTC Power: p. 12, 46, 54, 102-104, 105. Vaillant: p. 46-47. Versa Power Systems : p. 134. Volkswagen: p. 66. Voller: p. 16, 47. Wärtsilä Corp.: p. 135. Ztek: p. 135.







Edito dall'ENEA  
Unità Comunicazione  
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma  
[www.enea.it](http://www.enea.it)  
Edizione del volume a cura di Giuliano Ghisu  
Stampa: Primaprint Srl (Viterbo)  
Finito di stampare nel mese di febbraio 2008