

ENEA

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



CELLE A COMBUSTIBILE

**Stato di sviluppo e
prospettive della tecnologia**

M. Ronchetti, A. Iacobazzi



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

CELLE A COMBUSTIBILE

Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia

Marina Ronchetti, Agostino Iacobazzi

Grande Progetto Idrogeno e Celle a Combustibile

Febbraio 2002

Celle a combustibile – Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia

Agostino Iacobazzi, Marina Ronchetti

2002 ENEA
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 - Roma

ISBN 88-8286-020-5

Il volume riflette l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'ENEA

PREMESSA

Le celle a combustibile stanno ricevendo notevole attenzione in quanto sono in grado di generare energia elettrica in modo efficiente e nel pieno rispetto dei più restrittivi vincoli ambientali. La possibilità che hanno questi sistemi di utilizzare diversi combustibili di partenza, le elevate efficienze di conversione e le ottime caratteristiche ambientali consentono un contenimento dei consumi energetici ed al tempo stesso possono contribuire in maniera significativa al raggiungimento degli impegni assunti con la sottoscrizione del Protocollo di Kyoto, per quanto riguarda la riduzione delle emissioni di gas serra.

Il rapporto, a carattere divulgativo, presenta lo stato di sviluppo delle diverse tecnologie di cella ed una panoramica dei risultati ottenuti dalle principali industrie ed organizzazioni che operano nel settore.

*Gli autori desiderano ringraziare
per il gentile contributo fornito:*

Ansaldo Fuel Cells SpA

Aprilia SpA

Centro Ricerche FIAT

Istituto CNR-TAE

Nuvera Fuel Cells Europe Srl

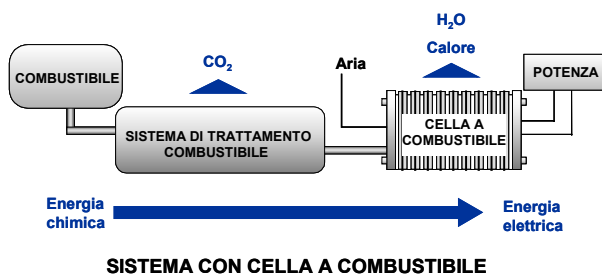
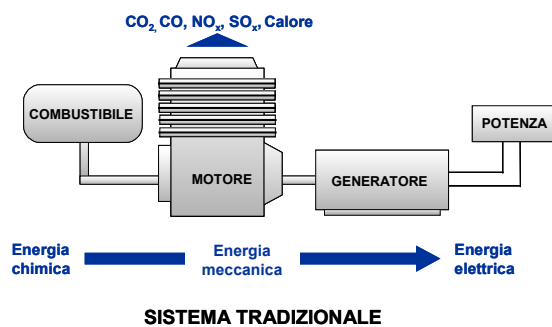
FN Tecnologie e Servizi Energetici Avanzati

Roen Est

INDICE

Cos'è una cella a combustibile	7
Caratteristiche	9
Aree di applicazione	
Applicazioni stazionarie	11
Trasporto	14
Principali tipi di celle e loro caratteristiche	17
Termodinamica della cella, rendimenti	18
Celle ad elettrolita polimerico	21
Applicazioni stazionarie	22
Applicazioni nel trasporto	27
Sviluppo di prototipi di veicoli	30
Combustibili / Sviluppo di sistemi di generazione di idrogeno	40
Situazione italiana	48
Celle ad acido fosforico	55
Celle a carbonati fusi	61
Programmi di ricerca e sviluppo.	
Situazione internazionale	62
Situazione italiana	66
Celle ad ossidi solidi	71
Programmi di ricerca e sviluppo	73
Celle alcaline	78
Celle a metanolo diretto	80
Acronimi	83
Simboli	84
Riferimenti	85
Organizzazioni impegnate in programmi di R&S sulle celle a combustibile in Italia	87

Cos'è una cella a combustibile



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

La 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 0,7 V e correnti comprese tra 300 e 800 mA/cm², 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 alla temperatura di funzionamento (celle a bassa e alta temperatura).

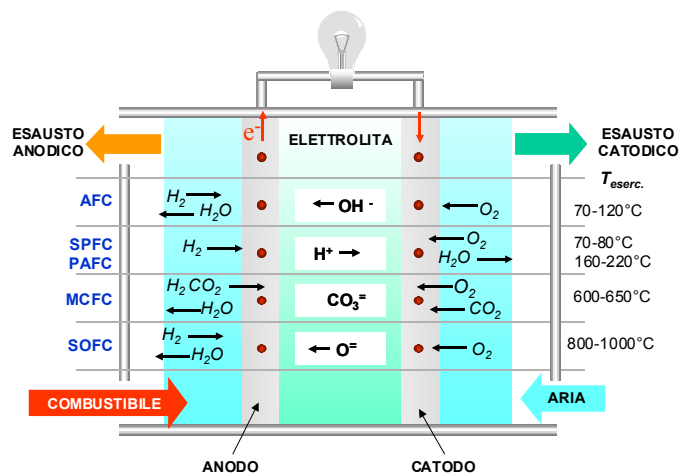
L'elettrolita determina o condiziona fortemente:

- 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
- la vita della cella.

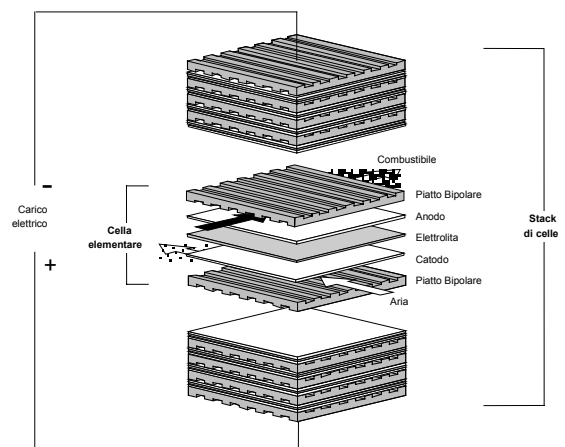
Le celle a combustibile sono sistemi elettrochimici capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile (in genere idrogeno) direttamente in energia elettrica, senza l'intervento intermedio di un ciclo termico, ottenendo pertanto rendimenti di conversione più elevati rispetto a quelli delle macchine termiche convenzionali.

La nascita delle celle a combustibile risale al 1839, anno in cui l'inglese William Grove riportò i risultati di un esperimento nel corso del quale era riuscito a generare energia elettrica in una cella contenente acido solforico, dove erano stati immersi due elettrodi, costituiti da sottili fogli di platino, sui quali arrivavano rispettivamente idrogeno ed ossigeno.

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 funzionare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile (idrogeno) ed ossidante (ossigeno o aria).



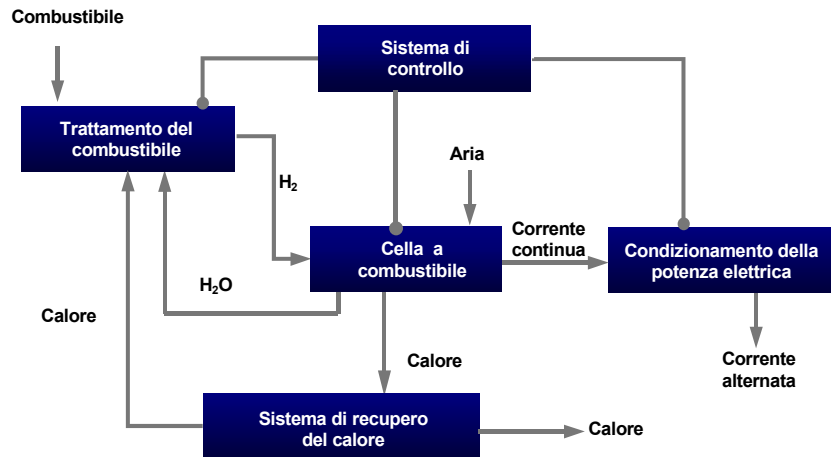
Schema di funzionamento dei vari tipi di celle



Stack di celle a combustibile

PRINCIPALI TIPI DI CELLE

- **Celle alcaline** (AFC, Alkaline Fuel Cell), che usano un elettrolita costituito da idrossido di potassio ed operano a temperature intorno a 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), che 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), che 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), che 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 promettenti 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), che 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), che operano a temperature tra 70 e 120 °C e come le PEFC utilizzano come elettrolita una membrana polimerica. Sono ancora nello stadio di ricerca di laboratorio

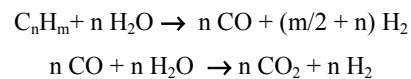


Schema a blocchi di un impianto con celle a combustibile

Gli impianti con celle a combustibile sono costituiti da 3 sezioni principali:

- una **sezione di trattamento del combustibile** (gas naturale, metanolo, gas di sintesi 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 autothermal reforming. Il processo normalmente impiegato quando si parte da idrocarburi leggeri è quello di reforming catalitico con vapore, seguito da conversione dell'ossido di carbonio:



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),

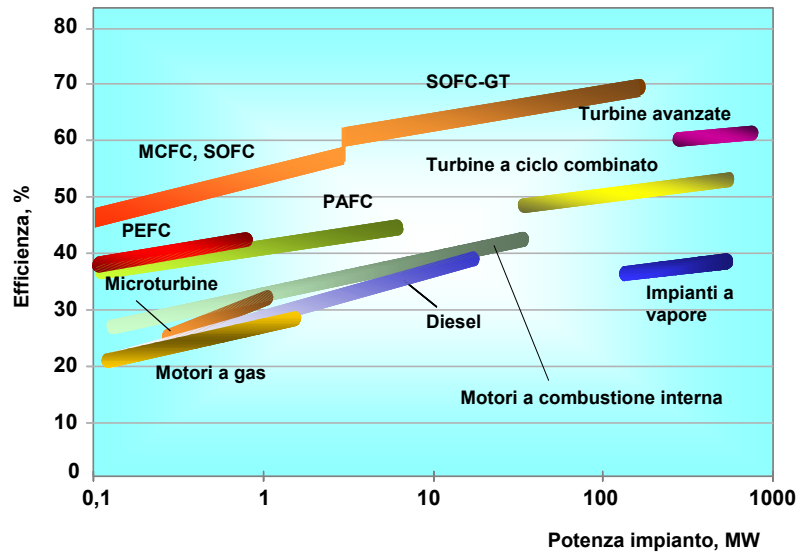
- una **sezione elettrochimica**, costituita dalle celle che producono energia elettrica per via elettrochimica attraverso una reazione tra l'idrogeno alimentato all'anodo e l'ossigeno alimentato al catodo; la trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore.
- un **sistema di condizionamento 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.

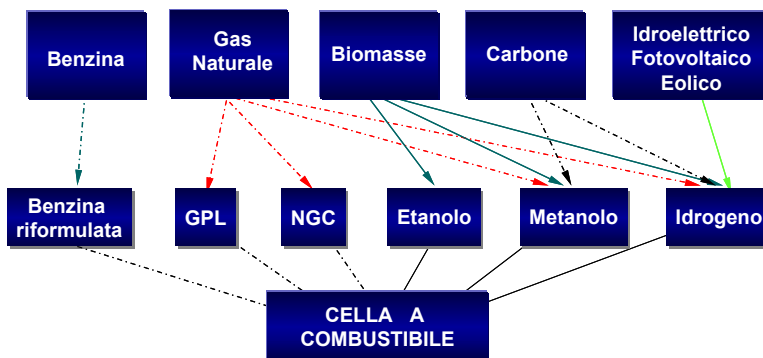
Caratteristiche

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 vantaggiosa l'adozione. Possiedono:

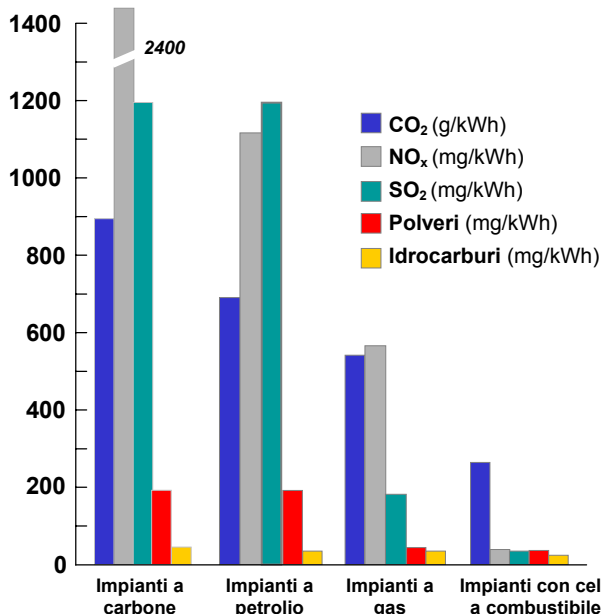
- **RENDIMENTO ELETTRICO ELEVATO**, con valori che vanno dal 40-48% (riferito al potere calorico inferiore del combustibile) per gli impianti con celle a bassa temperatura, fino a raggiungere oltre il 60% per quelli con celle ad alta temperatura utilizzate in cicli combinati;
- **POSSIBILITÀ DI UTILIZZO DI UN'AMPIA GAMMA DI COMBUSTIBILI** come metano, metanolo, gas naturale, gas di sintesi (prodotto da combustibili liquidi, gassificazione del carbone, biomasse);



Confronto delle efficienze tra celle a combustibile e generatori convenzionali



Combustibili utilizzabili in impianti con celle a combustibile



Confronto delle emissioni di impianti a celle a combustibile con impianti di generazione di potenza tradizionali

- **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 avviene 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;
- **RIDOTTISSIMO 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..

SITUAZIONE ENERGETICA IN ITALIA

In Italia, i combustibili fossili, almeno nel breve-medio periodo, continueranno ad avere un ruolo fondamentale nella generazione elettrica e nel trasporto.

Il gas naturale è la fonte che ha avuto una forte penetrazione nel sistema energetico italiano nell'ultimo decennio, passando dai 39,1 Mtep del 1990 ai 58,1 Mtep del 2000, attestandosi al secondo posto nella copertura della domanda energetica, dopo il petrolio.

Nel 2000, il fabbisogno energetico italiano è stato di circa 184,8 Mtep, coperto per il 49% dal petrolio e suoi derivati, per il 31% dal gas naturale, per il 7% da carbone ed assimilati e per il resto da energia elettrica primaria.

La dipendenza energetica italiana dall'estero è forte, negli ultimi 20 anni le importazioni hanno soddisfatto l'85% dei consumi totali, raggiungendo nel 2000 una quota di circa l'87%.

E' in questo contesto che l'Italia sta operando, per rispettare gli impegni assunti con la sottoscrizione del protocollo di Kyoto, nel dicembre 1997.

In attuazione del protocollo di Kyoto, e sulla base delle decisioni assunte successivamente dall'Unione Europea, l'Italia dovrà ridurre, entro il 2008-2012, le proprie emissioni di CO₂ e degli altri gas serra nella misura del 6,5% rispetto ai valori del 1990 (555 milioni di tonnellate di CO₂ equivalenti). Considerato il livello tendenziale delle emissioni al 2012, stimato in 612 MtCO₂equ., la riduzione del 6,5% corrisponde a circa 102,8 MtCO₂equ..

Le azioni necessarie al conseguimento di questo obiettivo sono state individuate e definite nella delibera CIPE del 19 novembre 1998 (Gazzetta Ufficiale 10 febbraio 1999). Si stima che la riduzione richiesta sia raggiungibile attraverso la promozione dell'efficienza energetica in tutti i settori, lo sviluppo di fonti rinnovabili per la produzione di energia e di tecnologie innovative per la riduzione delle emissioni, la protezione ed estensione delle foreste per l'assorbimento del carbonio, nonché l'adozione di misure fiscali mirate a disincentivare le emissioni di gas serra. Nella delibera sono precisate le azioni nazionali necessarie per la riduzione e le stime relative alla quantificazione del contenimento delle emissioni in termini di CO₂ raggiungibili con i diversi interventi riferiti al 2002, al 2006 e al periodo 2008-12. L'impegno assunto è stringente ed il suo raggiungimento nel breve-medio termine impone la scelta e l'adozione di nuove tecnologie nel settore energetico. In questa situazione le celle a combustibile, soprattutto in uno scenario basato sul vettore idrogeno, potrebbero rappresentare una tecnologia chiave.

Domanda totale di energia ripartita per fonti primarie (in milioni di tonnellate equivalenti di petrolio)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Combustibili solidi	15,8	12,5	12,8	11,8	11,5	11,2	11,0
Gas naturale	39,1	44,8	58,1	67,1	72,5	77,5	80,4
Petrolio	92,5	95,7	91,3	89,7	88,7	87,1	86,8
Energie rinnovabili	8,4	10,2	12,9	13,6	15,3	15,3	16,2
Energia elettrica importata	7,6	8,4	9,7	8,3	7,6	7,1	7
TOTALE	163,5	171,6	184,8	190,5	195,6	198,2	201,4

Fonte: elaborazione dati ENI, ENEL e Ministero delle Attività Produttive

Bilancio dell'energia in Italia - Anno 2000 (in milioni di tonnellate equivalenti di petrolio)

DISPONIBILITÀ ED IMPIEGHI	Fonti fossili			Rinnova-bili	Energia elettrica	TOTALE
	Comb. solidi	Gas naturale	Petrolio			
Produzione	0,4	13,4	4,5	12,5	-	30,8
Importazione	13,1	47,4	109,4	0,4	9,7	180,0
Esportazione	0,1	-	21	0,4	-	21,1
Variazione scorte	0,6	2,7	1,6	-	-	4,9
Consumo int. totale	12,8	58,1	91,3	12,9	9,7	184,8
Trasformazione energia elettrica	-6,6	-19,2	-17,8	-11,5	55,1	-
Consumi e perdite del settore energia	-1,2	-0,4	-5,9	-0,1	-40,9	-48,5
Totale impieghi finali	4,6	38,5	67,6	1,3	23,9	135,9
- Industria	4,3	16,3	7,5	0,4	11,8	40,3
- Trasporti	-	0,3	40,2	-	0,7	41,2
- Usi civili	0,1	20,8	7,8	0,9	11,0	40,6
- Agricoltura e pesca	-	0,1	2,4	-	0,4	2,9
- Usi non energetici	0,2	1,0	6,9	-	-	8,1
- Bunkeraggi	-	-	2,8	-	-	2,8

Fonte: Ministero delle Attività Produttive

Azioni nazionali per la riduzione delle emissioni di gas serra

	Mt CO ₂		
	2002	2006	2008-12
Aumento efficienza nel parco termoelettrico	- 4/5	- 10/12	- 20/23
Riduzione consumi energetici nel settore dei trasporti	- 4/6	-9/11	- 18/21
Produzione di energia da fonti rinnovabili	- 4/5	- 7/9	- 18/20
Riduzione consumi energetici nei settori industriale, terziario e residenziale	- 6/7	- 12/14	- 24/29
Riduzione emissioni nei settori non energetici	- 2	- 7/9	- 15-19
Assorbimento delle emissioni di CO ₂ dalle foreste	-	-	(- 0,7)
TOTALE	- 20/25	- 45/55	-95/112

Fonte: delibera CIPE 19 novembre 1998

Are di applicazione

Le celle a combustibile presentano proprietà tali da renderne molto interessante l'impiego nel campo della produzione di energia elettrica, in quanto rispondono perfettamente agli obiettivi che si perseguono nel settore elettrico, e cioè:

- miglioramento dell'efficienza di conversione delle fonti primarie;
- flessibilità nell'uso dei combustibili;
- riduzione delle emissioni di inquinanti nell'atmosfera.

APPLICAZIONI STAZIONARIE

La diffusione dei sistemi con celle a combustibile richiede che vengano superate le barriere che ancora limitano lo sviluppo delle varie tecnologie, e che vengano 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 del sistema elettrico e, più in generale, del sistema energetico, e dai tempi e modi con cui la stessa verrà attuata. Già 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, sino ai 21 MW del 1998. In Italia, grazie soprattutto agli apporti degli autoproduttori industriali e civili, la taglia media è già scesa nel 1999 al di sotto dei 50 MW. E' quindi prevedibile uno spazio crescente per tecnologie di generazione di piccola-media taglia a limitato impatto ambientale, ed elevata efficienza come le celle a combustibile.

Le emissioni degli impianti con celle a combustibile si mantengono infatti al di sotto del 10% di quelle di un equivalente impianto convenzionale. Il contenuto in NO_x e CO è praticamente trascurabile, originandosi questi inquinanti direttamente dalla fase di combustione. Anche composti come particolato e SO_x sono anch'essi trascurabili; ogni impianto con celle a combustibile prevede la conversione e/o l'eliminazione degli SO_x prima dell'ingresso in cella. Le emissioni di impianti PC25 (200 kW PAFC della UTC Fuel Cells) sono così basse da meritarsi un'esenzione totale dalle leggi sulla qualità dell'aria dalla California meridionale (SCAQMD, South Coast Air Quality Management District), considerate fra le più restrittive esistenti al mondo.

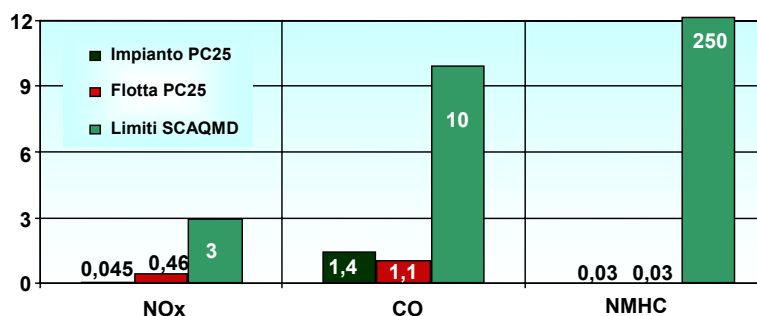
Un impianto a celle a combustibile presenta un'efficienza energetica sensibilmente superiore a quella dei sistemi convenzionali, anche nelle loro configurazioni più avanzate. Da ciò deriva una significativa riduzione della quantità di CO₂ emessa, a parità di energia elettrica e calore prodotti. Prendendo come esempio un impianto da 200 kW (emissioni CO₂ pari a circa 190 kg/MWh), si stima che l'utilizzo delle celle a combustibile, per le quali si assume un rendimento del 40%, porta, rispetto ad un motore a gas della stessa taglia (rendimento 30%), ad un risparmio, in termini di emissioni di CO₂, di circa 1.000 t/anno, considerando un utilizzo medio di 7000 ore/anno. 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.

Gli impianti con celle a combustibile, sempre grazie alle caratteristiche di modularità, flessibilità, rendimento e compatibilità ambientale, possono trovare applicazione sia presso utenti, 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.

Sulla base di studi effettuati da società specializzate (Arthur D. Little, EscoVale Consultancy Services), è stata fatta un'ipotesi conservativa per lo sviluppo e la penetrazione dei sistemi con celle a combustibile in generale e delle celle a bassa temperatura in particolare, con riferimento sia al mercato mondiale, che a quello italiano.

Segmenti di mercato delle diverse tecnologie di cella

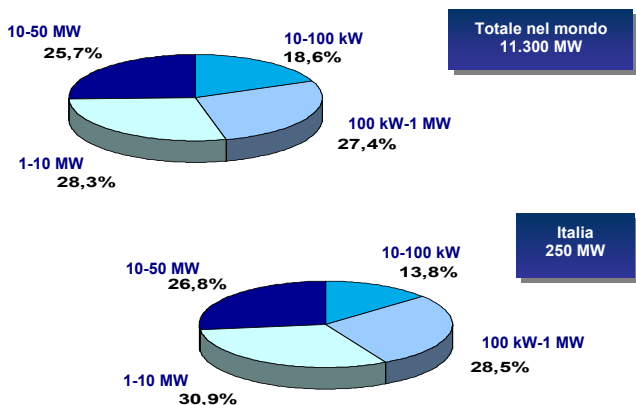
	POTENZA	TIPO DI CELLA
Applicazioni isolate	0,5-10 kW	PEFC, SOFC
Potenza residenziale	1-10 kW	PEFC, SOFC
Cogenerazione commerciale e residenziale	50-250 kW	PEFC, PAFC
Cogenerazione industriale	200 kW-2 MW	MCFC, SOFC
Potenza distribuita	2-20 MW	PAFC, MCFC, SOFC
Generazione centralizzata	< 50 MW	MCFC, SOFC
Trasporto	5-200 kW	PEFC, SOFC



Emissioni impianti PC25 confrontati con i limiti emessi dal SCAQMD (ppm_v, 15% O₂ secco)

In generale per le celle a combustibile è prevista, nelle applicazioni stazionarie, una penetrazione che, espressa come percentuale della potenza totale installata per il settore di applicazione considerato, varia, nel lungo termine e a livello mondiale, dal 3% delle applicazioni isolate a valori compresi tra il 13% per la sola generazione di energia elettrica e il 17% per la cogenerazione, con valori complessivi di oltre 11.000 MW/anno al 2020. A tale data il contributo maggiore (più di due terzi del totale) potrebbe derivare dalle celle ad alta temperatura, in virtù della loro maggiore efficienza e del loro impiego anche per impianti della taglia di qualche decina di MW.

Il mercato, come emerge dai risultati di uno studio svolto da EscoVale Consultancy Services per ENEA, è distribuito tra le varie taglie come riportato in figura.



Stime al 2020 della distribuzione del mercato mondiale ed italiano delle celle a combustibile per taglia d'impianto
(Fonte: EscoVale Consultancy Services)

Per quanto riguarda la situazione italiana, si prevede una penetrazione in linea con quella prevista per i paesi industrializzati, nei settori della generazione elettrica e della cogenerazione, con valori complessivi intorno a 250 MW/anno al 2020. Il contributo delle celle a bassa temperatura sarà pari al 100% nei primi anni 2000, passerà quindi al 50% del 2010 e al 30% del 2020.

Il principale ostacolo alla penetrazione nel mercato degli impianti con celle a combustibile è rappresentato dal costo di produzione elevato. Gli attuali volumi di produzione non sono infatti tali da permettere 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. L'ipotesi di penetrazione fatta richiede che i costi degli impianti raggiungano valori compresi tra 1000 e 1500 Euro/kW (con valori maggiori per le piccole taglie) nella fase iniziale della introduzione nel mercato, passando poi a regime a valori di 600-750 Euro/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'autoproduzione 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'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 i programmi dimostrativi, condotti in stretta collaborazione con gli utenti, sia nella fase di sviluppo sia in quella precommerciale, al fine di fornire agli stessi le informazioni necessarie sugli aspetti di convenienza economica, sicurezza, impatto ambientale, affidabilità e flessibilità d'uso di questi sistemi.

A questo proposito rilevanti sono le attività svolte negli Stati Uniti all'interno dei programmi del Department of Energy.

Lo studio era focalizzato specificatamente su impianti PEFC e MCFC di potenza compresa tra 10 kW e 50 MW.

Le celle a bassa temperatura, e soprattutto quelle ad acido fosforico, avranno un ruolo chiave nel breve-medio termine per l'introduzione della tecnologia nel mercato (con sistemi da qualche centinaio di kW) ed occuperanno anche nel lungo termine, prevalentemente con le celle ad elettrolita polimerico, uno spazio significativo nelle taglie medio-piccole per usi residenziali. Nell'arco temporale considerato si prevede che gran parte degli impianti verranno installati nei paesi più sviluppati, dove esistono le condizioni tecniche ed economiche per lo sviluppo della generazione/cogenerazione distribuita con tecnologie innovative.

Previsioni di mercato al 2020

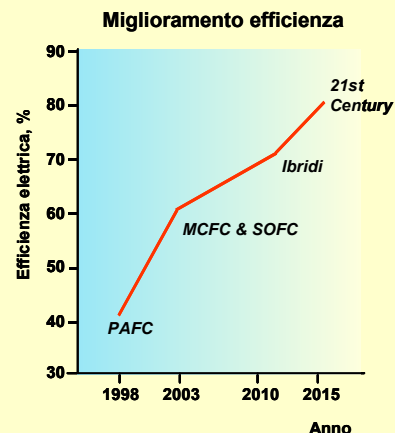
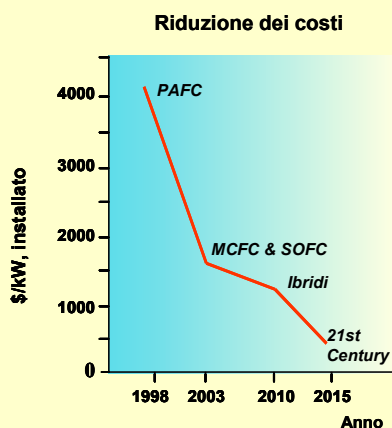
	POTENZA TOTALE INSTALLATA (GW)	CELLE A COMBUSTIBILE (MW)	QUOTA CELLE (%)
Applicazioni isolate	16,9	540	3,1
Cogenerazione	23,4	4100	17,5
Generaz. distribuita	45,3	5980	13,2
Altre applicazioni	31,9	710	2,2
Totale	117,9	11.300	

Previsioni relative al mercato delle celle a combustibile, MW/anno (generazione stazionaria)

	2005	2010	2015	2020
Italia	5	40	80	250
Europa	80	300	1500	3500
Potenza installata nel mondo	300	1000	5000	11300

PROGRAMMA DoE/USA

Il Progetto Vision 21 (Clean Energy Plants for the 21st Century), condotto negli Stati Uniti dal Department of Energy e dal National Energy Technology Laboratory (NETL), ha l'obiettivo di arrivare a disporre nel 2015 di sistemi di generazione dell'energia, che pur continuando ad impiegare combustibili fossili, siano in grado di garantire un impatto ambientale pressoché nullo. Nell'ambito di questo progetto rivestono un ruolo chiave i sistemi sviluppati all'interno del **21st Century Fuel Cell Program**, il cui obiettivo è quello di sviluppare sistemi che utilizzino celle a combustibile di nuova generazione in grado di offrire costi d'installazione di 400 \$/kW (<90 \$/kW per lo stack), efficienze superiore all'80%, emissioni "quasi zero".



PROGRAMMA UE

L'Unione Europea finanzia attività di ricerca, sviluppo e dimostrazione sulle celle a combustibile, e sulle tecnologie ad esse correlate, all'interno **V Programma Quadro** (1998-2002) - sottoprogramma "Energia". L'obiettivo strategico di questa parte del programma 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, fornire servizi energetici di alto livello a costi contenuti, migliorare la competitività delle industrie e ridurre l'impatto ambientale.

Per le applicazioni stazionarie il programma prevede lo sviluppo di:

- impianti di cogenerazione a celle a combustibile per uso residenziale e commerciale di potenza compresa fra 10 e 100 kW;
- celle a combustibile ad alta temperatura (da 100 kW a 1 MW) per la produzione di energia elettrica, compresi i sistemi ibridi con turbine a gas;
- generatori portatili di potenza compresa fra i 500 W ed i 3 kW.

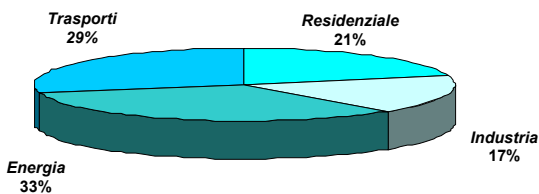
Obiettivi di costo e durata al 2005		
Costo (Euro/kW)	PEFC	1000 (sistema)
	PAFC	< 300 (stack) 1000 (sistema)
	MCFC	500 (stack) 1000-1500 (sistema)
	SOFC	500 (stack) 1000-1500 (sistema)
Durata (ore)	> 40.000	

TRASPORTO

I livelli di inquinamento atmosferico stanno assumendo, soprattutto nei grandi centri urbani, 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 del settore nel contributo di emissioni e consumi di energia.

Nell'ultimo decennio le stime (ENEA, Rapporto Energia e Ambiente 2001) indicano che il consumo finale assorbito dal trasporto urbano passeggeri e merci è passato da 12 Mtep a 16,3 Mtep (+35%). Nel 2000 il consumo finale assorbito dal traffico urbano è risultato pari a circa il 40% del consumo finale di energia del settore trasporto.

Le emissioni di CO₂ dal settore trasporti nel 2000 sono state pari a 137,5 Mt ed il trasporto su strada vi contribuisce per oltre il 93%. È stato valutato che nel periodo 1990-2000 le emissioni complessive di CO₂ prodotte dal trasporto urbano passeggeri sono passate da circa 32,5 Mt a circa 40,7 Mt (+25,3%). Nello stesso periodo, grazie a un miglioramento del parco autoveicoli, le emissioni di monossido di carbonio e ossidi di azoto sono diminuite rispettivamente del 10% e 28%, nonostante il notevole incremento del traffico veicolare, passato da circa 149 miliardi a circa 210 miliardi di veicoli-km (+ 41%). Anche l'aumento delle emissioni di composti volatili è risultato più basso (+8,1%).



Settori che contribuiscono alle emissioni di CO₂

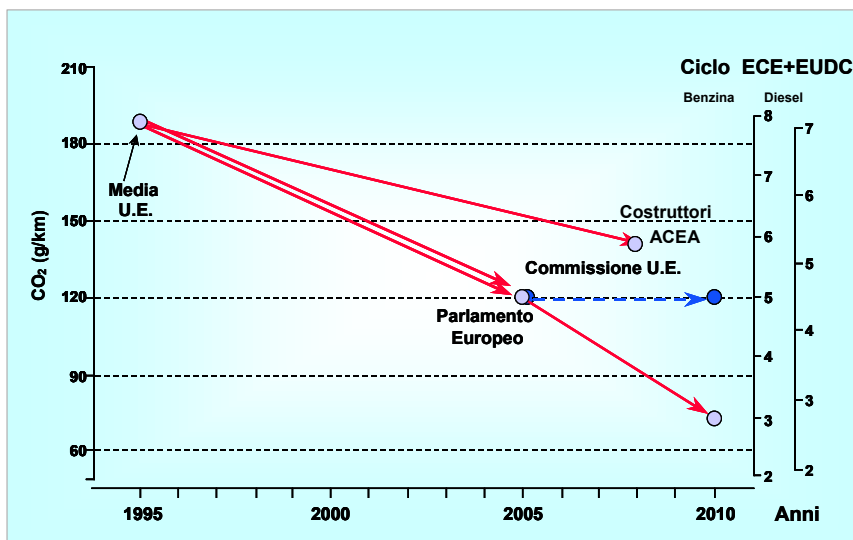
Le emissioni dovute alla mobilità di persone su strada nonostante tutto rimane una delle principali sorgenti d'inquinamento dell'aria nei centri urbani.

Nell'ottica di una mobilità sostenibile, occorre quindi adottare specifiche strategie d'intervento, che consentano di:

- ridurre le emissioni di CO₂, anche attraverso una riduzione dei consumi energetici del settore, per ridurre il rischio di cambiamenti climatici;
- contenere, nelle aree urbane, i livelli di concentrazione di inquinanti atmosferici, con particolare riferimento a componenti, attualmente oggetto di maggiore attenzione come benzene o polveri fini;
- ridurre i livelli di inquinamento acustico.

Ricordiamo che industrie automobilistiche europee hanno raggiunto un accordo volontario con l'Unione Europea per ridurre i livelli di emissioni di CO₂ delle auto immesse sul mercato dai correnti valori medi di circa 170 g/km, a 140 g/km nel 2008 e a 120 g/km nel 2012, mentre a livello nazionale la FIAT ha siglato un accordo con il Ministero dell'Ambiente per una riduzione media dei consumi del 20% al 2005. Per quanto riguarda i consumi la Comunità Europea, aveva fissato per l'anno 2005 un obiettivo di consumi di 5 e 4,5 litri/100 km rispettivamente per veicoli a benzina e diesel.

Si stima tuttavia che l'evoluzione tecnologica in atto sarebbe ancora insufficiente e che per portare le emissioni di gas serra ai limiti post-Kyoto occorrerebbe avviare una serie d'iniziative diversificate, indirizzate 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.

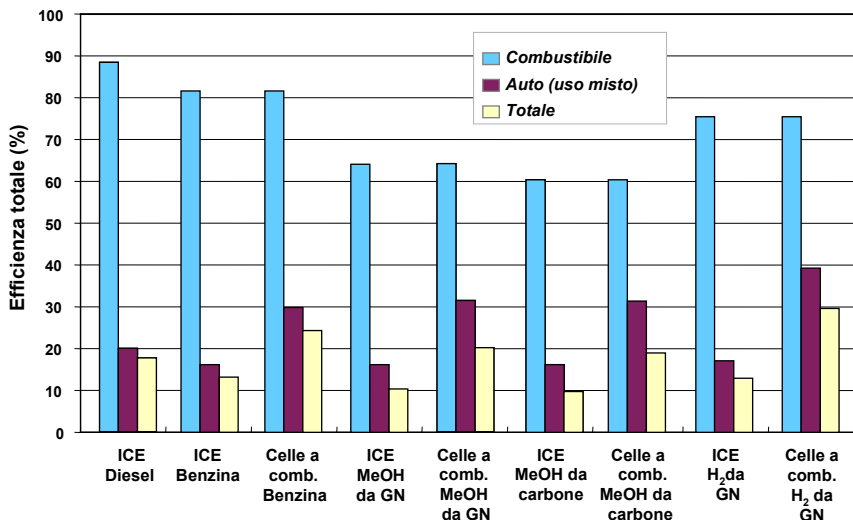


Proposte di riduzione dei consumi ed emissioni di CO₂

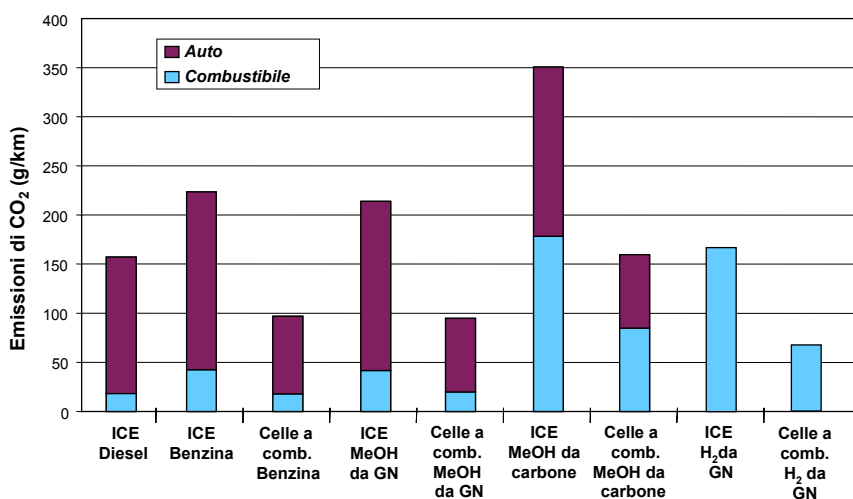
L'industria automobilista sembra oggi in grado di proporre mezzi dai consumi bassissimi e con un minor impatto ambientale rispetto al passato, ma questa offerta non è ancora in grado di rispondere alla richiesta di "veicoli ad zero emissioni" per un mercato sempre più vincolato ai problemi legati all'inquinamento. A livello internazionale si guarda alla propulsione elettrica come una soluzione ideale.

L'impiego di sistemi di propulsione veicolare con celle a combustibile rappresenta una delle alternative più promettenti per il medio-lungo termine: la loro potenzialità in termini di bassi consumi ed emissioni nulle, o quasi, ne promuove la candidatura come elemento fondamentale della propulsione veicolare per il trasporto del prossimo futuro.

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.

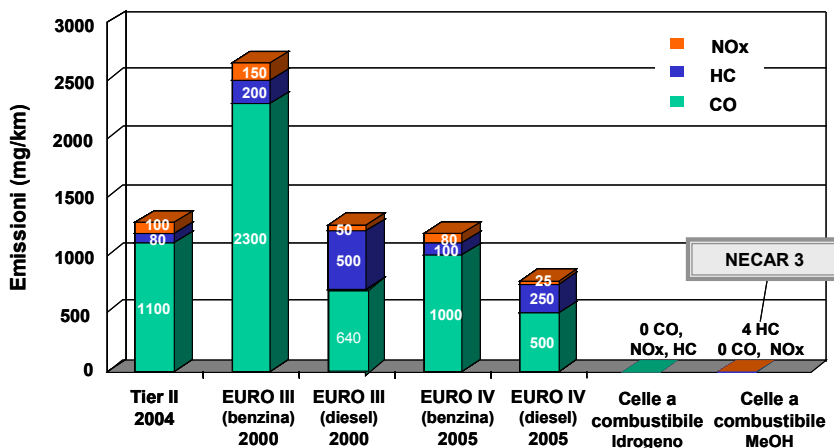


Efficienza "dal pozzo alle ruote" - Confronto tra veicoli a combustione interna (ICE) ed a celle a combustibile



Emissioni di CO₂ "dal pozzo alle ruote" - Confronto tra veicoli a combustione interna (ICE) ed a celle a combustibile

Le emissioni, come possiamo osservare dai valori riportati in figura, sono in ogni caso molto al di sotto dei limiti imposti dalle normative vigenti o che entreranno in vigore in futuro in Stati Uniti ed Europa. Le emissioni misurate sulla NECAR 3, veicolo prototipo alimentato a metanolo sviluppato nell'ambito della collaborazione della Daimler-Chrysler con la Ballard Power Systems, sono già 25 volte inferiori rispetto alla normativa EURO IV che sarà adottata nel 2005.



Emissioni veicoli a celle a combustibile. Confronto con valori limiti standard in vigore e di prossima adozione

Grazie all'elevata efficienza della cella, i rendimenti previsti per veicoli con celle a combustibile sono sensibilmente superiori a quelli dei motori a combustione interna. Si raggiungono, a seconda del combustibile utilizzato, 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 ed aria, le celle a combustibile presentano efficienze ineguagliabili da altri sistemi di generazione, per di più costanti con il variare del carico, ed una dinamica rapidissima, paragonabile a quella di un accumulatore tradizionale. Tali efficienze si riducono parzialmente qualora andiamo a considerare l'intero ciclo del combustibile, dalla fase di produzione alla sua distribuzione.

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 a partire da combustibili fossili.

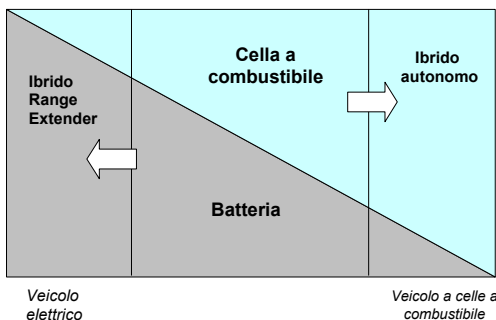
Le emissioni di sostanze inquinanti nel punto di utilizzo di un veicolo con celle a combustibile sono praticamente nulle con idrogeno e si mantengono estremamente basse con altri combustibili riformati a bordo (fino al 90% in meno rispetto ai motori termici).

I veicoli alimentati con celle a combustibile presentano inoltre una bassa rumorosità, poiché la sola sorgente di rumore è quella costituita dall'unità di compressione dell'aria utilizzata per l'alimentazione dello stack.

Per generare energia, l'unità costituita dalle celle a combustibile deve essere integrata in un sistema completo che comprende una sezione di trattamento del combustibile, la sezione di compressione dell'aria, un sistema di condizionamento della potenza elettrica, un sistema di recupero del calore sviluppato ed infine una sezione di regolazione e controllo. L'energia prodotta dalle celle farà muovere un motore elettrico, il quale darà la propulsione necessaria agli organi di trasmissione del veicolo.

Per il sistema di generazione da installare a bordo si possono considerare diverse alternative, a seconda delle scelte effettuate riguardo al combustibile utilizzato (attualmente idrogeno e metanolo, benzina in futuro) ed alla configurazione del sistema di propulsione (solo cella o ibrido cella/batteria).

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 pacco batterie apporta il complemento di energia necessario in caso di forti accelerazioni e consente il recupero di energia di frenata. Nel caso in cui la cella copre meno del 25% della potenza si parla di configurazione "range extender", dove la cella viene utilizzata per la carica delle batterie e per aumentare l'autonomia del veicolo.



Possibili livelli di ibridizzazione del veicolo

La realizzazione di prototipi dimostrativi per diverse tipologie di veicoli. A fronte di questo interesse, e valutati i notevoli progressi fatti registrati dalla tecnologia negli ultimi anni, per lo sviluppo commerciale della tecnologia è necessario risolvere ancora una serie di problemi. E' importante che gli sforzi di sviluppo 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 dell'ordine di 3000÷5000 \$/kW; comunque alla luce delle iniziative di industrializzazione già avviate o di prevista attuazione, è prevedibile che tali costi siano destinati a ridursi in maniera apprezzabile già entro l'anno, pur restando sensibilmente superiori a quello dei motori tradizionali. I maggiori gruppi industriali impegnati nella realizzazione di prototipi dimostrativi, concordano nel prevedere valori intorno a 250-300 \$/kW entro il 2004, 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.

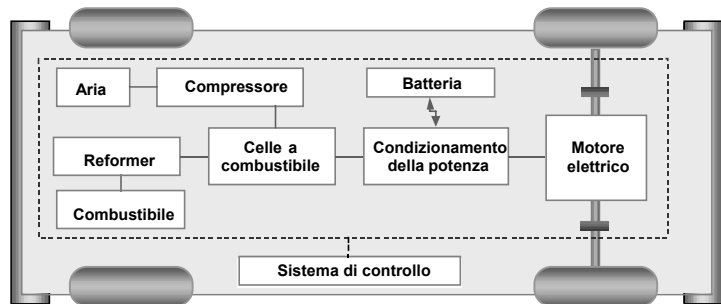
Comunque, valori intorno a 250 \$/kW sono già ritenuti sufficienti per ottenere la competitività in specifici settori del trasporto (es. nel trasporto pubblico), soprattutto se vengono contabilizzati i benefici ambientali della tecnologia rispetto ai motori convenzionali.

Per un'analisi dettagliata dei costi si rimanda alla sezione relativa alle celle ad elettrolita polimerico per trasporto.

Rumore all'interno di autobus urbani, in dB
Rilevazioni nel punto di massima e minima rumorosità

	a veicolo fermo	a 50 km/h
Autobus a celle combustibile (NEBUS)	53 /57	53 /59
Autobus a gas naturale	49 /58	63 /73
Autobus diesel	60/68	65/73

Misure effettuate su veicoli MercedesBenz certificate dalla German TÜV



Schema di veicolo con celle a combustibile

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,

Per applicazioni nel settore del trasporto sono state sperimentate celle a combustibile di diverso tipo; le celle polimeriche alimentate ad idrogeno o metanolo sono quelle su cui oggi si concentra la maggior attenzione, anche se per la realizzazione di veicoli (principalmente autobus e furgoni) in passato sono state considerate anche le celle ad acido fosforico ed alcaline. Le celle ad ossidi solidi sono invece interessanti soprattutto come sorgenti di potenza ausiliaria (APU).

La tecnologia PEFC è oggetto di notevole attenzione da parte dell'industria automobilistica che sta investendo notevoli risorse nella

Principali tipi di celle e loro caratteristiche

Caratteristiche \ Tipo	CELLE A BASSA TEMPERATURA			CELLE AD ALTA TEMPERATURA	
	AFC	PEFC	PAFC	MCFC	SOFC
ELETTROLITA	Idrossido di potassio	Membrana polimerica	Acido fosforico	Carbonato di litio e potassio	Ossido di zirconio drogato
IONE CHE PROMUOVE LA REAZIONE DI CELLA	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ⁼	O ⁼
TEMPERATURA, °C	60-120	70-100	160-220	600-650	800-1000
CATALIZZATORE	Pt/Pd, Ni	Platino	Platino	Nichel	Non richiesto
MATERIALI COSTRUTTIVI	Plastica, grafite, Inconel	Materiali grafitici, metalli	Materiali grafitici	Nichel, acciaio inossidabile	Materiali ceramici, metalli
COMBUSTIBILE IMPIANTI	Idrogeno puro (99,99%)	Idrogeno Gas riformati (MeOH, GN)	Idrogeno Gas riformati (GN, MeOH, idrocarburi leggeri)	Idrogeno Gas riformati	Idrogeno Gas riformati – Gas da carbone
OSSIDANTE	Ossigeno (puro)	O ₂ / Aria	O ₂ / Aria	O ₂ / Aria	O ₂ / Aria
EFFICIENZA ELETTRICA (PCI), %	60	40-60	40-50	45-55	45-60
DENSITA' DI POTENZA, mW/cm²	300-500	300-900	150-300	150	150-270
STATO DELLA TECNOLOGIA	Sistemi 5-80 kW	Sistemi 5-250 kW	Impianti dimostrativi fino a 11 MW	Impianti dimostrativi fino a 2 MW	Stack 25 kW Impianto 220 kW
TEMPO DI AVVIAMENTO	Minuti	Minuti	1-4 h	5-10 h	5-10 h
APPLICAZIONI	Applicaz. spaziali, gener. portatili, trasporto	Piccoli generatori per cogenerazione e usi residenziali, trasporto	Cogenerazione, potenza distribuita	Cogenerazione industriale, potenza distribuita	Cogenerazione industriale, potenza distribuita
VANTAGGI	Densità di potenza elevata	Elettrolita non volatile Minimi problemi di materiali e corrosione Alta densità di potenza Resistenza a CO ₂ Bassi tempi di avviamento	Resistenza a CO ₂ Alta efficienza globale in applicazioni cogenerative Tecnologia matura	Disponibilità di calore ad alta temperatura CO è un combustibile Rendimento elevato Possibilità di reforming interno	Disponibilità di calore ad alta temperatura Non necessario uso di catalizzatori Rendimento elevato Possibilità di reforming interno
SVANTAGGI	Nessuna resistenza a CO, scarsa al CO ₂ Estrema purezza gas di alimentazione	Bassa tolleranza a CO Problemi di gestione dell'H ₂ O	Bassa tolleranza a CO	Problemi di vita e stabilità dei materiali Richiesto un ricircolo di CO ₂ Alto tempo di avviamento	Sollecitazioni termiche elevate nei materiali Alto tempo di avviamento
DISPONIBILITÀ COMMERCIALE	Applicaz. speciali	2002-2003 (gen.stazionaria) 2003-2005 (trasporto)	1995-2000	> 2003	> 2005

Termodinamica della cella, rendimenti

In condizioni di equilibrio l'energia massima disponibile in una cella, che opera a temperatura e pressione costante, è data dalla variazione di energia libera di Gibbs connessa alla reazione $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ ed è espressa dalla relazione:

$$\Delta G = -nFE_{\text{rev}} \quad \text{dove: } n = \text{numero di elettroni che partecipano alla reazione}$$

$$F = \text{costante di Faraday.}$$

$$E_{\text{rev}} = \text{potenziale reversibile di cella.}$$

In queste condizioni la quantità di calore prodotta è pari a: $Q_{\text{rev}} = T\Delta S = \Delta H - \Delta G$

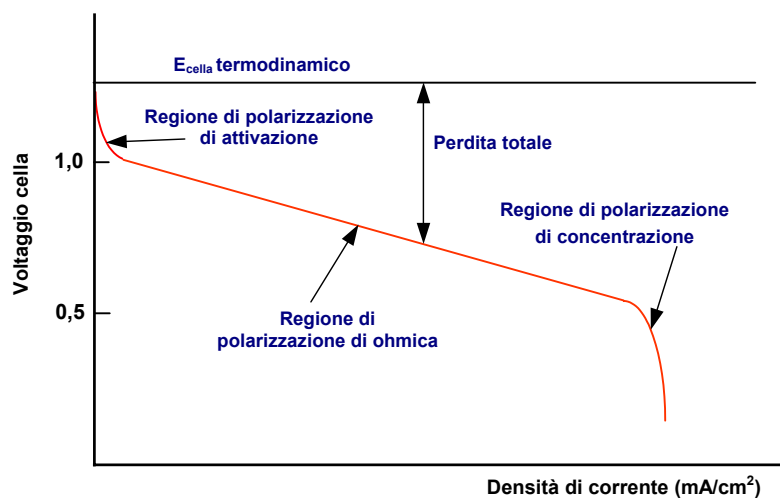
in cui ΔH è la variazione di entalpia connessa con la reazione globale di ossidazione del combustibile.

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

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

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 riportiamo una tipica curva di polarizzazione.



Curva caratteristica tensione/densità di corrente

Polarizzazioni di cella

Polarizzazione di attivazione è connessa alla velocità delle reazioni elettrodiche. Nel caso di reazioni elettrochimiche cui η_{att} è dell'ordine 50-100 mV, viene espressa dall'equazione di Tafel:

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

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

in cui α = 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 elettronica.

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

$$\eta_{\text{ohm}} = iR$$

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.

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
 δ = 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 η_{att} , la polarizzazione di concentrazione è espressa dalla:

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left\{ \frac{c}{c_0} - \frac{i}{i_L} \right\}$$

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:

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

RENDIMENTO DI CELLA

Rendimento termodinamico

Il rendimento energetico di una cella è definito come:

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

e può 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 pressioni 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 eroga 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:

$$I_F = I_{max} = n F df/dt$$

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:

$$I = n F (df/dt)_{cons}$$

Si definisce rendimento di corrente il rapporto: $\epsilon_I = \frac{I}{I_{max}} = U$

normalmente riportato come utilizzazione del combustibile.

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:

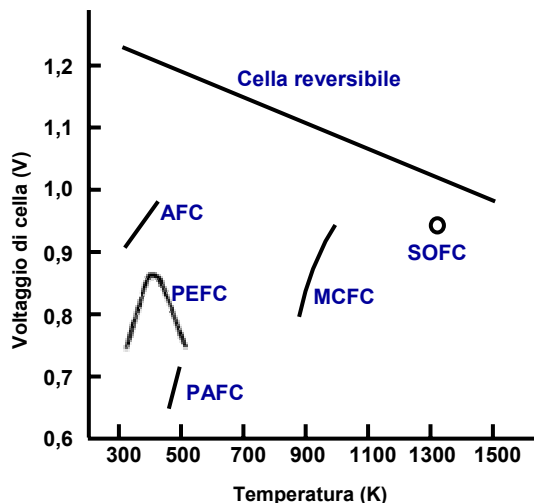
$$U_{H_2} = \frac{H_{2,i} - H_{2,u}}{H_{2,i}} = \frac{H_{2,consumato}}{H_{2,i}}$$

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

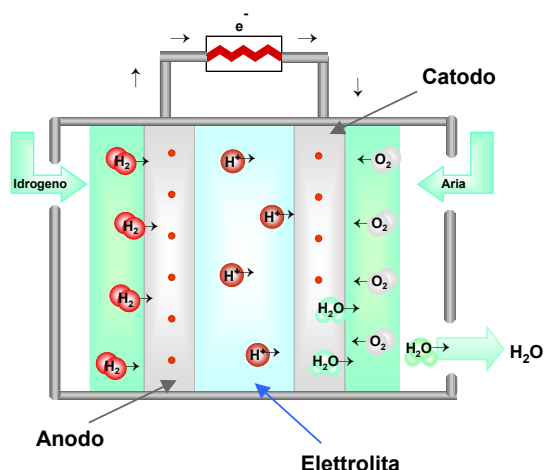
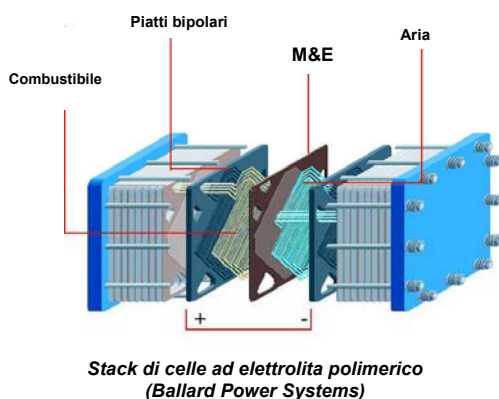
Impurezze presenti nei gas di alimentazioni riducono le prestazioni di cella; quantità e specie tollerabili variano con il tipo di cella, come possiamo notare dalla tabella.



Effetto della temperatura sul voltaggio di cella

TIPOLOGIA DI CELLA	LIMITI DI TOLLERABILITÀ
AFC	0% CO ₂ , 0% H ₂ S
PEFC	CO < 10 ppm
PAFC	CO < 1% _v H ₂ S + COS < 50 ppm
MCFC	H ₂ S, COS < 1 ppm HCl < 1 ppm, NH ₃ < 1% _v
SOFC	H ₂ S < 1 ppm, HCl < 1 ppm NH ₃ < 1000 ppm

Celle ad elettrolita polimerico



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 solforica 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 kW/l, >1 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. Recentemente l'interesse è stato ampliato anche alle applicazioni stazionarie.

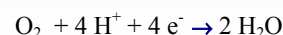
REAZIONI ELETTROCHIMICHE

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 elettrodico.

Tenore di CO ammesso dalla cella: < 10 ppm.

MATERIALI DEI COMPONENTI DI CELLA

Anodo	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 Catalizzatore: platino o una sua lega (Pt-Ru, Pt-Sn) supportato su carbone Carico di Pt: 0,2-0,4 mg/cm ²
Catodo	
Elettrolita	Membrana solfonica perfluorurata (del tipo Nafion) Spessore: 50-200 μm
Piatti bipolari	Grafite o in qualche caso materiale metallico; in prospettiva polimeri conduttori

APPLICAZIONI STAZIONARIE

Nel settore stazionario i segmenti del 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 segmenti 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 1000-1500 \$/kW e tempi di vita dell'ordine delle 40.000 ore.

Principali organizzazioni coinvolte nello sviluppo di PEFC

STACK

Analytic Power (USA)
Ballard Power Systems (Canada)
Energy Partners (USA)
General Motors (USA)
Nuvera Fuel Cells Europe (I)
Honda (J)
Honeywell (USA)
H Power (USA)
UTC Fuel Cells (USA)
Mitsubishi (J)
Nissan (J)
Plug Power (USA)
Siemens (D)

REFORMER

Argonne National Lab. (USA)
Nuvera Fuel Cells (USA)
DaimlerChrysler (D)
General Motors (USA)
Hydrogen Burner Techn. (USA)
UTC Fuel Cells (USA)
Johnson Matthey (UK)
Mitsubishi (J)
Idatech (USA)
Toyota (J)
Wellman CJB (UK)

SVILUPPO DI MATERIALI E COMPONENTI DI CELLA

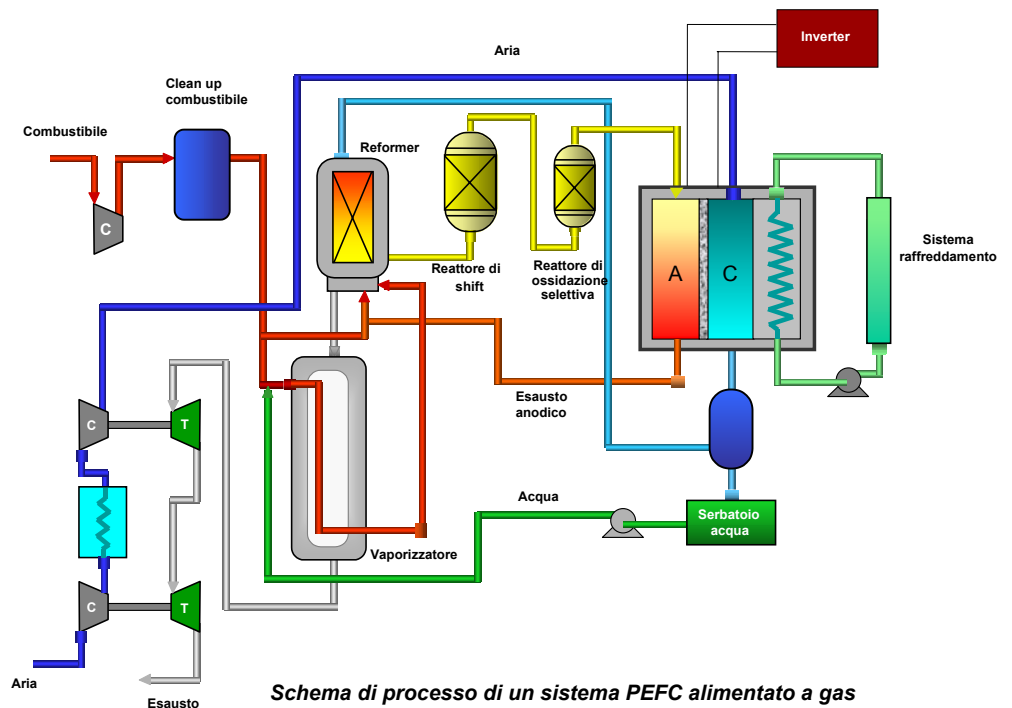
Asahi Chemical (J)
Asahi Glass (J)
CNR-ITAE (I)
DuPont (USA)
Gore (USA)
Hoechst (D)
3M (USA)
E-Tek (USA)
Johnson Matthey (UK)

In figura riportiamo uno schema semplificato di un impianto PEFC alimentato a gas naturale.

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'eshausto 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 sistema PEFC alimentato a gas naturale (con steam reforming)

■ Ballard Power Systems

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 1993 sistemi sia per il mercato stazionario sia, come vedremo successivamente, per il trasporto.

La Ballard Generation Systems (BGS), consociata della Ballard Power Systems, è l'unica società ad aver realizzato impianti PEFC per cogenerazione on-site di potenza significativa (250 kW, agosto 1997).



Impianto Ballard 250 kW,
Bewag Treptow Heating
Plant, Berlino

CARATTERISTICHE IMPIANTO PEFC DA 250 kW

Dati di progetto dell'impianto	
Potenza	250 kW _e / 237 kW _{term}
Combustibile	Gas naturale
Efficienza elettrica	40% (PCI)
Efficienza totale	80 % (PCI)
Modalità di funzionamento	In automatico
Dimensioni	2,4 m x 2,4 m x 5,7 m
Peso	12.100 kg

Specifiche dello stack (serie Mk6000)	
Potenza	250 kW
Prestazioni di cella	0,78 Vdc @ 340 ASF
Numero celle	688 (4 x 172 celle quadrate connesse in serie)
Voltaggio	535 Vdc
Efficienza	62%
Dimensioni	1,4 m x 1,6 m x 2,1 m

La BGS ha in corso alleanze strategiche con la **GPU International** (USA), la **Alstom France S.A.** (F) e la **EBARA Corp.** (J) per lo sviluppo e la commercializzazione di impianti per usi stazionari. Sono state create la Alstom Ballard e la EBARA Ballard che si occupano della fabbricazione e della vendita di impianti di generazione di potenza rispettivamente in Europa e Giappone.

È in corso un programma dimostrativo, finalizzato alla ottimizzazione del generatore da 250 kW, che si protrarrà fino al 2003. Attraverso la EBARA e la Alstom sono state già consegnate diverse unità di prova e a breve dovrebbero entrare in esercizio un totale di nove impianti.

Impianti dimostrativi da 250 kW (settembre 2001)

Anno	Esercente impianto/sito	Stato della dimostrazione
1999	Cinergy Corp.- Naval Surface Warfare Center, Crane (Indiana, USA)	Prove in corso
2000	Bewag Treptow Heating Plant, Berlino (D)	Prove in corso
2000	Elektra Birseck, Basilea (CH)	Prove in corso
2000	NTT (Nippon Telegraph and Telephone) Research Lab, Tokyo (J)	Sito in allestimento
2001	Impianto Promocell, Liegi (B)	Sito in allestimento
2001	Progetto EDF/GDF, Forbach (F)	Sito in allestimento
2001	Progetto Edison, EnBW (D)	Sito in allestimento
2001	Progetto Fraunhofer, Oberhausen (Monaco, D)	Sito in allestimento

Ballard Generation Systems, **Tokyo Gas** ed EBARA hanno siglato un accordo per sviluppare unità per cogenerazione di potenza 1 kW a gas naturale per il mercato residenziale giapponese. Il sistema è progettato per assumere energia elettrica dalla rete centrale nei momenti di maggiore consumo di potenza. La Tokyo Gas, all'interno della collaborazione, si occupa dello sviluppo dell'unità di reforming. La commercializzazione di questi sistemi è prevista per il 2004.

Un prototipo di 2^a generazione, presentato a gennaio 2002, raggiunge un'efficienza elettrica e termica rispettivamente del 37% e 41%.

Unità simili saranno sviluppate nell'ambito di un accordo di collaborazione firmato lo scorso ottobre (2001) con la **Osaka Gas**.

Considerati i costi elevati dell'energia e del gas naturale in Giappone, dove la maggior parte dell'energia necessaria al fabbisogno del paese risulta importata, è stato stimato che questo mercato già oggi può sostenere costi dell'ordine di 3000 \$/kW.

Recentemente l'interesse Ballard si è allargato al mercato dei generatori per uso portatile, per i quali ha avviato collaborazioni con la **Coleman Powermate** e la **Matsushita Electric Works Ltd.**

Occorre ricordare che BGS lo scorso anno ha reso disponibile un modulo, il NEXA, nato proprio per essere integrato in sistemi per generazione portatili, generazione di emergenza e unità UPS (uninterruptible power supply).



Modulo NEXA
Potenza: 1200 W
Corrente: 46 A
Combustibile: idrogeno
Dimensioni: 56 x 25 x 33 cm
Peso: 12 kg
Emissioni: CO, CO₂, SO_x, NO_x 0 ppm
Rumore: 75 dB a 1 m

Il piano di commercializzazione BGS prevede i primi prodotti per il mercato stazionario tra il 2002 ed il 2003, mentre le prime unità portatili dovrebbero essere disponibili a breve.

Molte società, soprattutto negli Stati Uniti, in Europa e in Giappone stanno lavorando allo sviluppo di sistemi di potenza inferiore ai 50 kW per il settore residenziale.

■ **GE MicroGen/Plug Power**

La GE MicroGen, costituita nel febbraio 1999 dalla **General Electric Power Systems** e dalla **Plug Power**, ha in atto un programma di sviluppo e commercializzazione di unità di potenza fino a 35 kW, per usi residenziali e commerciali.

La società attualmente sta sviluppando sistemi PEFC di potenza 7 kW (HomeGen 7000) a gas naturale.



GE HomeGen 7000

La GE MicroGen ha siglato accordi con la Flints Energies e la New Jersey Resources Energy Holdings Corp. (NJR), compagnie statunitensi di distribuzione di servizi per la vendita negli Stati della Georgia e del New Jersey di unità per applicazioni commerciali e residenziali. Unità HomeGen 7000, alimentate a gas naturale o propano, saranno disponibili sul mercato a partire da quest'anno. Sistemi in grado di produrre energia e calore sono previsti per il 2003.

La **Joh. Vaillant GmbH Co.** (Remscheid, Germania), uno dei principali produttori di apparecchi per riscaldamento in Europa, ha siglato un accordo con Plug Power, per introdurre e vendere nel mercato europeo sistemi a gas naturale di potenza 4,5 kWe per usi residenziali. Sono previsti test sperimentali su impianti pilota con il marchio Vaillant in diverse nazioni europee, soprattutto in Germania, Austria, Svizzera e Olanda. L'inizio della commercializzazione è annunciato per l'anno 2003. Entro il 2010 la Vaillant prevede un numero di apparecchi venduti pari a 100.000 all'anno.

CARATTERISTICHE HomeGen 7000	
Dimensioni	1,9 m x 0,9 m x 1,4 m
PRESTAZIONI	
Potenza	7 kW 10 kW per 30 min 15 kW per 0,5 s
Voltaggio	120/240 VAC @ 60 Hz 100/230 VAC @ 50 Hz
Prestazioni del sistema	
Efficienza	
<i>Gas naturale</i>	40% @ 2 kW output 29% @ 7 kW output
<i>GPL</i>	38% @ 2 kW output 27% @ 7 kW output
Efficienza in cogenerazione	> 75%
Temperatura esercizio	~ 70 °C
Temperatura esausto	~ 105 °C
Emissioni	NOx < 1 ppm SOx < 1 ppm
Caratteristiche operative	
Combustibile	Gas naturale GPL
Pressione	> 1/4 PSIG
Manutenzione	8.000 h (40.000 h di esercizio per i componenti ausiliari)
Durata	15 anni
Rumorosità	< 65 dBa @ 1 m



1. Sistema controllo
2. Inverter
3. Reformer
4. PEFC
5. Recuperatore di calore

Prototipo Vaillant/Plug Power da 4,5 kWe

La prima unità Vaillant con certificazione CE (Conformità Europea) è stata installata in un edificio a Gelsenkirchen (Germania), a dicembre 2001, per fornire elettricità, calore ed acqua calda. Il progetto è finanziato da Vaillant, Ruhrgas AG, E.ON Engineering GmbH, ELE GmbH, EUS GmbH e dalla regione del Nord Reno-Westfalia.

Un accordo di tipologia simile a quello Vaillant, è stato siglato dalla MicroGen con la **Kubota Corp.** (Osaka), che sta provando unità da 7 kW. Il prodotto sarà immesso sul mercato entro il 2002.

Collaborazioni sono inoltre in corso con la **Sorof Trading Developing Company** e con **Rahim Afroz** per la distribuzione e vendita di prodotti GE MicroGen rispettivamente in Arabia Saudita e Bangladesh.

■ **IdaTech**

La IdaTech (in passato Northwest Power Systems, Bend, Oregon, USA) è impegnata nello sviluppo di sistemi di potenza 1-10 kW per usi residenziali e sta esplorando la possibilità di sviluppare unità per il mercato della generazione portatile (0,1-3 kW) e per "recreational vehicles" (0,5-5 kW).

I prototipi finora realizzati integrano stack PEFC acquisiti da diversi costruttori, con sistemi di conversione del combustibile messi a punto dalla stessa IdaTech. Accordi di fornitura sono stati tra l'altro stipulati con la DCH Technology (USA) e la Nuvera Fuel Cells Europe (I).

La Bonneville Power Administration (Portland, Oregon), agenzia del Department of Energy statunitense, nel 1999 ha siglato un accordo triennale con la IdaTech per l'acquisto di 110 unità da 3 kW per usi residenziali. Il costo di produzione dopo la costruzione delle prime 10 unità sarà dell'ordine di 30.000 \$; si stima tuttavia che una volta avviata la produzione di serie (2002) questo si abbasserà a 10.000 \$.



**Impianto da 5 kW
(IdaTech)**

A dicembre 2000 è stato annunciato un accordo con la **Tokyo Boeki Ltd.**, che si occuperà della fabbricazione, distribuzione e vendita di sistemi di potenza 1-3 kW in Giappone ed altri 13 paesi asiatici. Le prime unità, che entreranno in esercizio, utilizzeranno come combustibile metanolo.

■ **Nuvera Fuel Cells**

La Nuvera Fuel Cells è orientata a sviluppare sistemi di potenza 1-50 kW per il mercato residenziale e commerciale.

La Nuvera Fuel Cells è stata costituita nell'aprile 2000 dalla fusione della De Nora Fuel Cells SpA (Milano, I), divisione della società De Nora che sin dal 1990 si occupa dello sviluppo di sistemi PEFC e dell'Epyx Corp. (Cambridge, Massachusetts, USA), del gruppo Arthur D. Little, attiva dal 1992 nello sviluppo di sistemi di trattamento del combustibile.

A maggio 2001 la Nuvera ha formato una joint venture con la **RWE Plus** (Germania) per lo sviluppo, la produzione e commercializzazione di impianti residenziali di taglia fino a 50 kW per il mercato europeo. Prove dimostrative di questi sistemi, alimentati a gas naturale o propano, saranno avviate in Germania entro la metà del 2002 e se ne prevede la commercializzazione nel 2004.

Nuvera ha inoltre stretto un accordo con **Air Liquide** (Francia) per sviluppare unità ad idrogeno e siglato un memorandum d'intesa con la **Mitsui & Co., Ltd.**, per esplorare le possibilità di sviluppo in Giappone di sistemi con celle a combustibile.

SPECIFICHE PRODOTTI NFC IN SVILUPPO	1 kW - Idrogeno	5 kW - Gas naturale
Volume	85 l	650 l
Peso	65 kg	200 kg
Potenza nominale	1 kW _c	1-5 kW
Voltaggio	120/240 Vac @60 Hz 100/230 Vac @50 Hz	120/240 Vac @60 Hz 100/230 Vac @50 Hz
Start up system da 21 °C	3 s	10 min
Prestazioni nei transitori	>10:1 turndown in 2 s	> 5:1 turndown in 2 s
Prestazioni sistema		
Efficienza elettrica	40% @1 kW	40% @1 kW
Efficienza di cogenerazione	-	>75% LHV
Temperatura di esercizio	70 °C	70 °C
Temperatura esausto	105 °C	105 °C
Temperatura operativa	-18÷50 °C	-18÷50 °C
Combustibile	Idrogeno, 1,4 bar	GN/GPL, 17 mbar
Intervalli manutenzione		
Routinaria	9.000 h (annualmente)	
Componenti principali	40.000 h (ogni 5 anni)	
Vita utile	20 anni	



Unità da 1 kW a idrogeno



**Unità da 5 kW a
gas naturale**

■ H Power Corp.

HPower (New Jersey, USA) sviluppa unità PEFC per generazione/cogenerazione di piccola taglia (1-10 kW) per i settori residenziale e industriale, con gas naturale o propano come combustibile.

Test dimostrativi di unità alimentate a gas naturale sono attualmente in corso da parte della **Energy Co-Opportunity, Inc.** (ECO) negli Stati Uniti, della Hydro-Quebec in Canada ed in Francia presso il centro ricerche della **Gaz de France**.

La H Power non trascura il mercato della generazione portatile, per il quale sta sviluppando sistemi di potenza 50-500 W, alimentati ad idrogeno (come gas compresso o stoccato in idruri metallici). A marzo 2001 è stato firmato un accordo con l'Osaka Gas per sviluppare unità da 500 W a gas naturale, adatte al mercato residenziale giapponese. L'unità utilizzerà un fuel processor (steam reforming) realizzato dalla società giapponese.



Unità RCU da 1-10 kW



Sistema da 100 W (PPS100)



Sistema da 250 W (PowerPEM-PS250)

■ UTC Fuel Cells

L'UTC Fuel Cells (in passato International Fuel Cells, Connecticut, USA), la sola società al mondo a produrre impianti commerciali con celle a combustibile (unità PAFC da 200 kW per generazione on site) da alcuni anni ha avviato la progettazione e lo sviluppo di sistemi PEFC di piccola taglia (5-10 kW) per applicazioni residenziali e commerciali. Gli impianti utilizzano gas naturale o propano.



Mock up dell'unità PEFC da 5-10 kW
(UTC Fuel Cells)

L'UTC Fuel Cells, nel settembre 2000 ha annunciato che la collaborazione in corso con la giapponese **Toshiba Corp.**, relativa allo sviluppo e vendita in Giappone di impianti per cogenerazione on-site con celle ad acido fosforico (impianti PC25), era stata allargata a comprendere anche celle di tipo polimerico.

La Toshiba Corp. ha in corso lo sviluppo di moduli PEFC di potenza inferiore ai 10 kW (a gas naturale o propano). La società giapponese prevede di commercializzare unità per cogenerazione di taglia 1 kW dal 2005; il costo iniziale sarà tra i 3.000 e i 4.100 \$.

L'UTC Fuel Cells, ha avviato inoltre una collaborazione con la **Buderus Heiztechnik GmbH**, società tedesca produttrice di sistemi di riscaldamento domestico, per sviluppare e vendere in Europa unità PEFC per cogenerazione di piccola-media taglia. Le prime unità dovrebbero entrare in esercizio entro la metà del 2003.

■ Energy Partners

La Energy Partners (Florida, USA), costituita nel 1990, è interessata allo sviluppo di sistemi PEFC di potenza fino a 50 kW per applicazioni residenziali e commerciali.

La società sta lavorando allo sviluppo di prototipi dimostrativi da 3 kW a gas naturale per usi residenziali, la cui disponibilità commerciale è prevista entro il 2002.

I sistemi in sviluppo integrano stack di tecnologia Energy Partners, con fuel processor del tipo "Hot Spot" prodotti dalla britannica Johnson Matthey.

■ Sanyo Electric Co.

In Giappone, la Sanyo Electric Co. è impegnata nello sviluppo di sistemi PEFC per cogenerazione.

Nel 1998 era stato realizzato e provato un sistema di potenza 1 kW, alimentato ad idrogeno, per la generazione di emergenza. Attualmente gli interessi della società sono rivolti allo sviluppo di sistemi per cogenerazione di tipo residenziale di potenza 2-3 kW.

Il primo prototipo da 1 kW (60 celle), alimentato a gas naturale, è stato completato alla fine del 1999.



Unità da 1 kW a idrogeno
(Sanyo Electric Co.)

Due unità Sanyo da 0,8 kW per cogenerazione sono in corso di sperimentazione nelle città di Tokyo e a Nagoya, all'interno del programma della **Japan Gas Association**, finanziato dal governo giapponese. Scopo di questo programma, entro il quale si stanno provando 10 unità PEFC per cogenerazione di taglia 1 kW, ottenute da industrie sia giapponesi che statunitensi, è quello di raccogliere dati tecnici utili a stabilire codici e normative necessari per l'introduzione di modelli commerciali.

Ad agosto 2001 la Sanyo ha annunciato una collaborazione con la **Osaka Gas**, la quale si occuperà dello sviluppo della sezione di reforming. Obiettivo delle due società è quello di entrare sul mercato con unità da 1 kW a partire dal 2005.

■ General Motors

La General Motors ha presentato 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. L'unità ha operato per sei mesi presso il centro ricerche GM di Rochester (New York, USA).

Secondo quanto asserito dai vertici della società il sistema potrebbe essere commercializzato dal 2005.



Unità GM da 5 kW

APPLICAZIONI NEL TRASPORTO

Per impieghi nel settore del trasporto sono state sperimentate celle a combustibile di diverso tipo. Le celle ad elettrolita polimerico, alimentate ad idrogeno o metanolo, sono tuttavia quelle su cui si concentra il maggior interesse.

Negli **Stati Uniti**, il Department of Energy (DoE) finanzia dal 1994 attività dirette allo sviluppo di sistemi di propulsione con celle a combustibile all'interno del *Fuel Cells for Transportation Program*.

Le celle a combustibile ad elettrolita polimerico erano state individuate come la tecnologia più adatta per ottenere l'obiettivo del programma, che è quello di promuovere lo sviluppo di sistemi di propulsione ad alta efficienza e ad emissioni molto basse o nulle.

All'interno del programma finora sono state sostenute principalmente attività che hanno riguardato lo sviluppo di stack, di sistemi di trattamento del combustibile, nonché di ausiliari del sistema (compressori, sistema di alimentazione, controlli, ecc.).

Recentemente, come conseguenza della crescita d'interesse verso l'idrogeno, si è deciso di aumentare gli impegni nelle aree relative allo sviluppo dei sistemi di stoccaggio idrogeno e delle infrastrutture necessarie alla sua distribuzione.

Il DoE aveva fissato nel 1994 gli obiettivi da raggiungere entro il decennio, sia per il sistema stack (completo di ausiliari), che per il sistema di trattamento del combustibile. Dal momento che alcuni di questi obiettivi risultavano in parte già superati, nel corso del 2001 si era provveduto ad un aggiornamento degli stessi ed era stato esteso anche il periodo temporale per il loro conseguimento. Sono stati inoltre inseriti nuovi obiettivi da raggiungere per sistemi che usano direttamente idrogeno.

A gennaio 2002, DoE ed United States Council for Automotive Research (USCAR), che rappresenta le tre maggiori case automobilistiche statunitensi (General Motors, DaimlerChrysler Corp. e Ford Motor Co.), hanno annunciato l'avvio di un nuovo programma, il **FreedomCAR** (Cooperative Automotive Research), all'interno del quale

SISTEMA INTEGRATO DA 50 kW ALIMENTATO A BENZINA^a
Stato della tecnologia ed obiettivi DoE al 2005 e al 2010

	STATO ATTUALE	2005	2010
Efficienza @ 25% potenza di picco, %	34	40	45
Efficienza @ potenza di picco, %	31	33	35
Densità di potenza, W/L	140	250	325
Potenza specifica, W/kg	140	250	325
Costo, \$/kW	300	125	45
Risposta nei transitori (10-90% potenza max), s	15	5	1
Tempo di avviamento (-20 °C a Pmax), s	10	2	1
Tempo di avviamento (20 °C a Pmax), s	< 5	< 1	< 0,5
Temperatura min. ammissibile, °C	- 20	- 30	- 40
Emissioni	< Tier2	< Tier2	< Tier2
Durata, h	1000	4000	5000

a. Il sistema comprende il fuel processor, stack, ausiliari e dispositivi di avviamento

SISTEMA STACK Da 50 kW - Idrogeno da reformer
Stato della tecnologia ed obiettivi DoE al 2005 e al 2010

	STATO ATTUALE	2005	2010
Densità di potenza, W/L	200	400	550
Potenza specifica, W/kg	200	400	550
Efficienza @ 25% potenza di picco, %	45	50	55
Efficienza @ potenza di picco, %	40	42	44
Carico di metallo prezioso	2,0	0,6	0,2
Costo, \$/kW	200	100	35
Durata, h	> 1000	> 4000	> 5000
Risposta nei transitori (10-90% potenza max), s	3	2	1
Tempo di avviamento (-20 °C a Pmax), s	2	1	0,5
Tempo di avviamento (20 °C a Pmax), s	1	0,5	0,25
Temperatura min. ammissibile, °C	-20	-30	-40
Tolleranza al CO (stato stazion.), ppm	25	500	500
Tolleranza al CO (transitori), ppm	100	500	1000

SISTEMA INTEGRATO DA 50 kW ALIMENTATO DIRETTAMENTE A IDROGENO
Stato della tecnologia ed obiettivi DoE al 2005 e al 2010

	STATO ATTUALE	2005	2010
Efficienza @ 25% potenza di picco, %	59	60	60
Efficienza @ potenza di picco, %	50	50	50
Densità di potenza (escluso stoccaggio H ₂), W/L	400	500	650
Densità di potenza (incluso stoccaggio H ₂), W/L	-	150	220
Potenza specifica (escluso stoccaggio H ₂), W/kg	400	500	650
Potenza specifica, W/kg (incluso stoccaggio H ₂)	-	250	325
Costo (incluso stoccaggio H ₂), \$/kW *	200	125	45
Risposta nei transitori (10-90% potenza max), s	3	2	1
Tempo di avviamento (-20 °C a potenza max), s	120	60	30
Tempo di avviamento (20 °C a potenza max), s	60	30	15
Temperatura min. ammissibile, °C	- 20	- 30	- 40
Emissioni	0	0	0
Durata, h	1000	2000	5000

* Costi previsti per produzioni di 500.000 unità/anno.

università stanno lavorando allo sviluppo di stack e di sistemi di trattamento del combustibile; in particolare **UTC Fuel Cells, Plug Power, Energy Partners, Honeywell** (in precedenza Allied Signal) sono impegnate nella realizzazione di sistemi integrati di taglia fino a 50 kW.

In **Giappone**, attività di ricerca e sviluppo di veicoli con celle a combustibile e di tecnologie correlate alla produzione, distribuzione dell'idrogeno che dovrà alimentarli sono previsti all'interno del programma *World Energy Network* (WE-NET), avviato dal NEDO nel 1993. Obiettivo generale di questo programma è di sviluppare, entro il 2020, le tecnologie necessarie per avviare la realizzazione di un sistema energetico basato sull'idrogeno, prodotto principalmente da fonti rinnovabili.

Lo sviluppo di veicoli con celle a combustibile riceve pieno appoggio da parte del governo giapponese, attraverso il NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), che dal 1998 ha in corso programmi di sviluppo della tecnologia, ed il METI (Ministry of Economy, Trade and Industry), che sta già lavorando per definire standard industriali per componenti e materiali utilizzati, e normative relative agli aspetti di sicurezza. Il METI prevede la creazione di un mercato pari a 50.000 unità entro il 2010. In questo Paese programmi di sviluppo di veicoli alimentati con PEFC sono in atto praticamente presso tutte le case automobilistiche (Toyota, Honda, Nissan, Mazda, Daihatsu).

In **Europa**, fin dagli inizi degli anni '90, nell'ambito del *EQHHPP* (Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project), industrie ed organizzazioni di ricerca europee hanno svolto attività di sviluppo e dimostrazione di veicoli a celle a combustibile; al momento iniziative di un certo rilievo sono in corso in Germania ed Islanda.

Il settore dei trasporti è indicato nel *Quinto Programma Quadro* della Commissione Europea come uno dei settori chiave sui quali agire per conseguire la sostenibilità dello sviluppo; nelle sue strategie d'intervento la Commissione ha riservato finora una notevole priorità alle applicazioni delle celle a combustibile alla trazione. I progetti finanziati all'interno dei programmi comunitari, che hanno forte partecipazione privata, hanno riguardato non solo lo sviluppo della tecnologia di cella, quanto la sua integrazione a bordo del veicolo; sono stati pertanto realizzate alcune concept-car e prototipi di autobus. Sempre con finanziamenti europei sono in corso o stanno per essere avviati programmi che, come vedremo in seguito, prevedono l'esercizio sperimentale di alcuni autobus a idrogeno in diverse città europee. Future attività in questo settore sono previste anche all'interno del prossimo Programma Quadro.

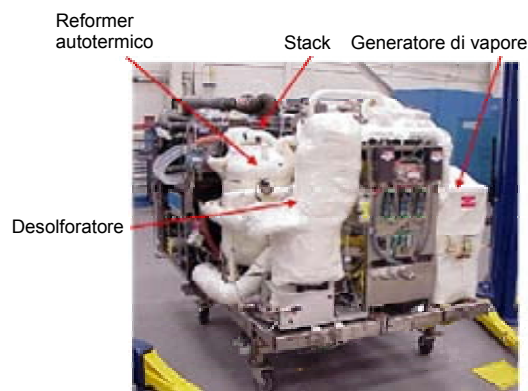
In Europa, oltre **XCELLSiS** (D), sviluppano sistemi PEFC per trasporto la **Siemens** (D) e la **Nuvera Fuel Cells Europe** (I).

saranno finanziate le attività di sviluppo di veicoli a celle a combustibile ad idrogeno.

Il nuovo programma sostituisce il Programma Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV), che ricordiamo aveva l'obiettivo di sviluppare e dimostrare, entro il 2004, la fattibilità tecnologica di veicoli a basso consumo (80 miglia/gallone), ma equivalenti in termini di prestazioni e costi ai veicoli di oggi.

Per il FreedomCAR, è stato proposto per il 2003 uno stanziamento di circa 150 milioni di dollari, la metà dei quali destinati ad attività di R&S su celle a combustibile (50 M\$) ed idrogeno (25 M\$); la parte restante continuerà a sostenere attività di sviluppo di tecnologie a basso impatto ambientale ed in grado di ridurre consumi di energia (motori a combustione interna di tipo avanzato o motori ibridi gas/elettrico).

Nell'ambito del programma DoE, industrie, centri di ricerca governativi ed



Modello di sistema integrato da 50 kW (UTC Fuel Cells)

Ballard Power Systems/XCELLSiS

La Ballard Power Systems, che come abbiamo visto è riconosciuta come la società leader nella tecnologia delle celle ad elettrolita polimerico, nel 1998 ha formato una alleanza strategica, la "Vehicular Alliance", con Daimler-Chrysler e Ford Motor Co. (le due società possedevano rispettivamente il 18% e il 13% delle azioni Ballard). All'interno di questa alleanza era stata costituita la **XCELLSiS**, per lo sviluppo e la commercializzazione di celle a combustibile per trazione, e la **Ecostar Electric Drive Systems** per lo sviluppo del drive-train elettrico. Obiettivo del gruppo è quello di arrivare alla produzione in serie di veicoli con celle a combustibile nel 2004.

Lo scorso novembre questa alleanza è stata riorganizzata: Ballard ha acquisito completamente la XCELLSiS e la Ecostar Electric Drive Systems, e nello stesso tempo DaimlerChrysler e Ford hanno acquistato maggiori quote azionarie della Ballard, passando rispettivamente al 23,6% e al 19,5%.

La tecnologia Ballard è utilizzata dai principali costruttori automobilistici impegnati nello sviluppo di prototipi di veicoli alimentati con celle a combustibile (Volkswagen, Volvo, Honda, Nissan, Yamaha, Hyundai e nella prima fase di sviluppo anche dalla General Motors).

A gennaio 2000, nell'ambito della sua collaborazione con la DaimlerChrysler, Ballard aveva presentato un'unità di potenza 75 kW (Mark 900), in grado di operare sia con idrogeno che con metanolo, che raggiungeva 1,31 kW/l (1,23 kW/l con gas di riforma). Lo stack nel 2001 ha subito un'ottimizzazione: il Mark 902 sembra presentare una maggiore densità di potenza, affidabilità, costi più bassi ed sarà più facilmente integrabile in sistemi completi per trazione.



■ UTC Fuel Cells

Come Ballard, anche l'UTC Fuel Cells ha realizzato sistemi da 75 kW (stack Series 300). 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 modulo pronto per l'installazione su un veicolo. Sistemi di questo tipo sono utilizzati dalla Hyundai e IRISBUS (gruppo IVECO).



Stack da 50 kW (UTC Fuel Cells)

La UTC Fuel Cells ha inoltre sviluppato e consegnato alla **BMW** una cella polimerica da 5 kW ad idrogeno. Il sistema, installato su una BMW serie 7, viene usato come unità APU (Auxiliary Power Unit) e fornisce all'auto potenza per i vari circuiti elettrici a bordo.

■ General Motors

Parallelamente allo sviluppo di veicoli alimentati con celle a combustibile, la GM sta portando avanti ricerche intese a sviluppare una configurazione proprietaria di stack.






L'ultimo sistema messo a punto genera 1,75 kW/l e si dimostra quindi il migliore tra i prodotti finora presentati.

L'unità ha una potenza di 102 kW (potenza di picco 129 kW), pesa 82 kg e misura 82 x 14 x 50 cm (58 litri). Lo stack inoltre ha un'eccellente partenza a freddo, raggiunge infatti la piena potenza in 30 secondi a -20 °C.

SVILUPPO DI PROTOTIPI DI VEICOLI

■ DaimlerChrysler

La DaimlerChrysler sta lavorando da oltre un decennio allo sviluppo di veicoli con celle a combustibile. La collaborazione con la Ballard Power Systems ha portato a realizzare diversi prototipi di autovetture e autobus.

<p>NECAR I - 1994</p> <p>Potenza: 50 kW (12 stack) Densità di potenza: 167 W/l Autonomia: 130 km Velocità max.: 90 km/h</p>	 <p><i>Idrogeno compresso</i></p>
<p>NECAR II - 1996</p> <p>Potenza: 50 kW (2 stack) Densità di potenza: 1 kW/l Autonomia: 250 km Velocità max.: 110 km/h</p>	 <p><i>Idrogeno compresso</i></p>
<p>NECAR 3 - 1997</p> <p>Potenza: 50 kW Densità di potenza: 1 kW/l Autonomia: 400 km Velocità max.: 120 km/h</p>	 <p><i>Metanolo</i></p>
<p>NECAR 4 - 1999</p> <p>Potenza: 70 kW Densità di potenza: 1 kW/l Autonomia: 450 km Velocità max.: 145 km/h</p>	 <p><i>Idrogeno liquido</i></p>
<p>NECAR 5 - 2000</p> <p>Potenza: 75 kW Autonomia: 500-600 km Velocità max.: 150 km/h</p>	 <p><i>Metanolo</i></p>

L'ultimo veicolo realizzato nel 2000 nell'ambito del progetto NECAR (New Electric Car) è stata un'autovettura (NECAR 5) alimentata a metanolo che offre prestazioni ed abitabilità paragonabili a quelle di un veicolo tradizionale. Il sistema, montato completamente sul pianale dell'auto, pesa ben 300 kg in meno di quello installato sulla precedente vettura a metanolo, la NECAR 3.

Nel 2001 è stata realizzata una versione avanzata della NECAR 4 (NECAR 4a). Con questo modello la DaimlerChrysler partecipa alle prove dimostrative per la "California Fuel Cell Partnership". Il veicolo a differenza del suo predecessore è alimentato con idrogeno compresso a 350 bar (3 bombole).



Jeep Commander 2

Nel novembre 2000, era stata presentata anche la **Jeep Commander 2**, un veicolo con motore ibrido celle/batteria che utilizzava metanolo come combustibile.

È del 2001 il **Fuel Cell Sprinter**, un van a idrogeno, che con uno stack da 55 kW presenta una velocità di 120 km/h ed una autonomia che supera i 150 km.



Fuel Cell Sprinter

Le prove del veicolo sono iniziate a settembre 2001 da parte di una società di recapito posta, la Hermes Versand di Amburgo.

Ricordiamo che DaimlerChrysler ha anche realizzato (1999) un prototipo con il quale intendeva dimostrare la possibilità che le celle a combustibile possono essere usate come sorgente di potenza ausiliaria (APU) su veicoli di tipo tradizionale (nel caso specifico una Mercedes Classe S).

Sull'auto era montata un'unità PEFC da 3 kW, che a motore spento forniva la potenza elettrica necessaria ad alimentare il sistema di condizionamento del veicolo, luci ed altri sistemi elettrici installati a bordo.



Mercedes Classe S

DaimlerChrysler ha dichiarato che disporrà di veicoli commerciali a partire dal 2004.

Le attività DaimlerChrysler prevedono in parallelo anche lo sviluppo di autobus per il trasporto pubblico. Nel 1997, in collaborazione con Ballard è stato realizzato il NEBUS, un autobus alimentato a idrogeno.

Nel agosto 1999 un prototipo di questo tipo ha prestato servizio ad Oslo, nell'ambito di una collaborazione con la Greater Oslo Transit Authority e la Norsk Hydro, aziende che fin dal 1994 stanno valutando la possibilità di utilizzare idrogeno per l'alimentazione di mezzi di trasporto pubblici.

DaimlerChrysler ha in programma di costruire 30 autobus basati sul modello MercedesBenz Citaro. Questi autobus saranno venduti a operatori di paesi europei e non ad un prezzo di circa 1,28 milioni di Euro. I primi prototipi entreranno in servizio nel 2002. Sono previste prove nelle seguenti città: Amsterdam, Madrid, Barcellona, Amburgo, Stoccarda, Londra, Lussemburgo, Stoccolma, Porto e Reykjavik.

I veicoli, in versione "full power", saranno realizzati utilizzando unità XCELLSiS



NEBUS
Potenza: 250 kW (10 stack)
Autonomia: 250 km
Velocità max: 80 km/h



Citaro Bus
Potenza: 250 kW
Autonomia: 300 km
Velocità max: 80 km/h



In California nel 1999 si è costituita la California Fuel Cell Partnership, alla quale aderiscono costruttori automobilistici e di celle a combustibile, compagnie petrolifere ed agenzie di governo.

Obiettivo del gruppo è quello di provare "sul campo" la tecnologia delle celle a combustibile; saranno quindi realizzati e posti su strada oltre 70 veicoli (tra autovetture ed autobus) tra il 2000 ed il 2003. Obiettivo sarà anche quello di dimostrare la fattibilità dell'integrazione di combustibili, come idrogeno o metanolo, nelle attuali infrastrutture di distribuzione, definire i passi necessari ad avviare la commercializzazione, creare condizioni affinché gli utenti prendano confidenza con la tecnologia, superando le preoccupazioni connesse con la novità della stessa, soprattutto in termini di sicurezza ed affidabilità.

MEMBRI DELLA CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP		
Agenzie governative	Costruttori autoveicoli	Costruttori celle a combustibile
California Air Resources Board California Energy Commission South Coast Air Quality Management District US Department of Energy US Department of Transportation	DaimlerChrysler Ford General Motors Honda Hyundai Nissan Toyota Volkswagen	Ballard Power Systems UTC Fuel Cells
		Compagnie petrolifere e fornitori combustibile
		BP Exxon Mobil Shell Hydrogen Texaco HbT* Methanex * Air Products * Pacific Gas & Electric* Praxair * Proton Energy Systems Stuart Energy *
Agenzie di trasporto pubblico		
AC Transit * SunLine Transit Agency * Santa Clara Valley Transit Agency*		

* Partner associati

Si ricorda che, in California, i Clean Air Act Amendments del 1990 hanno stabilito normative molto severe per le emissioni inquinanti al fine di ridurre l'immissione nell'aria di sostanze come ossidi di azoto, ossido di carbonio ed idrocarburi incombusti e che si è imposto alle aziende automobilistiche che il 10% delle nuove autovetture vendute nello stato a partire dal 2003 sia ad "emissioni zero". Proprio questa iniziativa legislativa, accolta anche da altri Stati americani (New York, Massachusetts e Maine), sta favorendo lo sviluppo da parte delle maggiori case automobilistiche di veicoli alimentati con celle a combustibile. Grossi passi avanti sono state fatti dalla Ford, dalla Opel/General Motors e dalla Honda che, al pari della DaimlerChrysler,

FASI DEL PROGETTO	
I Fase 1999	Definizione del programma
II Fase 2000-2001	Dimostrazione autoveicoli, fino a 18 autovetture e 5 autobus
III Fase 2002-2003	Dimostrazione autoveicoli, fino a 56 autovetture e 20 autobus

sono arrivate a sviluppare vetture alimentate ad idrogeno o metanolo che offrono prestazioni, abitabilità e comfort paragonabili a quelle di un veicolo tradizionale.

■ **General Motors/Opel**

La General Motors svolge la maggior parte delle sue ricerche sui veicoli a celle a combustibile presso il Global Alternative Propulsion Center (GAPC) della Opel, in Germania.

Ricordiamo che la Opel aveva presentato a settembre 1998, un primo veicolo alimentato a metanolo, la Zafira, auto a due posti con un motore elettrico da 50 kW.



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

Al Motor Show di Detroit del 2000, la General Motors aveva esposto la versione con celle a combustibile della Precept, su cui era installato uno stack PEFC di potenza 100 kW, alimentato con idrogeno stoccato su idruri metallici.

Qualche mese più tardi (giugno 2000) il gruppo GM ha presentato la HydroGen 1, una Zafira alimentata ad idrogeno liquido, in cui la potenza è data da uno stack PEFC, che presenta un ingombro (59 x 27

x 55 cm) praticamente paragonabile a quello di un motore tradizionale a benzina o diesel.

Il mock-up della versione avanzata di quest'auto, l'HydroGen 3, è stato esposto nel 2001 al Motor Show di Tokyo. Sul veicolo è montato uno stack di ultima generazione (94 kW, 1,6 kW/kg) ancora più compatto (47,2 x 25,1 x 49,6 cm) del suo predecessore. L'auto, alimentata con idrogeno liquido (serbatoio da 68 litri), avrà un'autonomia di 400 km e raggiungerà una velocità di 150 km/h.



GM /HydroGen 3

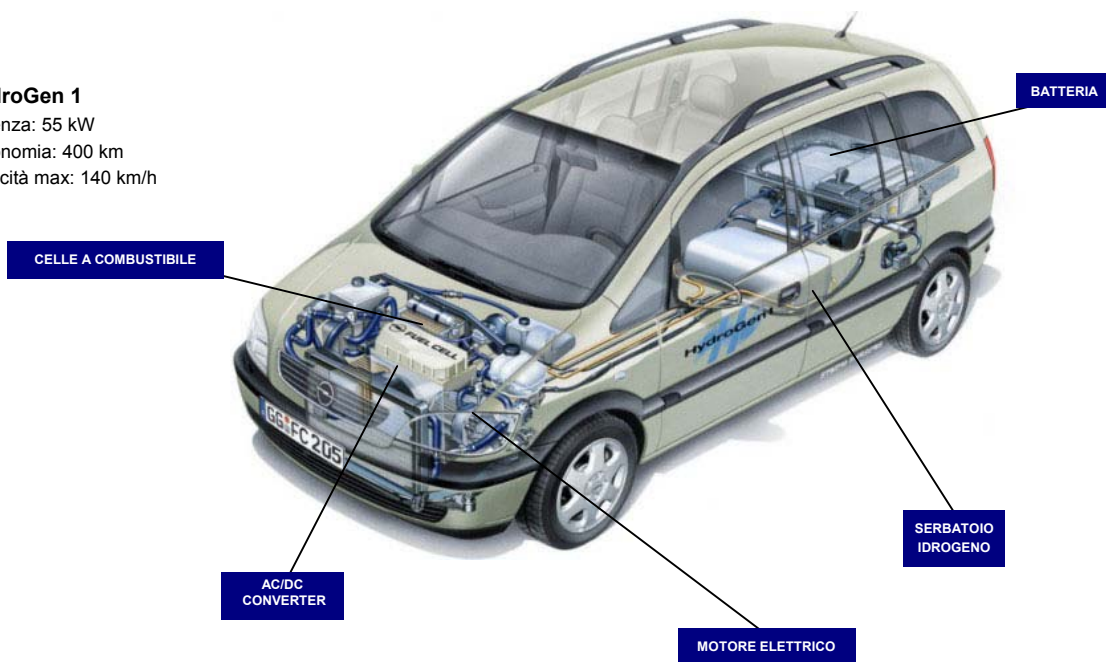
Nella stessa occasione la GM ha mostrato un pick-up Chevrolet S-10 alimentato a benzina. Il reformer e gli ausiliari al momento occupano la metà del vano di carico del veicolo.



FC pick-up S-10
Potenza celle: 25 kW
Alimentazione: benzina

Come la maggior parte delle case automobilistiche, il gruppo General Motors punta ad ottenere, entro il 2004, prodotti perfettamente competitivi con quelli tradizionali non solo sul piano delle prestazioni e dei costi, ma anche su quello del comfort e della sicurezza.

HydroGen 1
Potenza: 55 kW
Autonomia: 400 km
Velocità max: 140 km/h



■ Ford Motor Company

La Ford Motor Co. è impegnata nello sviluppo di autovetture alimentate ad idrogeno dal 1994 e sta lavorando su veicoli con celle a combustibile sia nel quadro della Partnership for a New Generation of Vehicles (oggi FreedomCAR), sia al suo interno con progetti esclusivi.

Come membro del PNGV, la Ford, oltre che con la Ballard, per lo sviluppo degli stack ha avuto collaborazioni anche con altri costruttori (Plug Power ed UTC Fuel Cells).

Ford Motor Company ha presentato il primo prototipo (concept car) di veicolo alimentato con celle a combustibile, la P2000 FCV, al North American International Auto Show a Detroit nel 1998. Si trattava di una vettura alimentata ad idrogeno, che impiegava un sistema fornito dalla XCELLSiS di taglia 60 kW (3 stack PEFC).



Ford P2000

A gennaio 2000, la Ford aveva quindi presentato un veicolo di 2^a generazione, l'FC5 Focus. Il prototipo, che a differenza del precedente era alimentato a metanolo, utilizzava uno stack Ballard MK 900, con densità di potenza pari a 1,3 kW/l. Con la potenza elettrica generata da quest'unità, la vettura forniva un'ottima efficienza, unitamente a velocità e prestazioni simili a quelle dell'analogo modello diesel.



Infine a ottobre 2000, allo Speciality Equipment Market Association (SEMA), era stata esposta la versione ad idrogeno della Focus FCV, con quest'auto la Ford probabilmente avvierà la produzione di serie.

La Ford Motor Company ha dato in uso una Focus FCV alla "California Fuel Cell Partnership" per prove su strada.

Ford Focus FCV

Potenza: 75 kW (Ballard Mark 900)
Combustibile: idrogeno
Velocità max: 128 km/h



La casa statunitense ha annunciato che inizierà la produzione di vetture a celle a combustibile, da utilizzare per flotte dimostrative, entro il 2004 e che la vendita al pubblico non avverrà prima del 2010.

■ Honda Motor Co.

La Honda Motor Co. ha iniziato ad esplorare le potenzialità delle celle a combustibile nel 1989 e da allora ha sviluppato un certo numero di veicoli.



Honda FCX-V3
Combustibile: idrogeno
Potenza: 62 kW
Autonomia: 180 km
Velocità max: 130 km/h

Dopo la realizzazione di due prototipi di veicoli ibridi, uno alimentato a idrogeno (FCX-V1) e l'altro a metanolo (FCX-V2), a settembre 2000 ha presentato 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 abbassato 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 atm) era passato a soli 5 minuti contro i 20 minuti registrati con la FCX-V1. Sulla FCX-V3 un supercondensatore sostituiva la batteria ad idruri metallici usata nella versione precedente e anziché di stack Ballard si faceva uso di un sistema messo a punto dalla stessa Honda.

Esattamente un anno dopo (settembre 2001) è stato presentato un prototipo di 4^a generazione, la FCX-V4. In cui il sistema cella è stato riprogettato per renderlo più compatto e sono state ulteriormente migliorate le prestazioni e la sicurezza del veicolo. Sul veicolo è installato uno stack Ballard, anche se Honda continua a lavorare per sviluppare una propria tecnologia di stack.

Honda intende arrivare a realizzare 300 veicoli alimentati con celle a combustibile già a partire dal 2003 per il mercato interno e statunitense; tuttavia è dell'opinione che auto a celle a combustibile compariranno in gran numero sulle strade non prima di 10-20 anni.

Honda FCX-V4
Combustibile: idrogeno
Potenza: 75 kW (stack Ballard)
Autonomia: 300 km
Velocità max: 140 km/h





Toyota RAV-4 (1997)
Potenza 20 kW
Combustibile: metanolo
Autonomia: 500 km
Velocità max: > 125 km/h



Toyota FCHV-3 (marzo 2001)
Potenza: 90 kW
Combustibile: idrogeno
Autonomia: 300 km
Velocità max: 150 km/h



Toyota FCHV-4 (giugno 2001)
Potenza: 90 kW
Combustibile: idrogeno
Autonomia: > 250 km
Velocità max: 150 km/h



Toyota FCHV-5 (settembre 2001)
Potenza: 90 kW
Combustibile: idrogeno da reformer

In collaborazione con la **Hino Motor Co Ltd**, la Toyota ha costruito un autobus ibrido a idrogeno. Il prototipo FCHV-BUS1 ha un'autonomia di 300 km e può raggiungere una velocità massima di 80 km/h. Sono in corso test dimostrativi e nell'autunno 2002 è previsto un periodo di esercizio su strada nella città di Tokyo.



FCHV-BUS1

Dal dicembre 1999, la Toyota collabora con General Motors in attività che riguardano la tecnologia delle celle a combustibile e le due aziende hanno raggiunto un accordo con la **Exxon Mobil Corp.** che sta svolgendo ricerche per mettere a punto combustibili idrocarburi "puliti" da usare nei veicoli a celle a combustibile, in vista di un impiego a lungo termine dell'idrogeno.

■ Mazda Motor Corp.

La Mazda ha presentato nel 1997 il suo primo veicolo, la Demio FCEV, un ibrido celle-supercondensatore che utilizzava idrogeno stoccato su idruri metallici. Sul veicolo era installato un sistema PEFC sviluppato in proprio. L'anno successivo la società ha iniziato a lavorare in collaborazione con la Ford, e nel 1999 è stata presentata una seconda versione della Demio in cui è installata un'unità PEFC ottimizzata, sviluppata da XCELLSiS.



Mazda Premacy FC-EV
Potenza totale: 65 kW
Alimentazione: metanolo

Mazda Demio FC-EV
Potenza totale: 40 kW (celle 20 kW)
(4 stack da 5 kW)
Autonomia: 170 km
Velocità max: 90 km/h



L'ultimo prototipo, sviluppato in collaborazione con il gruppo TH!NK della Ford, la Premacy FC-EV, è stata esposta a febbraio 2001 ed utilizza metanolo.

Quest'autovettura è attualmente sottoposta a prove su strada in Giappone, in collaborazione con DaimlerChrysler Japan Holding Ltd e Nippon Mitsubishi Oil (fornitore delle infrastrutture per il combustibile). Il progetto riceve finanziamenti dal METI.

■ Daihatsu Motor Co.

La Daihatsu, che sviluppa veicoli elettrici dal 1965, ha realizzato il suo primo prototipo a celle a combustibile nel 1999, la Move EV-FC. L'auto era alimentata a metanolo, con reformer sviluppato nel quadro di una collaborazione con l'Osaka National Research Institute.

Al Motor Show di Tokyo del 2001 la Daihatsu ha esposto la Move FCV-K-II, una minivettura a quattro posti alimentata ad idrogeno compresso. Sul veicolo è installato uno stack da 30 kW fornito dalla Toyota.



Daihatsu Move FCV-K-II

■ Hyundai Motor Co.

In collaborazione con le società statunitensi UTC Fuel Cells, Enova Systems ed IMPCO Technologies, la Hyundai, che lavora allo sviluppo di veicoli a celle a combustibile dal 1998, ha realizzato un veicolo a idrogeno, che ha esposto ufficialmente all'apertura della nuova sede della California Fuel Cell Partnership, nel novembre 2000.



Hyundai Santa Fe FCEV

Potenza: 75 kW
Autonomia: 160 km
Velocità max: 124 km/h

In precedenza aveva realizzato, con la KIA, una "concept car" alimentata a metanolo.

La Hyundai prevede di sviluppare, a partire dal 2002, vetture a celle a combustibile alimentate a benzina.

■ PSA Peugeot-Citroen

La PSA Peugeot-Citroen sta realizzando veicoli a celle polimeriche a idrogeno sia in collaborazione con industrie europee, che attraverso progetti in proprio.

Il programma Hydro-Gen, avviato nel 1996 e finanziato dalla Commissione Europea, ha visto la partecipazione di Nuvera Fuel Cells Europa (I), CEA (Atomic Energy Commission), Solvay e Renault (F). Questo programma ha condotto alla realizzazione di un prototipo dimostrativo derivato della Peugeot Partner elettrica. Sull'auto è installato uno stack PEFC da 30 kW alimentato a idrogeno stoccato in bombole ad alta pressione (350 bar).

Peugeot ha costruito nel 2001 un secondo prototipo dimostrativo, un taxi ibrido (derivato ancora dalla versione elettrica della Peugeot Partner) sul quale è montato uno stack da 5,5 kW fornito da H Power. L'idrogeno è stoccato in bombole sistemate in un rack, che può essere eventualmente rimosso al momento del rifornimento.

La PSA, parallelamente allo sviluppo di veicoli con celle polimeriche, sta realizzando all'interno del programma europeo NEMECCEL, avviato nel dicembre 1997, un veicolo che utilizza celle a metanolo diretto.

■ Nissan Motor Co.

La Nissan ha presentato il suo primo vero prototipo nel 1999: si trattava un veicolo ibrido celle-batterie, alimentato a metanolo, con il quale ha effettuato una serie di prove su strada.



Nissan FCV
Potenza cella: 10 kW

A ottobre 2000 è stato presentato un secondo prototipo, basato su una Nissan XTERRA SUV. L'auto, che è in prova da maggio 2001, è alimentata a idrogeno compresso e monta uno stack XCELLSiS (unità MK 901).



Nissan XTERRA
Potenza cella: 75 kW
Autonomi: 200 km

Con questo prototipo la Nissan partecipa alle prove previste nel quadro del programma della California Fuel Cell Partnership, alla quale ha aderito nel marzo 2000.

Lo scorso giugno Nissan ha annunciato un accordo con la Renault per sviluppare veicoli con celle a combustibile alimentate a benzina.

Obiettivo della casa giapponese è quello di iniziare la produzione commerciale di veicoli a celle a combustibile entro la fine del 2005 (Nissan Green Program 2005).



PSA Peugeot Citroen Hydro-Gen

Autonomia: 300 km
Velocità max: 95 km/h



PSA Peugeot Citroen Hydro-Gen

Autonomia: 300 km
Velocità max: 95 km/h

■ Volkswagen

All'interno dei programmi dell'Unione Europea, Volkswagen ha coordinato un progetto finalizzato alla realizzazione di un'auto ibrida a metanolo, il progetto CAPRI (Car Autothermal Process Reactor Initiative), che ha visto la partecipazione della ECN (NL), Johnson Matthey (UK) e Volvo (S).

Il prototipo aveva le seguenti caratteristiche:

- Potenza totale: 50 kW (potenza celle 15 kW)
- Autonomia: 400 km (con 40 litri metanolo)
- Emissioni: 0,15 g/km di CO, 0,02 g/km di HC + NO_x.

Volkswagen CAPRI



Volkswagen a novembre 2000 ha presentato la sua prima auto a celle a combustibile alimentata a idrogeno liquido, la Bora HyMotion, vettura con la quale partecipa alle attività del programma della California Fuel Cell Partnership.

Volkswagen
Bora HyMotion (2000)
 Potenza: 75 kW
 Autonomia: 350 km
 Velocità max: 140 km/h



■ Renault

Renault, con De Nora (ora Nuvera Fuel Cells Europe), Ansaldo Ricerche (I), Volvo TD (S), Ecole des Mines de Paris e Air Liquid (F), all'interno del programma europeo Joule ha sviluppato nel 1998 la FEVER (Fuel Cell Electric Vehicle of Extended Range), derivata da una Renault Laguna station wagon. Scopo del programma era quello di acquisire conoscenze sull'integrazione ed l'utilizzazione di celle a combustibile a bordo di veicoli. Il programma si è concluso con la presentazione alla Commissione Europea del prototipo dimostrativo.

La FEVER è un veicolo, in configurazione ibrida celle-batteria, che utilizza come combustibile idrogeno liquido.



Renault FEVER (1998)
 Potenza celle: 30 kW
 Autonomia: 500 km
 Velocità max: 90 km/h

Come accennato in precedenza Renault ha raggiunto recentemente un accordo con la Nissan per sviluppare veicoli con celle a combustibile in grado di utilizzare benzina.

■ Siemens

Siemens (Erlanger, D) collabora con la MAN e la Linde AG nella realizzazione di prototipi di autobus, alimentati a idrogeno compresso (150 kW di celle, con autonomia prevista in 300 km) ed ha in corso lo sviluppo di celle per applicazioni militari (sottomarini) nel quadro di un programma con il Ministero della Difesa tedesco.

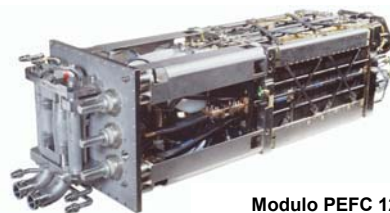


Siemens - Unità PEFC
per sottomarino HDW Classe U212

Il primo stack PEFC (30 kW) da utilizzare per la propulsione di un sottomarino per la Marina tedesca è stato consegnato alla Howaldtwerke-Deutsche Werft (HDW, Kiel, D) nel 1998.

La Siemens sta realizzando inoltre moduli da 300 kW per due sottomarini che la HDW e la Thyssen Nordseewerke sta costruendo per la Marina italiana e che dovrebbero essere consegnati entro il 2003.

Proprio per questo tipo di applicazioni, la Siemens ha recentemente messo a punto unità da 120 kW, che a parità di volume e peso consentono prestazioni 4 volte superiori ai moduli già in uso. Due unità di questo tipo saranno installate su sottomarini ordinati alla HDW dalla Marina greca e sud coreana.



Modulo PEFC 120 kW
 (Source: Siemens)

■ Ballard Power Systems/XCELLSiS

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

Tra il dicembre 1997 e la prima metà del 1998 sono stati realizzati sei autobus di questo tipo, che sono 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 questo programma dimostrativo sono state tratte informazioni che hanno portato ad un'ulteriore evoluzione della tecnologia e alla realizzazione dello ZEBus presentato nell'ottobre 1999 (4^a fase del programma).



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

Autobus 3^a fase programma
(tecnologia P3/1995-1998)

Autobus 4^a fase programma
(tecnologia P4/1999)

EVOLUZIONE DELLA TECNOLOGIA	
Caratteristiche autobus tecnologia P4	
Volume	50% in meno rispetto alla tecnologia P3
Peso	1700 kg meno di P3
Prestazioni / Economia combustibile	44% contro 36% di P3
N. stacks	8 stack contro 20 stack di P3
Start up	3 s contro i 45 s di P3
Migliore affidabilità grazie alla riduzione del numero di componenti del sistema	
Minore rumore/vibrazioni	



ZEBus (Zero Emission Bus, tecnologia P4)
Programma dimostrativo in collaborazione con SunLine Transit a Thousand Palms (California)- 24.000 km percorsi

E' previsto che sistemi XCELLSiS di ultima generazione (tecnologia P5), in cui si farà uso di stack da 75 kW, opereranno su autobus Citaro in diverse città europee a partire dal 2003 (vedi pag. 31). Probabilmente queste stesse unità saranno installate su 20 autobus che verranno forniti alla Sunline Transit ed alla AC Transit all'interno del programma dimostrativo della California Fuel Cell Partnership.

Questi programmi dimostrativi consentiranno di trarre le indicazioni per apportare miglioramenti necessari alla progettazione e allo sviluppo di prodotti commerciali, la cui comparsa sul mercato è prevista intorno al 2004.

■ Neoplan

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

Il veicolo, su cui è installata un'unità PEFC della Nuvera Fuel Cells Europe (3 stack per una potenza totale di 55 kW), è alimentato a idrogeno. Il gas, fornito dalla Linde, è stoccato 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 rimarrà in servizio per circa due anni.



Neoplan - Autobus in esercizio a Oberstdorf
Potenza: 55 kW
Autonomia: 600 km
Velocità max: 30-50 km/h

■ MAN Nutzfahrzeuge AG

La MAN nel quadro di attività per lo sviluppo di autobus che usano combustibili alternativi, sta realizzando prototipi con celle ad elettrolita polimerico alimentati ad idrogeno.

Nel quadro di una collaborazione con Siemens e Linde AG, coordinata dalla Ludwig Bölkow Systemtechnik, è stato progettato e realizzato un primo prototipo che utilizza idrogeno compresso.



Siemens - Sistema PEFC (120 kW)

PEFC, di potenza 150 kW (5 stack da 30 kW), prodotta congiuntamente da Nuvera Fuel Cells Europe e dalla Air Liquide. L'autobus sarà alimentato ad idrogeno liquido (due serbatoi da 350 litri, sviluppati dalla Messer Griesheim).

La dimostrazione su strada dei due veicoli avverrà in collaborazione con aziende di trasporto urbano europee, all'interno del programma Thermie della Commissione Europea, nelle città di Berlino, Copenaghen e Lisbona.

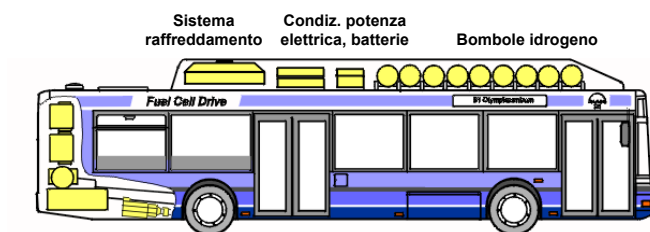


Autobus MAN (maggio 2000)

Sul veicolo è installato un modulo PEFC della Siemens, che fornisce una potenza di 120 kW (4 stack da 30 kW).

L'idrogeno è stoccato in bombole, in alluminio rinforzato con fibre di carbonio (capacità totale 1548 litri), poste sul tetto del veicolo. L'autonomia su percorsi urbani è circa 300 km.

E' attualmente in fase di realizzazione di un prototipo di 2^a generazione sul quale sarà installato un'unità



Celle a combustibile Motore elettrico

■ Proton Motor

La Proton Motor (Starnber, D) nel maggio 2000 ha presentato il Bayern-Bus III, derivato da un autobus della Neoplan (modello N8012, 10,6 m).

Il veicolo, su cui è installata un'unità di potenza totale 80 kW (18 stack), è alimentato ad idrogeno compresso (4 bombole da 150 litri posizionate sul tetto).



Bayern-Bus III/ Proton Motor

Potenza: 80 kW
Autonomia: 150-250 km
Velocità max: 80km/h



Georgetown University (gennaio 2000)

Potenza: 100 kW
Autonomia: 560 km
Velocità max: 105 km/h

■ Georgetown University

La Georgetown University (Washington, DC) ha iniziato 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, lo scorso anno ha presentato un prototipo a metanolo in cui è stata installata un'unità PEFC da 100 kW prodotta dell'XCELLSiS.

■ Progetto FC BUS

All'interno del Programma Joule III, è in corso lo sviluppo di un autobus ibrido, che sarà provato in diversi paesi della Comunità Europea. Partecipano al programma Air Liquide (coordinatore del progetto), Scania, Nuvera Fuel Cells Europe, SAR, Università degli Studi di Genova e CEA.

Il veicolo, per il quale è stata prevista un'autonomia di 250 km, utilizza idrogeno compresso stoccato in serbatoi da 500 litri. Sull'autobus sono installati 2 stack PEFC da 30 kW sviluppati da Nuvera.



FC BUS Scania

COSTI DI UN SISTEMA PEFC PER APPLICAZIONI NEL TRASPORTO

Da uno studio eseguito dall'Arthur D. Little per il DoE emerge che il costo di un sistema con celle a combustibile ad elettrolita polimerico di potenza 50 kW alimentato a benzina, allo stato attuale della tecnologia e per alti volumi di produzione (500.000 unità/anno), risulta dell'ordine di 300 \$/kW. Il costo stimato è quindi sei volte più elevato di quanto richiesto (50 \$/kW) perché il sistema risulti competitivo nei confronti di un motore a combustione interna.

Dallo studio emerge che il sottosistema celle rappresenta il 60% del costo totale, il fuel processor incide per il 30% circa, mentre il restante 10% costituisce il costo del BoP e costi di assemblaggio.

	COSTI STIMATI		OBIETTIVI DoE (\$/kW)	
	(\$)	(\$/kW)	2000	2004
Cella a combustibile	8.850	177	100	40
Fuel Processor	4.310	86	30	10
Balance of plant	500	10	Non riportati separatamente nel programma DoE	
Assemblaggio sistema	1.040	21		
Totale	14.700	294	130	50

Fonte: Arthur D. Little, Marzo 2000

Breakdown costi del sistema cella

	COSTO	
	\$	\$/kW
Stack	7.050	140
Brucciato	460	10
Compressore aria	860	17
Sistema di raffreddamento	480	21
Totale	8.850	177

Fonte: Arthur D. Little, Marzo 2000

Il costo del solo stack, che è di 7050 \$ (circa 140 \$/kW), rappresenta circa l'80% del costo totale del sottosistema cella. E' stato calcolato che per la realizzazione dello stack sono necessari circa 180 g di platino, per un costo intorno a 57 \$/kW, corrispondenti a circa il 40% del costo del sistema cella.

Per ottenere costi che siano competitivi con quelli dei sistemi tradizionali, occorre intervenire per ridurre i costi dei principali componenti dello stack (elettrodi, membrana, piatti bipolari), lavorare allo sviluppo di processi di fabbricazione adatti per la produzione di serie.

Breakdown dei costi dello stack

COMPONENTE		COSTO		
		%	\$	\$/kW
MEA*	Strato anodico e catodico	50	3.625	75
	Elettrolita	20	1.310	25
	Strati diffusione gassosa	5	420	5
	Piatti bipolari	15	1.035	20
	Guarnizione	5	380	10
	Altro	5	280	5
	Totale	100	7.050	140

Assunzioni fatte

Potenza totale: 50 kW

Densità di potenza a 0,8 V: 250 mW/cm²

Anodo: Pt/Ru 0,4/0,2 mg/cm²

Catodo: Pt 0,4 mg/cm²

* Assemblato membrana/elettrodo

Fonte: Arthur D. Little, Marzo 2000

COMBUSTIBILI - SVILUPPO DI SISTEMI DI GENERAZIONE DI IDROGENO

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, stoccaggio e distribuzione;
- larga disponibilità e costi ragionevoli;
- tossicità e pericolosità equivalente a quella dei combustibili tradizionali.

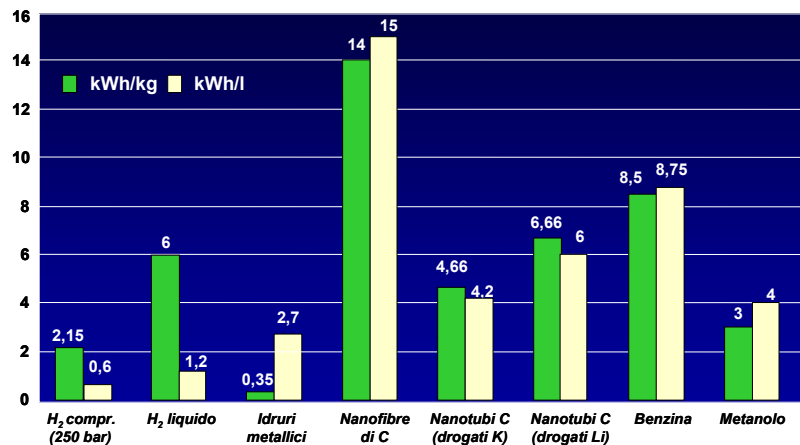
Bisogna osservare che la scelta del combustibile è determinata, oltre che da fattori tecnici, anche da valutazioni di politica energetica.

Combustibile ideale per le celle ad elettrolita polimerico è l'**idrogeno**, che assicura alle stesse le migliori prestazioni e consente di realizzare sistemi relativamente semplici e con un impatto ambientale praticamente nullo nel punto di utilizzo.

In un veicolo elettrico a celle a combustibile, l'idrogeno può essere stoccato a bordo o prodotto da altri combustibili (metanolo, benzina, distillati leggeri) attraverso un reformer installato sul veicolo. Le soluzioni proposte presentano aspetti favorevoli e svantaggi e, tutte, seppur in gran parte già utilizzate, ancora richiedono rilevanti sforzi di ricerca e sviluppo per un impiego su larga scala affidabile e competitivo.

L'idrogeno potrebbe rappresentare il combustibile del futuro, anche se il suo utilizzo presenta problemi connessi con la sua disponibilità a costi contenuti, lo stoccaggio a bordo del veicolo, la creazione di adeguate infrastrutture di distribuzione e aspetti di sicurezza ed accettabilità da parte degli utenti.

Gli attuali veicoli dimostrativi utilizzano idrogeno immagazzinato e trasportato a bordo liquefatto in serbatoi a bassa pressione e temperatura (-253 °C) o in forma compressa ad alta pressione, o stoccato in idruri metallici. Soluzioni non sempre soddisfacenti in termini di densità di energia raggiunta, inferiore a quella di un carburante convenzionale. Valori simili a quelli di questi ultimi si potrebbero ottenere, in prospettiva, solo con l'accumulo in nanostrutture di carbonio, se saranno confermate le potenzialità di questa tecnologia. Ricercatori della Northeastern University di Boston dichiarano di aver studiato nanofibre di carbonio che presentano elevate capacità di accumulo di idrogeno. Nello studio si afferma che è



Contenuto energetico di diversi combustibili

stato preparato un materiale in grado di accumulare a temperatura ambiente e ad una pressione di 120 atm fino a 23 litri di idrogeno per grammo di carbone - oltre il 65% in peso - valore che risulta un ordine di grandezza superiore a quello dei sistemi di stoccaggio convenzionali. Questa quantità di idrogeno consentirebbe a veicoli con celle a combustibile autonomie finora inimmaginabili (fino ad 8000 km per serbatoi di normali dimensioni). Molti sono gli istituti di ricerca e le società al mondo che

stanno avviando o hanno avviato attività in questo settore, ma finora nessuno è riuscito a riprodurre i risultati ottenuti a Boston. E' sicuro che, qualora le potenzialità della tecnologia siano confermate, questa potrebbe modificare completamente il panorama di utilizzo dell'idrogeno per trazione.

Perché l'idrogeno possa diventare un combustibile diffuso, si dovrà creare un'efficiente rete di trasporto e distribuzione, rete che necessariamente dovrà possedere i requisiti ai quali l'utenza è abituata con i combustibili tradizionali, come sicurezza, rapido e facile approvvigionamento in stazioni di servizio distribuite sul territorio.

Soluzioni alternative all'idrogeno sono rappresentate dal metanolo, dalla benzina o da distillati leggeri.

CELLA A COMBUSTIBILE	Idrogeno	Metanolo	Benzina	Distillati leggeri
Semplicità	++	0/-	-/-	-/0
Efficienza	+	0	-/0	-/0
Problematicità	-	0/+	+	+
COMBUSTIBILE	Idrogeno	Metanolo	Benzina	Distillati leggeri
Stoccaggio	--	+/+	++	++
Problematicità	+	-/0	--	+/+
INFRASTRUTTURE	Idrogeno	Metanolo	Benzina	Distillati leggeri
Disponibilità	--	-	++	+
Semplicità	--	+	++	+/+

Combustibili candidati per PEFC per applicazioni nella trazione elettrica

La conversione della **benzina** a bordo dell'auto è al momento oggetto di studio da parte di molte organizzazioni ed istituti di ricerca. Il vantaggio connesso ad una simile scelta sarebbe principalmente quello di utilizzare infrastrutture esistenti; tuttavia la complessità del processo e la messa a punto di sistemi di trattamento in grado di generare idrogeno, della purezza necessaria, senza compromettere le caratteristiche positive di efficienza, minimo impatto ambientale e flessibilità del sistema di generazione nel suo insieme, è ancora impresa difficile da realizzare.

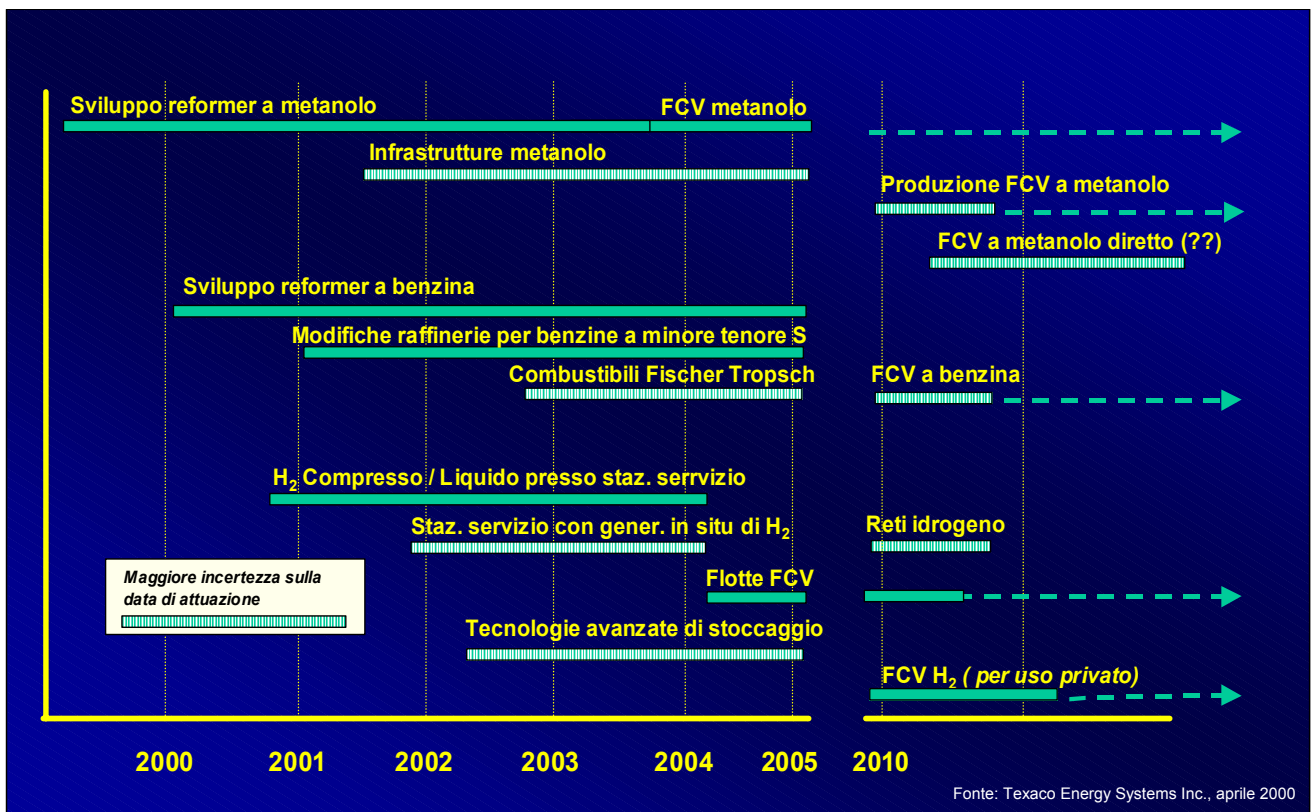
Un'altra soluzione è rappresentata dal **metanolo**. Rispetto alla benzina, il metanolo presenta una serie di vantaggi, importante soprattutto il fatto che può essere convertito in idrogeno a temperature notevolmente più basse (250-300 °C contro 800-900 °C); caratteristiche importanti dal punto di vista della sicurezza sono una più bassa volatilità e 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 consente al veicolo un'autonomia simile a quella dei veicoli tradizionali. Tuttavia bisogna ricordare che il metanolo risulta tossico e che la sua natura corrosiva lo rende incompatibile con le infrastrutture di distribuzione esistenti.

Da notare che con il metanolo c'è la possibilità di sviluppare celle a combustibile in grado di utilizzarlo direttamente (celle a metanolo diretto, DMFC); i risultati finora ottenuti in questo settore fanno comunque ritenere che questa soluzione sia proponibile solo a più lungo termine.

E' chiaro che la transizione ad un ampio uso dell'idrogeno avverrà gradualmente e che nel medio termine giocheranno ancora un ruolo importante combustibili come metanolo o benzina. Nel breve termine, l'idrogeno sarà utilizzato soprattutto per flotte di veicoli circolanti nei centri urbani, per le quali è possibile centralizzare l'approvvigionamento o le operazioni di ricarica delle bombole. Il suo impiego per altre tipologie di veicoli potrà aversi solo in una fase successiva e richiederà sviluppi particolari delle tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno stesso.

Caratteristiche chimico-fisiche di idrogeno, metanolo e benzina

	Idrogeno	Metanolo	Benzina
Peso molecolare	2,016	32,04	100-105
Densità del liquido (g/l ³)	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 ² s ⁻¹	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



Ipotesi di penetrazione di veicoli a celle a combustibile

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 sostanzialmente 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.

Unità di steam reforming sono state sviluppate e già dimostrate su veicoli prototipo, mentre sistemi basati sull'ossidazione parziale sono ancora a livello di laboratorio.

Negli Stati Uniti nel quadro dei programmi del DoE è in corso lo sviluppo di sistemi di generazione di idrogeno di taglia 50 kW, in grado di utilizzare diversi combustibili, da parte di diverse società, tra cui Nuvera Fuel Cells e Hydrogen Burner Technology.

PROCESSI DI TRATTAMENTO DEL COMBUSTIBILE

Schema semplificato dei processi di steam reforming e ossidazione parziale

STEAM REFORMING (con reazione di shift)
 consiste nella conversione catalitica con vapore d'acqua (in presenza di catalizzatore, normalmente a base di nichel)

$$CH_3OH + H_2O \heartsuit 3 H_2 + CO_2 \quad (\text{metanolo})$$

$$C_8H_{18} + 16 H_2O \heartsuit 25 H_2 + 8 CO_2 \quad (\text{benzina})$$

OSSIDAZIONE PARZIALE (con reazione di shift)
 in questo processo il combustibile viene fatto reagire con l'ossigeno dell'aria (la reazione può avvenire sia in presenza di catalizzatore, che senza)

$$CH_3OH + 1/2 O_2 \heartsuit 2 H_2 + CO_2 \quad (\text{metanolo})$$

$$C_8H_{18} + 4 O_2 + 8 H_2O \heartsuit 17 H_2 + 8 CO_2 \quad (\text{benzina})$$

AUTOTHERMAL REFORMING
 Il processo associa l'ossidazione parziale con lo steam reforming. Oltre al preriscaldamento dei reagenti in questo caso non è necessario fornire calore, in quanto l'esotermicità della reazione di ossidazione parziale va a sostenere l'endotermicità di quella di steam reforming.

PROCESSI DI ABBATTIMENTO DEL CO

$$CO + H_2O \heartsuit H_2 + CO_2 \quad \text{reazione di shift (CO} \approx 1\%)$$

$$CO + 1/2 O_2 \heartsuit CO_2 \quad \text{ossidazione preferenziale (CO} \approx 10 \text{ ppm)}$$

$$CO + 3 H_2 \heartsuit CH_4 + H_2O \quad \text{reazione di metanazione (CO} \approx 10 \text{ ppm)}$$

SEPARAZIONE FISICA: membrane Pd/Ag

Gli obiettivi del programma DoE per il sistema di reformer al 2005 e 2010 e l'attuale stato della tecnologia sono riportati in tabella.

Alcuni costruttori automobilistici impegnati nella realizzazione di veicoli dimostrativi a celle a combustibile, tra i cui, DaimlerChrysler, General Motors, Nissan e Toyota, hanno utilizzato unità di steam reforming del metanolo per produrre idrogeno a bordo.

Tra le società più attive nello sviluppo di sistemi basati sul processo di ossidazione parziale ricordiamo la Nuvera Fuel Cells (in passato Epyx Corp.), mentre esempi di autothermal reforming sono rappresentati dal reformer HotSpot sviluppato dalla Johnson Matthey e dal F³P della Hydrogen Burner Technology.

Gruppi come **DaimlerChrysler/Shell**, **General Electric/Exxon** e **Ford/Mobil**, negli ultimi due anni hanno avviato attività di sviluppo di reformer a benzina.

Sistema di reforming da 50 kW (benzina)
Stato della tecnologia ed obiettivi PNGV al 2005 e al 2010

	STATO ATTUALE	2005	2010
Densità di potenza, W/l	500	700	800
Potenza specifica, W/kg	450	700	800
Efficienza %	78	78	80
Costo, \$/kW	85	25	10
Durata, h	1000	4000	5000
Risposta nei transitori (10%-90% potenza max), s	15	5	1
Tempo di avviamento (-20 a potenza max), min	-	2	1
Tempo di avviamento (20 a potenza max), min	< 6	< 1	< 0.5
Temperatura min. ammissibile, °C	-20	-30	-40
Contenuto di CO (stato stazionario), ppm	10	10	10
Contenuto di CO (transitori), ppm	500	100	100
Contenuto di H ₂ S	< 0,3	< 0,2	< 0,1
Contenuto di NH ₃	< 10	< 5	< 1

Il sistema include reattori di shift, clean up CO, scambiatori di calore ed unità di controllo.

Caratteristiche reformer a metanolo sviluppati da diverse organizzazioni

	Nuvera Fuel Cells	DaimlerChrysler	General Motors	Johnson Matthey
Potenza max dell'unità (kW)	50	50	30	6
Densità di potenza (kW/l)	0,7	1,1	0,5	0,5
Potenza specifica (kW/kg)	0,5	0,44	0,4	0,5
Efficienza (% LHV)	n.i.	n.d.	82-85	89
Efficienza di conversione (%)	n.i.	98-100	> 99	> 99
Tempo di avviamento (min)	2	n.i.	-	50-60 s
Tempo da 10 al 90% della potenza max (s)	3-5	< 2	n.d.	n.d.
Costo stimato (\$/kW)	16-25	n.i.	n.i.	n.i.

n. i. : non indicato n. d.: non determinato

■ Hydrogen Burner Technology

La Hydrogen Burner Technology, attraverso alcuni accordi di collaborazione, inclusi quelli in corso nell'ambito del programma DoE, sta sviluppando sistemi di reforming capaci di operare con diversi combustibili.

I prototipi F³P sui quali la HBT sta lavorando si basano sul principio UOBTM (under-oxidized combustion); gli attuali sistemi sono reformer di tipo autotermico, mentre le unità realizzate fino al 1999 erano basate sul processo di ossidazione parziale.

Nel corso degli ultimi due anni fuel processor sono stati consegnati ad otto diversi operatori, per essere sottoposti a prove dimostrative. Le prestazioni ottenute con differenti combustibili sono giudicate abbastanza buone. Un grosso sforzo di ricerca andrà in ogni caso fatto per rendere il sistema adatto ad usi nel trasporto. L'attuale prototipo F³P, che utilizza catalizzatori tradizionali di tipo commerciali, presenta un peso pari a 104 kg, contro gli 83 kg che erano stati fissati come obiettivo. Il volume dell'unità è di circa 85 litri.

Prestazioni reformer F³P

	Gas naturale ^a	GPL ^a	Benzina ^a	Diesel ^a	Metanolo ^b
Efficienza (LHV _{H2out} /LHV _{comb in})	81%	75%	75-80%	73%	76%
H ₂ max, % (secco)	49,5%	44%	41-42%	41-42	40%
CO min	0,8%	0,2%	0,5-0,6%	1%	0,1-0,3%
Potenza max provata, kW	4	3,5	35	15	38

(a) Reformer autotermico; (b) reformer POX



Prototipo F³P

Nuvera Fuel Cells

La Nuvera Fuel Cells (Cambridge, Massachusetts; nata dalla fusione della Epyx Corp. con la De Nora Fuel Cells), sviluppa sistemi di reforming da oltre 10 anni.

Nel quadro dei programmi DoE sul trasporto, Nuvera sta progettando e realizzando reformer da 50 kW, in grado di convertire benzina, o combustibili alternativi come metanolo, etanolo o gas naturale, in idrogeno.

L'unità di reforming attualmente in studio, costituita da un fuel processor basato sul processo dell'ossidazione parziale e da un'unità di abbattimento del CO sviluppata allo scopo (reattore di ossidazione preferenziale, PROX), sarà successivamente integrata in un sistema completo, che includerà un modulo PEFC.

Nel corso del programma, giunto alla sua terza fase, è stato provato un sistema da 50 kW che, come possiamo notare dal grafico riportato, presenta prestazioni che eccedono quelle fissate come obiettivo di questa fase.

L'unità realizzata mostra caratteristiche che le hanno fatto incontrare molti degli obiettivi che erano stati fissati dal Programma PNGV per il 2000:

- Potenza max: 50 kW
- Efficienza (LHV): 78% (50 kW), 73% (32 kW) - benzina
84% (50 kW), 8,5% (40 kW) - etanolo
- Tempo di avviamento: 2 min
- Risposta nei transitori: < 10 s (10-90% potenza max)
- Emissioni: < Tier 2
- Concentrazione CO: < 10 ppm

Nuvera, in collaborazione con la Engelhard Corporation e il Worcester Polytechnic Institut e con finanziamenti del DoE, sta mettendo a punto un fuel processor multi-combustibile del tipo ATR, lo STAR Fuel Processor

(Substrate based Transportation Autothermal Reformer), per il quale sono previste le seguenti caratteristiche:

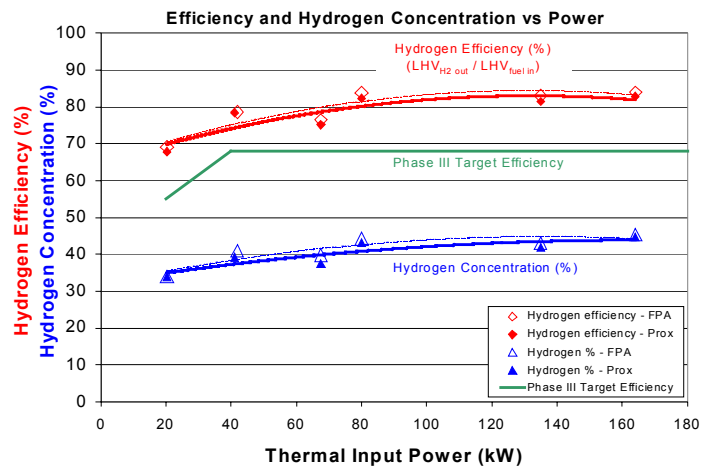
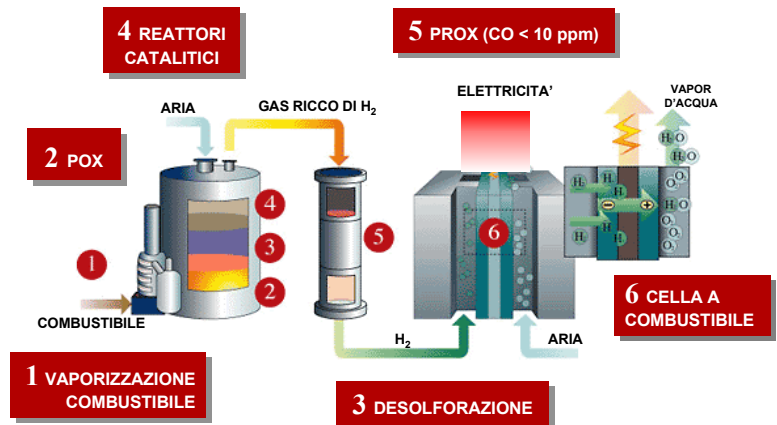
- Volume: 70 L
- Densità di potenza: 850W/L
- Potenza specifica: 750W/kg
- Tempo di avviamento: < 10 s.



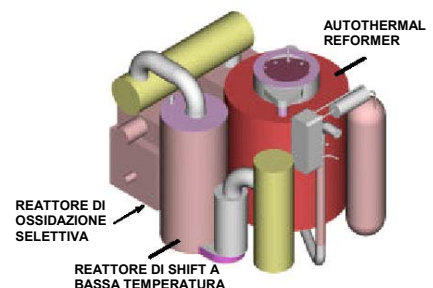
UTC Fuel Cells

L'UTC Fuel Cells, come abbiamo già accennato, sta realizzando per il DoE un sistema completo di potenza 50 kW alimentabile a benzina.

Il fuel processor in sviluppo per quest'unità è costituito da un reformer di tipo autotermico, che ha dimostrato di essere in grado di assicurare una conversione del 98%, un reattore di shift a bassa temperatura (livello di CO < 1%), un'unità di desolfurazione, integrati come mostrato in figura.



Prestazioni raggiunte nella Fase III del Programma (1999)



Fuel processor UTC Fuel Cells (50 kW, conceptual design)

■ Johnson Matthey

Il reformer “HotSpot” sviluppato dalla Johnson Matthey ha riscosso un notevole interesse. Il sistema, basato su un processo che combina ossidazione parziale e steam reforming, è stato ottimizzato per il metanolo, ma è in grado di operare anche con altri combustibili (es. gas naturale, benzina). Il reformer ha una configurazione modulare, che ne facilita notevolmente lo scale-up.



Caratteristiche modulo HotSpot a metanolo

- Potenza: ~ 6-7 kWe (8 moduli da 0,5 kW)
- 6.000 litri/ora di H₂
- 55% H₂ (prodotto secco)
- volume: ~ 6 litri
- efficienza di conversione: >99%
- start-up: 20 s a 75%, 50 a 100%.



Unità Demonox

Il gas prodotto dal reformer HotSpot contiene 1-3% di CO, quantità che viene ridotta a meno di 10 ppm da un'unità di abbattimento appositamente studiata, il Demonox. Quest'ultimo, messo a punto specificamente per reformer J. Matthey, è stato utilizzato anche con fuel processor messi a punto da altre organizzazioni. Un'unità da 25 kW è stata ad esempio integrata con un reformer Nuvera Fuel Cells che, provato sia con etanolo che con benzina, ha fornito un gas di processo con un tenore di CO < 10 ppm.

Johnson Matthey ha un accordo in esclusiva con XCELLSiS per lo sviluppo di sistemi di purificazione del CO e per il controllo delle emissioni e sta lavorando con società come Plug Power ed Energy Partners per sviluppare sistemi di reforming del gas naturale e unità di abbattimento del CO.

■ McDermott Technology

La McDermott Technology sviluppa dal 1994 fuel processor sia per usi stazionari che per trasporto, basati su diversi processi (reformer di ossidazione parziale, di tipo autotermico, steam reformer). Come Nuvera Fuel Cells e HBT nell'ambito dei programmi del DoE ha in corso un progetto per lo sviluppo di un sistema integrato da 50 kW per la conversione di benzina in idrogeno. Le attività sono svolte in collaborazione con la Catalytica Advanced Technologies (sviluppo dei componenti catalitici) e la NexTech (catalizzatori di shift funzionanti a media temperatura).

Dovendo operare con benzina, nell'unità è integrato un sistema di desolfurazione, che riduce il tenore di zolfo prima dell'ingresso nella zona di reforming a meno di 3 ppm.

■ General Motors

La GM nel 2001 ha realizzato un fuel processor di tipo autotermico, il “GEN III” che produce idrogeno a partire da benzina. Il sistema si avvia in meno di tre minuti, contro i 12-15 min che occorre all'unità realizzata in precedenza; l'obiettivo è comunque quello di ottenere tempi di avviamento inferiori al minuto (< 10 s). Il GEN III è installato sull'ultimo veicolo presentato dalla GM, il pickup Chevrolet S-10.

GM sta inoltre lavorando con diversi partner per mettere a punto benzine “pulite” da utilizzare su veicoli a celle a combustibile. I diversi gruppi stanno operando per ridurre il contenuto di zolfo a valori prossimi a zero, mediante trappole o adsorbenti selettivi, al tempo stesso si sta operando per sviluppare stack e catalizzatori con una maggiore tolleranza allo zolfo.

EVOLUZIONE TECNOLOGIA GENERAL MOTORS



1998

GEN I - 58 kW_{H2}

0,87 kW/litro

0,50 kW/kg

Tempo avvio: 1800 s



Aprile 2000

GEN II - 187 kW_{H2}

1,46 kW/litro

0,93 kW/kg

Tempo avvio: 720 s



Dicembre 2000

GEN III - 70 kW_{H2}

2,2 kW/l

1,48 kW/kg

Tempo avvio: 138 s

TECNOLOGIE DI STOCCAGGIO IDROGENO

Idrogeno compresso

Il modo più semplice ed economico per accumulare idrogeno a bordo di un veicolo è di utilizzarlo sotto forma di gas compresso a pressione di 200-250 bar.

La tecnologia risulta tuttavia non proponibile per uso a bordo di auto tradizionali, a causa del peso ed ingombro dei serbatoi attualmente utilizzati, che rappresentano un limite all'autonomia e capacità di carico del veicolo.



Di recente notevoli progressi sono stati fatti con l'introduzione di serbatoi con liner metallico o termoplastico rinforzati con fibre di carbonio, di vetro ed aramidiche, che presentano un peso 3-4 volte inferiore a quello dei comuni serbatoi, e che consentono quindi di superare in parte le restrizioni connesse all'uso delle bombole di tipo tradizionale. Questi serbatoi sono in grado di operare a pressioni fino a 350 bar (potenzialmente anche 700 bar) e consentono quindi di ottenere densità di accumulo di idrogeno adeguate all'uso a bordo di veicoli. Le caratteristiche di sicurezza sono solitamente molto elevate, grazie alla robustezza dei serbatoi ed all'introduzione di fusibili anticoppio in caso di incendio e di valvole di interruzione del circuito in caso di urto.

La DaimlerChrysler ha utilizzato idrogeno compresso sui due primi prototipi di veicoli a celle a combustibile, la NECAR I e NECAR II, e sulla recente NECAR 4a. La P2000 FCV della Ford e la 600 Electra della FIAT costituiscono altri esempi di auto che usano bombole di idrogeno compresso; queste occupano notevole spazio nel veicolo, dimostrando la poca praticità di questo sistema di accumulo se si utilizzano bombole di tipo tradizionale (a 200-250 bar). Occorre inoltre citare le applicazioni di questa tecnologia di stoccaggio praticamente sulla maggior parte dei prototipi di autobus finora realizzati (flotte Chicago Transit Authority e British Columbia Transit, autobus MAN e Neoplan, NEBUS della Daimler-Chrysler, IVECO (progetto IRISBUS).

Per quanto riguarda normative di sicurezza e licenze per usi a bordo di veicoli, le bombole di idrogeno sono soggette a restrizioni analoghe a quelle adottate nel caso del gas naturale.



Idrogeno liquido

L'idrogeno può essere stoccato a bordo del veicolo in forma liquida ad una temperatura di $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Per mantenere queste temperature sono stati messi a punto serbatoi a doppia parete, con un'intercapedine ove viene fatto il vuoto (serbatoi tipo "dewar"). Questa tecnologia è ormai consolidata in Germania, dove la BMW la utilizza da oltre 15 anni su auto ad idrogeno alimentate con motori a combustione interna.

Tra i veicoli a celle a combustibile di recente produzione che usano idrogeno liquido, vanno senz'altro ricordate la NECAR 4 della DaimlerChrysler e la HydroGen 1 della Opel. Utilizzano inoltre idrogeno liquido gli autobus realizzati da Ansaldo (3 serbatoi da 600 litri della Messer Griesheim, situati sul tetto del bus) e dalla MAN (3 serbatoi da 200 litri della Linde, posizionati sul pianale del veicolo).

L'accumulo in forma liquida è forse la tecnologia che oggi meglio soddisfa le esigenze dell'autotrazione, tuttavia anch'essa presenta dei limiti. A sfavore dell'idrogeno liquido 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 il costo energetico della liquefazione è considerevole, corrispondendo a circa il 30% del contenuto energetico del combustibile, contro un valore compreso tra il 4% ed il 7% per l'idrogeno compresso.

Nel quadro delle attività del Progetto H2MUC è stata realizzata, presso l'aeroporto di Monaco di Baviera, la prima stazione di servizio pubblica in grado di fornire idrogeno liquido.

Idruri metallici

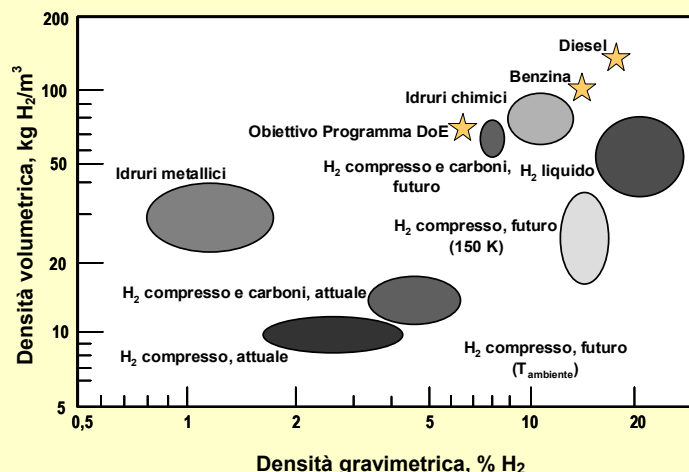
L'idrogeno può legarsi chimicamente con diversi metalli e leghe metalliche, formando idruri. Questi composti sono in grado di intrappolare idrogeno, a pressioni relativamente basse. L'idrogeno penetra all'interno del reticolo cristallino del metallo, andando ad occupare i siti interstiziali.

Si raggiungono, a basse pressioni, densità energetiche maggiori di quelle dell'idrogeno compresso e paragonabili (secondo alcune referenze, anche maggiori) a quelle dell'idrogeno liquido. Il volume di stoccaggio si riduce di 3-4 volte, rendendo possibile l'uso di questi sistemi nelle autovetture, mentre l'energia specifica dipende anche dal peso specifico del metallo di base. Le percentuali, in peso, di idrogeno sul peso totale che si raggiungono vanno dal 1% al 12,7% (LiH), per confronto ricordiamo che per le comuni bombole tale percentuale è di poco superiore all'1%, e quindi tali sistemi di stoccaggio sono potenzialmente molto promettenti.

Un punto debole della tecnologia è rappresentato dal peso di questi sistemi di accumulo, a parità di peso il veicolo 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 dello stoccaggio, sicurezza intrinseca.

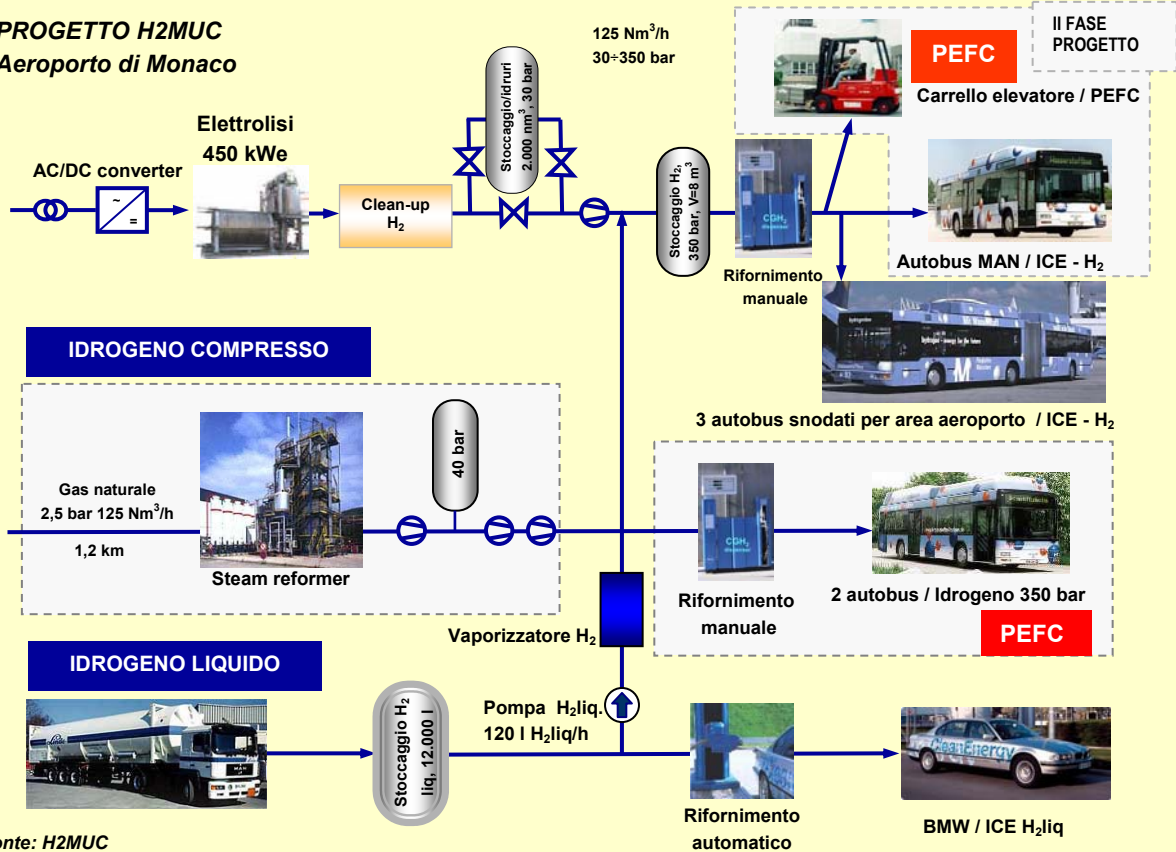
La tecnologia degli idruri è allo studio negli Stati Uniti, in Europa ed in Giappone, dove la Toyota ha messo a punto speciali leghe al titanio, nell'ambito del suo programma di realizzazione di veicoli con celle a combustibile.

Di recente interessanti i risultati sono stati ottenuti dalla Ovonic, che sta sviluppando una lega a base di magnesio, leggera, con un'elevata capacità di stoccaggio idrogeno (7% in peso, $T_{\text{desorb.}}: 300\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Confronto fra sistemi di accumulo idrogeno (Fonte: DoE)

PROGETTO H2MUC
Aeroporto di Monaco



Fonte: H2MUC

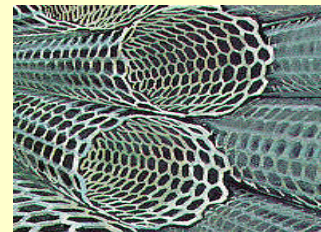
Nanostrutture di carbonio

Nanostrutture di carbonio (nanotubi e nanofibre di carbonio) scoperte all'inizio di questo decennio, stanno dimostrando ottime capacità di adsorbimento dell'idrogeno, con risultati in alcuni casi sorprendenti ed inspiegabili.

Su questi materiali sono in corso ricerche da parte di numerosi gruppi di lavoro, ma i risultati ottenuti, spesso in contrasto tra di loro, sono il più delle volte non confrontabili in quanto riferiti a campioni di materiali di diverso tipo, provati in condizioni di pressione e temperatura molto diverse. Il campo di variazione della pressione va da pochi bar ad alcune centinaia di bar, la temperatura da 80 K a 800 K, le percentuali di adsorbimento in peso variano da valori inferiori all'1% ad un incredibile 60%.

In letteratura per i nanotubi si riportano percentuali massime del 20% in peso (nanotubi drogati con litio) con conseguenti valori elevatissimi per l'energia specifica e la densità energetica, pari a 6,66 kWh/kg e 6 kWh/litro, prossimi a quelli della benzina (rispettivamente 8,75 ed 8,76) e per le nanofibre il valore già indicato del 60%.

Un grosso sforzo di ricerca è necessario per confermare i risultati finora ottenuti, e per verificare la fattibilità tecnica ed economica di questa tecnologia, che potenzialmente si dimostra la più adatta per lo stoccaggio dell'idrogeno a bordo di veicoli.



Caratteristiche di nanotubi per l'accumulo di idrogeno

Materiale	Temperatura (K)	Pressione (bar)	H ₂ % peso	Energia specifica kWh/kg	H ₂ Vol. %	Densità di energia kWh/litro	Riferimento
SWNT, alta purezza	300	0,65	4				Dillon
SWNT, alta purezza	80	70,9	8,25				Ye
MWNT	298-773	1	0,4	0,133	3,2	0,106	Chen
Li-MWNT	473-673	1	20	6,66	180	6,0	Chen
K-GIC	313	1	5	1,66	60	2	Chen
Li-GIC	473-673	1	14	4,66	280	9,32	Chen
GNF (tubolare)	298	112	11,26		1,42		Chambers
GNF (tubolare)	298	110	10-12				Fan
GNF (herringbone)	298	112	57,85		13,35		Chambers
Grafite	298	112	4,52		0,53		Chambers

SWNT: single-walled nanotube; MWNT: multi-walled nanotube; GNF: graphite nanofibre; GIC: graphite intercalation compounds.

SITUAZIONE ITALIANA

Sviluppo stack e sistema di trattamento del combustibile

In Italia le attività sulle celle ad elettrolita polimerico per trazione sono iniziate nel 1989 nell'ambito di una collaborazione dell'ENEA con la NFCE (Nuvera Fuel Cells Europe, allora De Nora), che ha portato a mettere a punto una tecnologia di cella originale, che privilegia materiali a basso costo e di facile reperibilità e tecnologie di fabbricazione adatte alla produzione di serie.

Nel periodo 1994-98 le attività sono state condotte da NFCE ed ENEA, in collaborazione con l'Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia (ITAE) di Messina, nel quadro di un Accordo di Programma ENEA-MICA. In quest'ambito Nuvera era arrivata a realizzare stack in grado di fornire una densità di potenza di 0,25 kW/kg su unità da 30 kW.

La tecnologia PEFC sviluppata da NFCE è stata impiegata per la realizzazione di veicoli sperimentali, anche se richiede ulteriori sviluppi per raggiungere le prestazioni ed i costi richiesti dalle applicazioni di trazione. Stack realizzati da Nuvera sono stati forniti a diversi costruttori automobilistici, che li hanno installati in prototipi di autovetture (Renault/Progetto FEVER, PSA Peugeot/Progetto Hydro-Gen) ed autobus (MAN, Neoplan, Ansaldo/ Progetto EQHHP).

Nuvera prevede di continuare a lavorare alla messa a punto della tecnologia PEFC per applicazioni nel trasporto ancora per alcuni anni, con l'obiettivo di arrivare a disporre di prodotti commerciali entro il 2005. Nel febbraio 2001, Nuvera ha formato una joint venture con Air Liquide (F) per lo sviluppo e la vendita in Europa di sistemi completi PEFC, alimentati a idrogeno, non solo per usi nella trazione elettrica, ma anche per applicazioni stazionarie e per la generazione portatile.

In parallelo alle attività che hanno riguardato l'ingegneria dello stack, svolte in passato esclusivamente dall'industria, vengono condotte attività di studio e sviluppo di componenti di cella e di stack.

Nel quadro dell'Accordo di Programma MICA-ENEA ENEA e CNR-ITAE di Messina, nel periodo 1994-98, hanno lavorato allo sviluppo di tecnologie di fabbricazione di complessi membrana/elettrodi di tipo innovativo. In particolare, sono stati sviluppati elettrodi con basso carico di catalizzatore (platino 0,1 mg/cm²), anodi tolleranti il CO, nonché catodi in grado di lavorare in celle a bassa pressione, che hanno fatto registrare prestazioni interessanti.



Stazione di prova PEFC fino a 50 cm²
(ENEA, laboratori Casaccia)

EVOLUZIONE TECNOLOGIA NUVERA FUEL CELLS EUROPE

1993 - stack da 5 kW
Area frontale: 28 x 30 cm
Volume: 100 l
Massa: 125 kg
N. celle: 100



1997 - stack da 5 kW
Area frontale: 28 x 30 cm
Volume: 68 l
Massa: 90 kg
N. celle: 100

1999 - stack da 5 kW
Area frontale: 25 x 18 cm
Volume: 23 l
Massa: 32 kg
N. celle: 100



2000 - stack da 50 kW
Volume: 117 l
Massa: 150 kg
N. celle: 400

2001 - stack da 5 kW
Area frontale: 25 x 18 cm
N. celle: 100



Nell'ambito di un accordo di collaborazione con una piccola industria di Bologna, la **Roen Est**, presso i laboratori ENEA sta proseguendo, su una ingegneria di cella diversa da quella della NFCE, lo sviluppo dei componenti di cella e di stack.

La collaborazione ENEA-Roen Est, avviata nell'ottobre 2000, ha portato, alla fine del 2001, alla realizzazione di uno stack da 600 W. Rispetto ai sistemi tradizionali, che usano tenute in viton o in tessuto gommato, lo stack utilizza un sistema di tenuta di tipo innovativo, il cosiddetto MEGA (Membrane Electrode Gasket Assembly), in cui l'assemblato membrana-elettrodi è incorporato nella guarnizione.

La rapidità di esecuzione sia nella preparazione che nell'inserimento in cella/stack di questi componenti, la possibilità di conservarli tal quale e già pronti per l'utilizzo, la possibilità di un riutilizzo degli stessi infinite volte, nonché il risparmio di membrana polimerica che si consegue, sono tutti elementi che risultano di fondamentale importanza nella messa a punto di un prodotto industrializzabile.

In ENEA, nel corso del 2000 è stato avviato lo sviluppo di piccoli sistemi a idrogeno, con la realizzazione di un sistema portatile da 150 W (SCENIC 150, Sistema Cella Enea Nuvera a Idrogeno Combustibile da 150 Watt), di una bicicletta elettrica, nonché di un sistema da 5 kW per l'alimentazione di un veicolo ibrido.



Prototipo SCENIC 150



Stack Roen Est

Presso il Centro Casaccia è disponibile, inoltre, una postazione di prova utilizzabile per la caratterizzazione di stack di potenza variabile tra 5 e 15 kW. L'impianto, per l'alimentazione dello stack, ha la possibilità di usare idrogeno puro proveniente da bombole o da elettrolizzatori; la flessibilità dell'impianto permette

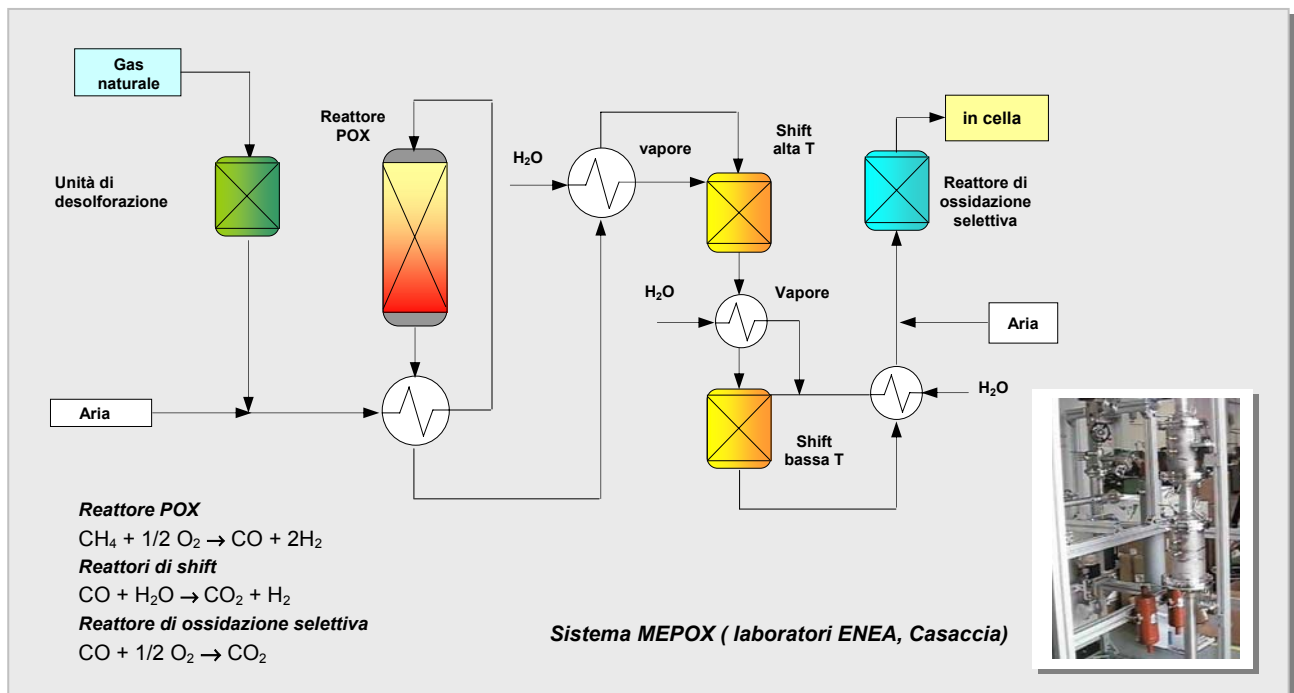
sia il funzionamento "dead end", sia quello in eccesso di idrogeno con la possibilità di effettuare il ricircolo della quantità non utilizzata in cella. La variazione delle grandezze operative (temperatura, pressione, portata) può essere effettuata in modo automatizzato così da poter valutare l'effetto dei singoli parametri di processo sulle prestazioni dello stack.

L'impianto è stato impiegato in campagne di prova di caratterizzazione e qualifica di stack di produzione NFCE e in attività di messa a punto dei diversi componenti del BoP.



Stazione prova stack PEFC fino a 15 kW (ENEA, laboratori Casaccia)

ENEA e CNR-ITAE, in collaborazione con Nuvera Fuel Cells, sempre nell'ambito dell'Accordo di Programma ENEA-MICA, hanno avviato nel 1997 lo sviluppo un sistema di produzione di idrogeno basato sulla tecnologia dell'ossidazione parziale del metano (MEPOX, Methane Partial Oxidation) integrabile con sistemi PEFC. Il diagramma di flusso dell'impianto installato presso i laboratori ENEA è riportato in figura.



Programma MURST / Legge 95/95

Attività di R&S di sistemi a celle a combustibile per il trasporto sono attualmente in corso all'interno di un programma triennale, avviato nel 2000, finalizzato allo sviluppo di un sistema di generazione completo di potenza 10-15 kW, a gas naturale. Il programma, svolto con parziale finanziamento da parte del MURST, prevede, le seguenti linee di attività:

- sviluppo di componenti avanzati di cella;
- sviluppo e realizzazione di stack di tipo evoluto rispetto alla tecnologia attuale;
- realizzazione di un prototipo completo da 10-15 kW, per trazione alimentato a gas naturale.

Parallelamente all'impegno per lo

sviluppo dell'ingegneria dello stack vengono progettati e realizzati altri componenti critici per il sistema di generazione, come il sistema di conversione e purificazione del combustibile; in particolare saranno sviluppati e provati:

- un sistema di produzione dell'idrogeno a partire da gas naturale di taglia 10-15 kW, basato sull'ossidazione parziale del combustibile, completo dei sistemi di conversione/ purificazione necessari a mantenere il contenuto di CO a valori accettabili per la cella (alcuni ppm);
- un sistema di generazione di idrogeno, in connessione con uno stack da 2 kW, in grado di utilizzare combustibili diversi (GPL, benzine).

Organizzazioni impegnate nel programma sono ENEA, che cura tra l'altro anche il coordinamento dell'intero progetto, Nuvera Fuel Cells Europe, il Centro Ricerche FIAT, l'Istituto CNR-TAE, e laboratori universitari del Politecnico di Milano, delle Università degli Studi di Torino, Genova e Roma e la società So.F.teR.

Linee di sviluppo del programma e attività svolte dalle singole organizzazioni

Linea A. SVILUPPO COMPONENTI AVANZATI DI CELLA

■ ENEA

L'ENEA, in collaborazione con l'Università di Roma, ha in corso lo sviluppo di nuovi catalizzatori e di nuove tecniche di preparazione degli elettrodi. In particolare l'attività ha i seguenti obiettivi:

- sviluppo e caratterizzazione di catalizzatori anodici e catodici alternativi a quelli disponibili in commercio e messa a punto delle relative metodologie di preparazione;
- preparazione di elettrodi a diffusione gassosa, con tecniche di deposizione dello strato diffusivo e catalitico basate su spalmatura e spray, e successivamente di insiemi membrana/elettrodi, e loro caratterizzazione in cella;
- studio in cella dell'influenza sulle prestazioni degli anodi degli inquinanti presenti nei gas di alimentazione.

■ Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Chimica

Le attività svolte dall'Università di Roma riguardano la preparazione di catalizzatori innovativi supportati su carbone, e la loro caratterizzazione da un punto di vista strutturale e chimico-fisico.

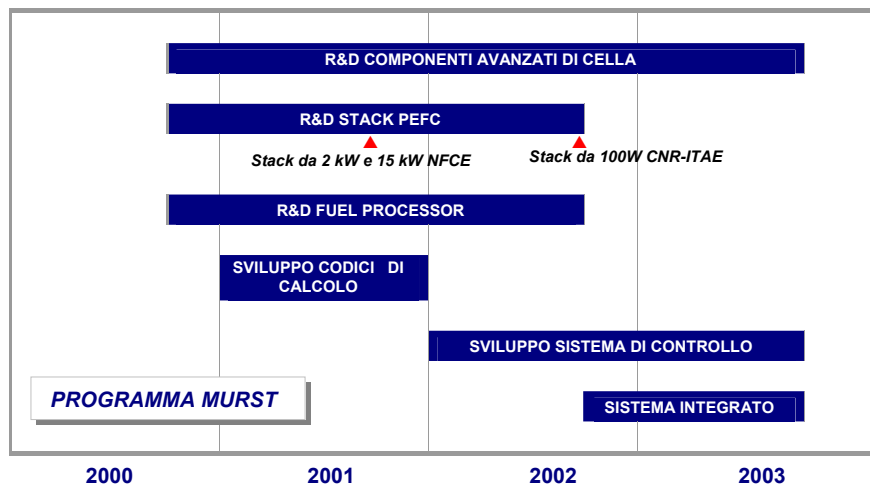
Un'altra fase della ricerca prevede lo studio dell'attività catalitica

delle diverse leghe supportate per l'ossidazione di idrogeno o CO con ossigeno, in presenza dei vari inquinanti presenti nell'idrogeno ottenuto da reforming di combustibili diversi (metano, metanolo, GPL e benzina).

■ Politecnico di Milano/Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria Chimica

Il Politecnico di Milano, in collaborazione con l'Università degli Studi di Torino/Dipartimento di Chimica Inorganica, Chimica Fisica e Chimica dei Materiali, e la società So.F.teR, sta sviluppando nuove tipologie di membrane, in grado di funzionare a temperatura più elevata (>100 °C) e di essere prodotte a costi più bassi di quelle attualmente impiegate. In particolare, si perseguono i seguenti obiettivi:

- selezione di nuovi polimeri da utilizzare come materiali base per la realizzazione di membrane per celle ad elettrolita polimerico operanti ad alta temperatura;
- preparazione delle membrane polimeriche e loro caratterizzazione chimico fisica;
- trasferimento della tecnologia di produzione dal laboratorio al processo industriale, con produzione di membrane su scala pilota.



■ **Nuvera Fuel Cells Europe**

Accanto alle attività di sviluppo e realizzazione di stack, previste nell'ambito di un'altra linea del programma, NFCE ha svolto attività che l'hanno portata a caratterizzare nuove membrane e nuovi assemblati membrana/elettrodi, oggi disponibili sul mercato, per verificarne le prestazioni, la compatibilità con i componenti meccanici della cella NFCE, la maneggevolezza ed l'affidabilità nel tempo.

Per quanto riguarda la sperimentazione erano state previste le seguenti azioni:

- caratterizzazione in cella singola (con area attiva da 16 a 225 cm²), in condizioni di processo standard di riferimento (alta e bassa pressione), di MEA (assemblato membrana/elettrodo) derivanti da materiali commerciali;
- prove di tipo intermittente sui MEA risultati più interessanti in termini di prestazioni e maneggevolezza, per una valutazione preliminare dell'affidabilità dei componenti;
- caratterizzazione in cella singola di piccola area attiva di MEA ottenuti con campioni di una membrana sperimentale sviluppata di recente, al variare della temperatura.

Linea B. SVILUPPO E REALIZZAZIONE STACK DI CELLE DI TIPO EVOLUTO RISPETTO ALLA TECNOLOGIA ATTUALE

■ **CNR-ITAE**

Sulla base dell'esperienza acquisita nell'ambito di precedenti collaborazioni con ENEA (Accordo di Programma ENEA-MICA), l'Istituto TAE sta sviluppando uno stack di potenza 100 W, che farà uso di componenti e di un'ingegneria alternativi a quelli sviluppati dall'Industria nazionale.

Nell'ambito dell'attività tra l'altro si stanno mettendo a punto elettrodi funzionanti a bassa pressione e con contenuti di platino compresi fra 0,1 e 0,3 mg/cm², utilizzando per l'anodo catalizzatori in lega commerciali. Sarà inoltre valutata la possibilità di utilizzare materiali alternativi e/o configurazioni di elettrodi differenti da quelle messe a punto in precedenza al fine sia di ridurre i costi degli elettrodi, sia di migliorare le caratteristiche di trasporto gas e di smaltimento di acqua prodotta in cella nello strato diffusivo.

■ **Nuvera Fuel Cells Europe**

Le attività NFCE sono state finalizzate alla realizzazione di uno stack PEFC con le seguenti caratteristiche:

- densità di potenza elevata;
- dimensioni adatte all'integrazione in autovetture;
- corrente non superiore a 350 Ampere per semplificarne l'accoppiamento con i dispositivi di condizionamento della potenza (DC/DC converter, inverter; si sottolinea che alcuni degli stack NFCE ad alta potenza hanno corrente superiore ai 350 Ampere);
- possibilità di integrare l'umidificazione nello stack o di lasciare a carico del sistema tale funzione.

Il lavoro si sta concludendo con la fornitura a CNR-ITAE ed ENEA di due moduli da 2 kW (40 celle) e 15 kW (3 stack da 100 celle) per utilizzo con gas riformato. Entrambi gli stack sono realizzati con configurazione ad umidificazione esterna e raffreddamento integrato.

Linea C. REALIZZAZIONE DI UN PROTOTIPO COMPLETO DA 15 kW PER TRAZIONE, ALIMENTATO A GAS NATURALE

■ **ENEA**

Le attività ENEA riguardano la progettazione, la realizzazione e la sperimentazione del prototipo completo da 15 kW, che sarà alimentato a gas naturale. Il lavoro è svolto in stretta collaborazione con CNR-ITAE, Università di Genova, Politecnico di Milano e Centro Ricerche FIAT.

La progettazione del fuel processor ha come base l'impianto MEPOX da 5 kW già realizzato da ENEA.

■ **CNR-ITAE**

L'ITAE supporta la messa a punto del sistema di generazione di idrogeno da 15 kW, collaborando con ENEA alla progettazione di massima del prototipo. Tale progettazione comprende, oltre alla definizione dello schema di impianto strumentato, anche il dimensionamento dei vari reattori e scambiatori di calore costituenti il sistema, e la specifica di dettaglio dei componenti critici.

L'ITAE svolge inoltre azioni di ricerca e sviluppo tendenti a migliorare, su scala ridotta, le soluzioni adottate nel 15 kW e ad ampliare lo spettro di combustibili utilizzabili.

In parallelo ITAE si occupa della progettazione, realizzazione e sperimentazione del sistema di generazione di idrogeno da 2 kW equivalenti e della sua integrazione con lo stack fornito da Nuvera Fuel Cells Europe.

■ **Centro Ricerche FIAT**

Le azioni svolte dal Centro Ricerche FIAT (CRF) hanno come obiettivo lo sviluppo e realizzazione dell'unità di controllo per il sistema da 15 kW realizzato in ENEA. L'unità sarà configurata secondo un'architettura che corrisponda ai requisiti richiesti all'uso su un'autovettura.

■ **Università degli Studi di Genova - Dipartimento di Ingegneria Ambientale**

L'Università di Genova, sulla base dell'esperienza pluriennale maturata nel campo della simulazione delle diverse tipologie di celle a combustibile, ha sviluppato il modello dello stack e ha collaborato con il Politecnico di Milano per inserirlo nel codice di calcolo da impiegare per la simulazione del sistema completo.

■ **Politecnico di Milano - Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria Chimica**

Il Politecnico di Milano ha sviluppato codici di calcolo da impiegare per la simulazione delle diverse apparecchiature e del sistema completo, al fine di fornire uno strumento che sostituisca quelli semplificati attualmente impiegati e sia di supporto nella progettazione e sperimentazione dei componenti e del sistema.

Il codice possiede caratteristiche tali da includere facilmente sia librerie di modelli esistenti, che sviluppati all'interno del progetto da altri partecipanti.

Attive nel settore delle PEFC sono anche altre strutture di ricerca; particolarmente significative le attività condotte presso il **CNR-ITAE**, che lavora allo sviluppo dei componenti di cella e dei sistemi di conversione del combustibile in idrogeno.

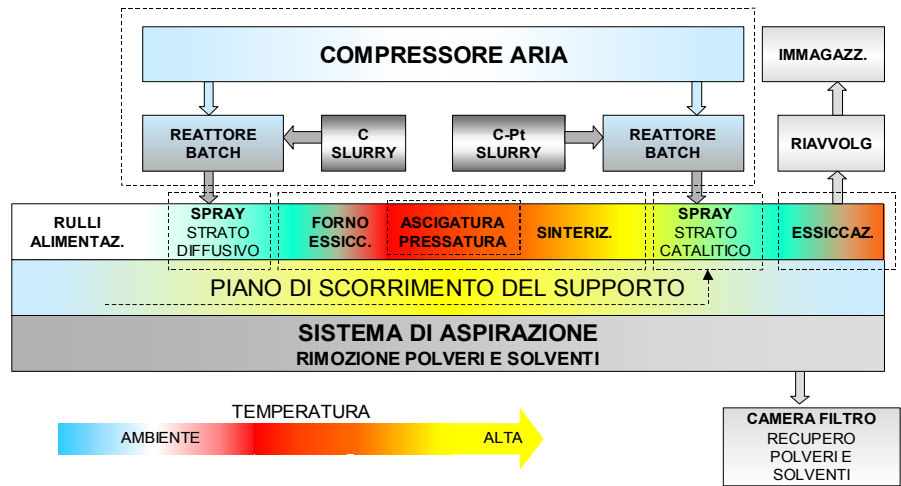
Il CNR-ITAE, che nel corso dell'ultimo decennio ha maturato specifiche esperienze nello sviluppo di componenti di celle a combustibile ad elettrolita polimerico, nel 1999 ha avviato il **progetto TEA** (Tecnologie Elettrochimiche Avanzate) orientato a dimostrare la fattibilità di un impianto industriale per la produzione, a basso costo, di elettrodi a diffusione gassosa.

Il progetto, che è finanziato per il 50% dalla Regione Sicilia e per la parte restante dalla Ponte di Archimede SpA e dallo stesso ITAE, ha portato alla realizzazione di un impianto pilota per la produzione di elettrodi. La linea di produzione, completamente automatizzata, riproduce le diverse fasi del processo di fabbricazione manuale messo a punto dal CNR.

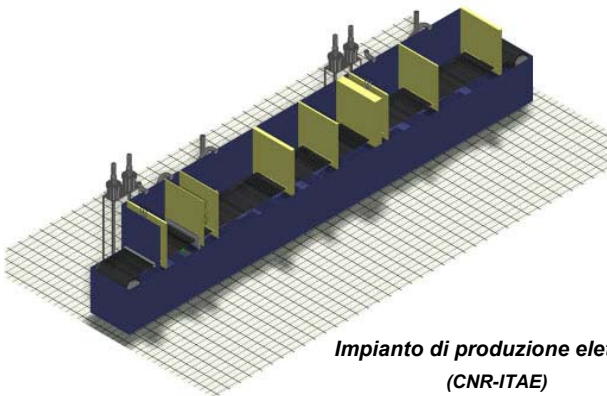
Ricordiamo che gli elettrodi TAE sono caratterizzati da una struttura composta, in cui lo strato catalitico è depositato mediante tecnica spray su uno strato diffusivo, costituito da carbone e PTFE precedentemente depositato sempre per spruzzatura su un substrato (carbon paper o carbon cloth).

L'impianto consente di produrre circa 5 m² al giorno, equivalenti ad una capacità produttiva di elettrodi tra 7,5 e 12 kW al giorno, a seconda delle specifiche dell'elettrodo e della membrana e dei componenti di cella.

L'impianto è stato progettato per essere facilmente dimensionato a produzioni su scala industriale.



Schema a blocchi dell'impianto di produzione elettrodi



Impianto di produzione elettrodi (CNR-ITAE)

Sviluppo prototipi

■ GRUPPO FIAT

FIAT è impegnata dal 1998 nello sviluppo di veicoli prototipo a celle a combustibile con l'obiettivo prioritario di verificare la sostenibilità tecnico-economica di questa tecnologia.

Progetto "Bus a idrogeno a emissioni zero"

L'**Irisbus Italia**, società nata dalla fusione dei settori autobus di IVECO e Renault, ha realizzato un autobus ibrido, che è stato presentato ufficialmente a Torino a maggio 2001, il cui esercizio su strada è previsto nel periodo 2002-2003. Il progetto, parzialmente finanziato dal Ministero dell'Ambiente, vede il coinvolgimento di **ATM** (Azienda Torinese Mobilità, esercizio in linea del prototipo), **Sapio** (produzione e stoccaggio idrogeno), **CVA** Compagnia Valdostana Acque (energia elettrica da fonti rinnovabili per la produzione di idrogeno), **ENEA** (monitoraggio risultati) ed **Ansaldo Ricerche** (azionamenti elettrici).

Il progetto rappresenta un impegno comune tra chi produce i veicoli e chi gestisce il servizio di trasporto pubblico, con l'obiettivo di aprire la strada all'introduzione nel trasporto pubblico di questa nuova tecnologia. All'interno del progetto, sono considerati anche aspetti legati all'omologazione del veicolo e allo sviluppo delle specifiche normative per la produzione e lo stoccaggio dell'idrogeno a bordo.

L'autobus, derivato dal CityClass CNG, utilizza un'unità PEFC da 60 kW, sviluppata dalla società americana UTC Fuel Cells. Per assicurare "emissioni zero" nel senso più ampio del termine l'idrogeno è prodotto per via elettrolitica dall'acqua.

600 Elettra Fuel Cell

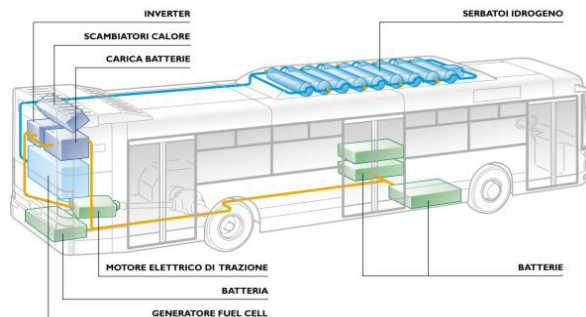
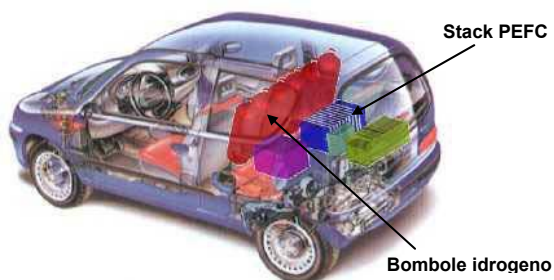
Nel febbraio 2001 è stata presentata al pubblico la 600 Elettra Fuel Cell. Il prototipo è derivato dalla Seicento Elettrica, della quale ha mantenuto alcuni componenti, come motore elettrico asincrono trifase a corrente alternata e il pacco batteria, che è stato però ridimensionato.

Elettra H₂ Fuel Cell
Motore: 30 kW (PEFC 7 kW)
Alimentazione: idrogeno
Autonomia: 100 km
(140 km con batteria)
Velocità max: 100 km/h



La vettura è stata sviluppata dal **Centro Ricerche FIAT**, con finanziamenti di FIAT Auto e del Ministero dell'Ambiente.

Lo stack installato nella vettura (fornito da Nuvera Fuel Cells Europe) è alimentato con idrogeno in pressione (200 bar), accumulato in sei bombole (9 litri ciascuna) sistemate nella parte



Progetto IRISBUS

Motore: 150 kW (unità PEFC 60 kW)
Alimentazione: idrogeno (9 bombole x 140 l)
Autonomia: 12 ore di esercizio
Velocità max: 60 km/h

posteriore del veicolo. Per il futuro si prevede di ripristinare l'abitabilità originaria della vettura, ricorrendo ad un diverso sistema di accumulo del combustibile (uso di idruri metallici alloggiati nel tunnel centrale del veicolo, bombole ad alta pressione).

Il CRF partecipa al **progetto FUERO**, Fuel Cell Systems and Components General Research for Vehicle Application, avviato nel 1999 all'interno del V° Programma Quadro della Comunità Europea. Oltre al CRF, nel progetto sono coinvolti l'IKA - Institute für Kraftfahrwesen Aachen, Volkswagen AG (D), Peugeot Citroën Automobiles, Renault Recherche Innovation, Institut Francais du Petrol (F) e Volvo (S).

■ Ansaldo Fuel Cells

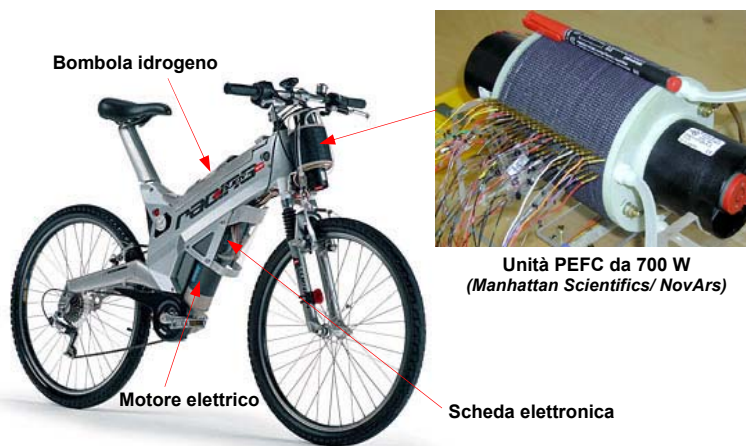
Ansaldo opera da diversi anni nel settore delle celle a combustibile per trazione sviluppando gli azionamenti elettrici del veicolo, occupandosi quindi di tutte le problematiche relative alla progettazione e realizzazione del sistema di generazione e del suo impiego a bordo del veicolo.

In passato Ansaldo, all'interno del progetto Euro Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHHP), ha partecipato alla realizzazione di un autobus da 12 metri e di un battello per la navigazione sul Lago Maggiore. Si tratta di sistemi in configurazione ibrida che usano idrogeno liquido.

Ansaldo ha partecipato ai programmi europei più volte citati, FEVER e FCBUS.



Progetto EQHHP
Battello ibrido da 20 m



Aprilia ENJOY Fuel-Cell

■ **Aprilia**

Il primo prototipo di ciclomotore a celle a combustibile, derivato dalla bicicletta a pedalata assistita "Enjoy", è stato presentato al pubblico al Motorshow di Bologna nel dicembre 2000.

Sul veicolo è installata una cella PEFC da 700 W sviluppata dalla **Manhattan Scientifics/NovArs**.

Rispetto alla bicicletta a batteria "Enjoy" già disponibile sul mercato, la versione con celle a combustibile pesa 6 kg in meno e presenta un'autonomia circa doppia (75 km, con 2,2 litri di idrogeno contenuto in una bombola in fibra di carbonio, a 300 bar).

Il *Times* ha dichiarato questo prototipo "Invenzione dell'anno 2001".

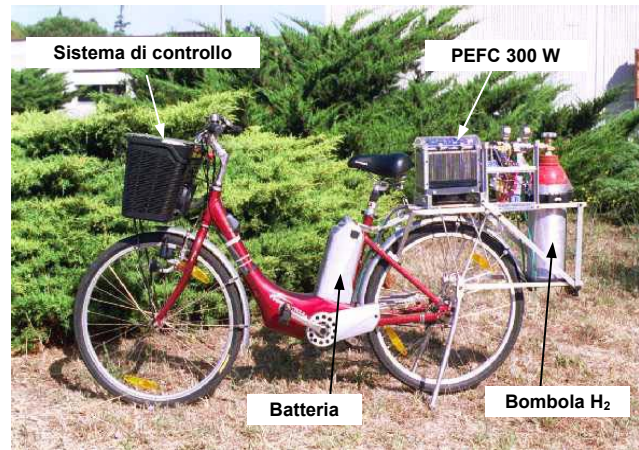
■ **ENEA**

ENEA, come accennato, sta sviluppando prototipi dimostrativi di piccola taglia a idrogeno. In quest'ambito è stato realizzato un prototipo dimostrativo di bicicletta elettrica a pedalata assistita alimentata da una cella ad elettrolita polimerico.

La bicicletta è derivata da un modello elettrico commerciale, su cui è stato montato un sistema di generazione che utilizza uno stack della NFCE da 300 W.

Con una bombola da 5 litri a 200 bar (pari a 1 Nm³) di idrogeno si ottiene un'autonomia di 100-130 km (variabile a seconda del tipo di percorso) a fronte di un'autonomia della bicicletta utilizzando solo batterie di 20-25 km.

Ai fini della sicurezza dell'utilizzatore, sul prototipo è stato predisposto un sistema di controllo che esegue un monitoraggio dello stack sia in fase di avviamento che durante il funzionamento e che esegue il blocco e la messa in sicurezza 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 soprattutto negli Stati Uniti e in Giappone, è ormai praticamente matura per la generazione elettrica e la cogenerazione di piccola-media taglia. Impiegando 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.

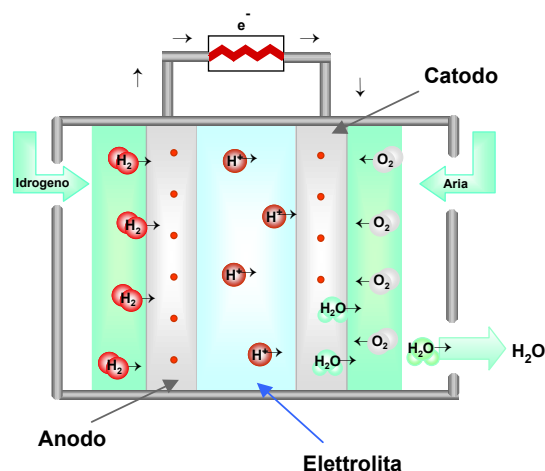
Tra i principali costruttori impegnati nello sviluppo di impianti con celle ad acido fosforico possiamo citare l'UTC Fuel Cells negli Stati Uniti e Fuji Electric, Hitachi, Mitsubishi Electric e Toshiba in Giappone.

La tecnologia è sul mercato da oltre 5 anni con un impianto da **200 kW**, denominato commercialmente **PC25**, prodotto e commercializzato dall'UTC Fuel Cells (USA). Il sistema è distribuito in Giappone dalla Toshiba Corp. e in Europa dalla società italiana Ansaldo.

Le celle ad acido fosforico, prima del grosso sviluppo della tecnologia PEFC, hanno trovato applicazione anche nel trasporto (autobus urbani).

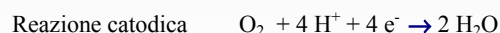
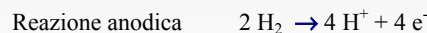
Il settore degli impianti di piccola taglia alimentati a gas naturale è quello più promettente nel medio termine per i sistemi con celle ad acido fosforico e quello su cui in questa fase si punta a livello internazionale per l'introduzione sul mercato di questi sistemi.

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 anodico.

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

Anodo	Pt legato a PTFE su supporto di carbone (Vulcan XC-72) Contenuto Pt: 0,10 mg/cm ²
Catodo	Pt legato a PTFE su supporto di carbone (Vulcan XC-72) Contenuto Pt: 0,50 mg/cm ²
Elettrolita	100% H ₃ PO ₄ su matrice amorfa (PTFE-SiC)
Piatti bipolari	Grafite

I problemi ancora aperti riguardano l'ottimizzazione delle prestazioni e della durata degli impianti e 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 sembra poter essere raggiungibile solo dopo l'avvio della produzione di serie.

Il **PC25** dell'**UTC Fuel Cells** (già International Fuel Cells) è un impianto "package" che produce 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 (o propano) 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.

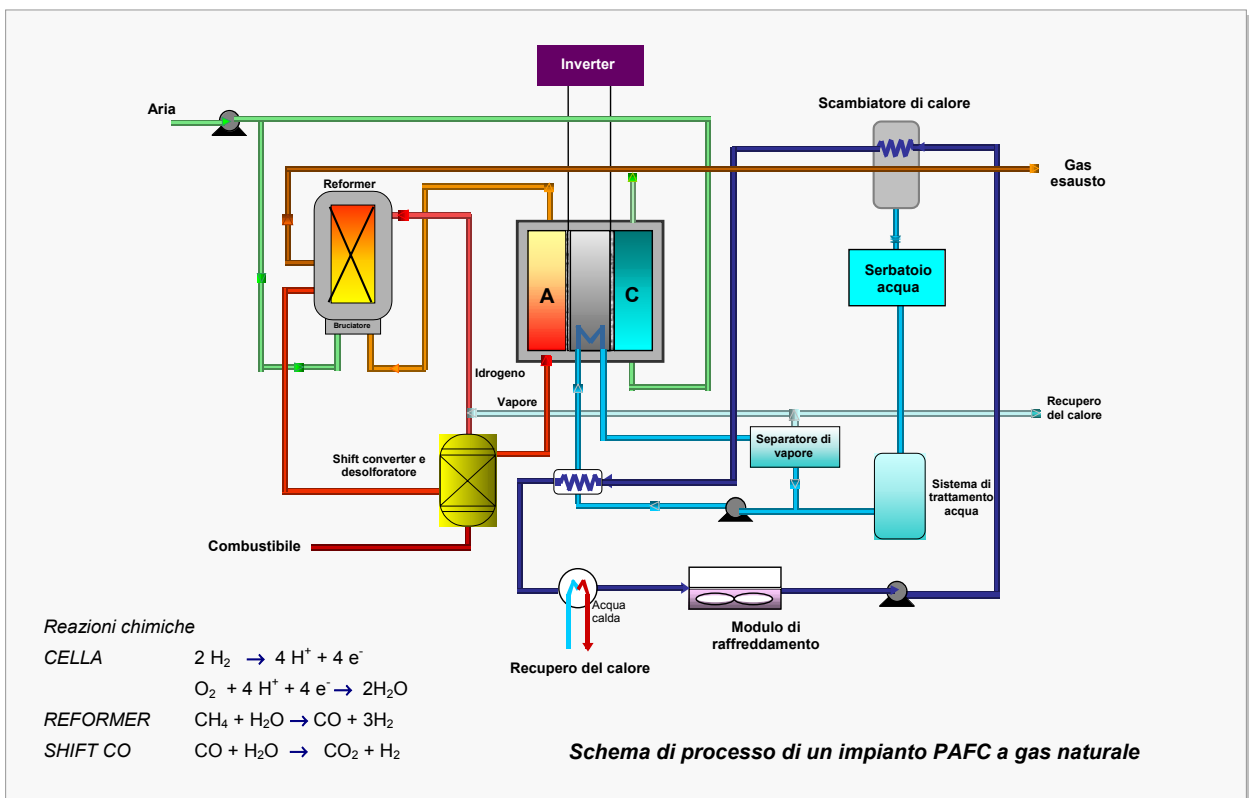
Il PC25 è il sistema attualmente più diffuso, con oltre 200 impianti posti in esercizio in oltre 80 città degli Stati Uniti ed in 17 altre nazioni in Nord-America, Europa Asia ed Australia. Ad oggi la flotta di PC25 ha accumulato oltre 4,8 milioni di ore di esercizio dimostrando, oltre che un'efficienza elettrica intorno al 40% in tutti gli impianti, buona affidabilità ed ottime caratteristiche ambientali.

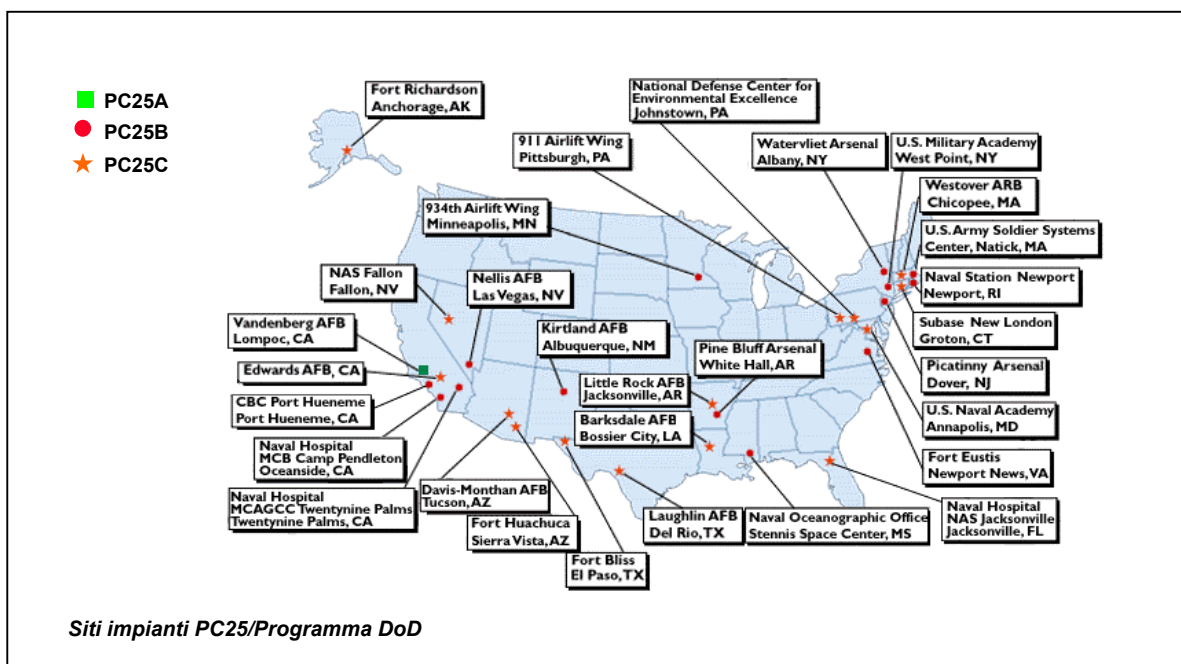
Alcuni di questi impianti hanno superato le 40.000 ore di funzionamento, indicate come l'obiettivo da raggiungere per la commercializzazione ed uno ha raggiunto le 50.000 ore. Il più lungo funzionamento ininterrotto è stato di 9.500 ore ed è stato registrato da unità installata presso la Tokyo Gas in Giappone.



Impianto da PC25 della ONSI

CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO ONSI DA 200 kW	
Potenza elettrica nominale	200 kW/235 kVA con gas naturale
Voltaggio	480/277 V a 60 Hz 400/230 V a 50 Hz
Efficienza totale (PCI)	80% (40% elettrica, 40% termica)
Energia termica disponibile	260 kW a 60 °C
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%
Distorsione armonica totale	< 3%
Emissioni	CO < 2 ppm, SO _x trascurabile NO _x 1 ppm
Rumore	≈ 60 dB a 10 m
Dimensioni:	Modulo principale Modulo raffreddamento
	5,5 m x 3 m x 3 m 4,1 m x 1,3 m x 1,2 m



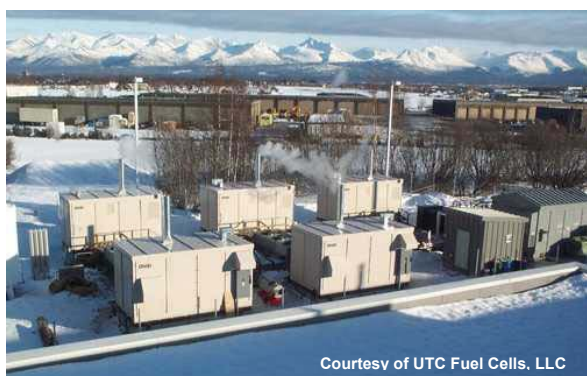


Il Department of Defense (DoD) statunitense tra il 1994 ed il 1997 ha installato 30 unità ONSI PC25 (1 Modello A, 14 Modelli B e 15 Modelli C) in diversi siti militari degli Stati Uniti. Obiettivo del programma dimostrativo, condotto sotto la direzione dell'USACERL (U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory), è quello di fornire una valutazione delle prestazioni di questo tipo d'impianti in un intervallo di condizioni, climatiche e geografiche, profondamente diverse.

E' stato stimato che, rispetto a sistemi di generazione di energia di tipo tradizionale, i PC25 consentono di ottenere una notevole riduzione degli inquinanti immessi nell'atmosfera. A settembre 2000 è stato calcolato che flotta di PC25 aveva consentito di ridurre le emissioni di NO_x di 197 t, di SO_x di 422 t e di CO₂ di 25.000 t.

A questo proposito si ricorda che in California le unità PC25 sono esenti dalle restrizioni imposte, agli impianti di generazione di potenza, dalle restrittive leggi sulla qualità dell'aria in vigore nello Stato e che negli Stati Uniti chi ha acquistato questi impianti ha ricevuto un contributo governativo a fondo perduto (pari ad un terzo del valore dell'acquisto) attraverso il DoE o il DoD, che intendono promuovere la penetrazione sul mercato della tecnologia delle celle a combustibile.

PRESTAZIONI FLOTTA DoD (PC25 - 31 agosto 2001)	
Ore di funzionamento totali	743.406 ore
Energia elettrica prodotta	126.800 MWh
Disponibilità:	62,8%
<i>Flotta Mod. B</i>	53,4%
<i>Flotta Mod. C</i>	73 %



**1 MW Fuel Cell Project, US Post Office,
Anchorage, Alaska**

L'UTC Fuel Cells ha inoltre 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, inaugurato ad agosto 2000, è costituito da 5 unità PC25 connesse in parallelo, ed è configurato in modo da immettere nella rete pubblica l'energia prodotta in eccesso rispetto ai fabbisogni energetici del centro presso cui è installato.

In Giappone attività sulle celle ad acido fosforico sono in corso da diversi anni con forte appoggio finanziario da parte del governo. Al momento le attività sulle PAFC sono svolte all'interno dell'International Environmental Preservation Cooperation; parte dei costi di sviluppo sono sostenuti 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 oltre 100 unità con celle ad acido fosforico, per una capacità totale installata di 15 MW.

Obiettivo è quello di dimostrare l'affidabilità sul campo della tecnologia e quindi promuoverne la sua introduzione nel mercato.

Oltre ai molti impianti di potenza 50-200 kW in passato in Giappone hanno anche operato:

- un impianto da 11 MW per potenza distribuita costruito da UTC Fuel Cells e Toshiba, esercito dal 1991 al 1997 presso la Tokyo Electric Power Company a Goi, nella zona sud-est di Tokyo;

- 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 ed il 1989, due da 1 MW (costruiti rispettivamente da Mitsubishi/Fuji e da Toshiba/Hitachi) ed uno da 4,8 MW, costruito dall'UTC Fuel Cells (installato a Tokyo);
- un impianto da 1 MW a pressione atmosferica, per cogenerazione in ambiente commerciale, installato dalla Toshiba alla Tokyo Gas.

La **Fuji Electric Co.** sta sviluppando da alcuni anni impianti per cogenerazione con celle ad acido fosforico. La società ha consegnato, per attività dimostrative, 95 impianti on-site di potenza compresa tra 50 e 500 kW.

La Fuji, che negli ultimi anni ha fatto grossi progressi nello sviluppo di impianti on-site, ha messo a punto unità altamente affidabili di potenza 50 e 100 kW. La prima unità FP-100F era stata installata presso un suo centro a Chiba, nel novembre 1999.

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 (oggi Ansaldo Fuel Cells, AFCo).

In Europa risultano installati oltre 20 impianti con celle a combustibile ad acido fosforico.

CARATTERISTICHE IMPIANTI FUJI ELECTRIC		
	Serie FP50	Serie FP100
Potenza elettrica	50 kW con gas naturale	100 kW con gas naturale
Voltaggio	210/220 V	210/220 V
Frequenza	50/60 Hz	50/60 Hz
Efficienza elettrica	37% (PCI)	40% (PCI)
Emissioni NO _x	< 5 ppm	< 5 ppm
Rumore	≈ 65 dB a 1 m	≈ 65 dB a 1 m
Dimensioni	3,1 m x 1,75 m x 2,5 m	3,8 m x 2 m x 2,5 m



Impianto PAFC da 1,3 MW installato a Milano

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 tali impianti ha consentito di valutare le loro caratteristiche operative (efficienza, affidabilità, necessità di manutenzione, emissioni, ecc.), verificandone i vantaggi energetici ed ambientali.

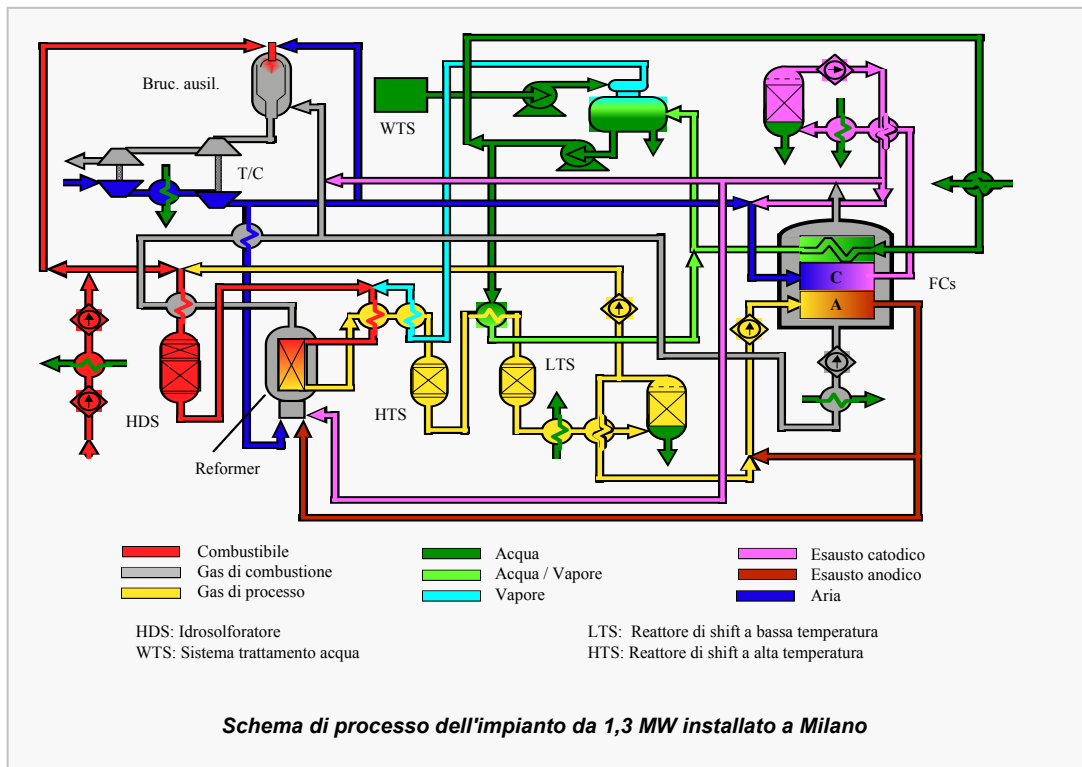
L'azione più importante è quella che ha portato alla realizzazione dell'**impianto dimostrativo da 1,3 MW** installato a Milano, presso il polo tecnologico della Bicocca.

Nel settembre 1988 ENEA, l'Azienda Energetica Municipale (AEM) di Milano ed Ansaldo hanno 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 Fuel Cells), l'impianto è 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 Elzag-Bailey.

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



L'impianto, entrato in esercizio nell'agosto 1995, ha operato fino a settembre 1998 (6000 ore di funzionamento); dopo di ciò l'impianto è stato fermato e posto in stato di conservazione. 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 è ubicato l'impianto, la potenzialità di inserimento degli impianti a celle a combustibile in zone residenziali densamente popolate.

L'impianto ha garantito un buon comportamento, i dati ottenuti dalla sperimentazione hanno 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 accumulata con le attività sviluppate è stata molto significativa ed 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.

L'impianto da 1,3 MW di Milano verrà riutilizzato nell'ambito di un programma promosso dal Comune di Milano per la sperimentazione delle tecnologie dell'idrogeno (celle a carbonati fusi, celle polimeriche, minirete a idrogeno, distributore per veicoli).

In Italia presso la **SEABO** (Società Energia Ambiente Bologna), nel periodo aprile 1993-maggio 1996, ha operato un **impianto PAFC della potenza di 200 kW** prodotto dalla ONSI e fornito da Ansaldo Ricerche. L'impianto della SEABO 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.

Il valore del rendimento elettrico medio, relativo a tutto il periodo di funzionamento, pari al 39,8% (confrontato con il rendimento nominale del 40%), conferma le buone prestazioni del sistema sotto il profilo energetico. Il valore della disponibilità ha risentito fortemente dei lunghi periodi di fermo dovuti ai tempi lunghi di diagnosi e di approvvigionamento di alcuni componenti dell'impianto negli USA.

L'esperienza SEABO ha dimostrato 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.

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 kWhe
Energia termica	1.528.760 kWht
Combustibile CH ₄ (pci)	6.376.655 kWh
Rendimento elettrico medio	39,3%
Rendimento cogenerativo medio	63,3%

Nel 1999 è stato avviato un progetto, finanziato dal Ministero dell'Ambiente, che ha portato all'installazione nel 2001 di un **impianto da 200 kW** (PC25 fornito da Ansaldo Ricerche), presso il **Museo della Scienza e della Tecnica di Milano**.

L'energia prodotta dall'impianto è utilizzata per alimentare pannelli radianti per il riscaldamento del museo; l'ulteriore calore recuperato verrà usato per alimentare gli impianti già esistenti, riducendo ulteriormente il carico delle caldaie. Nei periodi estivi l'energia elettrica prodotta sarà impiegata per le comuni utenze del museo; è in via di valutazione la possibilità di utilizzare il calore recuperato per il raffrescamento di alcuni edifici, per mezzo di impianti di condensazione a bassa temperatura.

Il Museo, situato nel centro di Milano, è ospitato in un edificio storico del XVI secolo; la tecnologia in 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
AUSTRIA	Vienna	PC25A	Austria Ferngas Gmbh	1993
DANIMARCA	Toftlund	PC25A	Naturgas Syd Sonderkyllands	1992
FINLANDIA	Vantaa O	PC25A	ImatranVoioa Oy	1992
FRANCIA	Parigi	PC25C	GEPPAC, Paris	1999
GERMANIA	Bochum	PC25A	Stadwerke Bochum	1992
	Darmstadt	PC25A	HEAG	1993
	Düren	PC25A	Stadwerke Düren/Thyssengas	1993
	Amburgo	PC25A PC25C	HEW/HGW	1995 1997
	Gröbers/Halle	PC25C	Gasversorgung Sachsen-Anhalt GmbH, HGC	1997
	Halle/Saale	PC25C	Energieversorgung Halle GmbH	1997
	Saarbrücken	PC25C	Stadwerke Saarbrücken	1997
	Francoforte sul Meno	PC25C	Stadwerke Frankfurt/PreussenElektra	1998
	Kaltenkirchen	PC25C	Erdgas Energie Systeme	1998
	Norinberga	PC25C	BZ-BZ kW Nürnberg GbR/Studienges	1998
	Oranienburg	PC25C	Stadwerke Oranienburg	1998
	Bartgeheide	PC25C	Hamburg Gas Consult	1998
	Kamenz	PC25C	-	1999
	Colonia	PC25C	GEW	2000
GRAN BRETAGNA	Working	PC25C		2001
ITALIA	Milano	1,3 MW (Stack IFC)	AEM	1992
	Bologna	PC25A	SEABO (in passato A.Co.SeR)	1993
	Milano	PC25	Museo della Scienza e della Tecnica	2001
SVIZZERA	Ginevra	PC25A	Service Du Gaz	1993
SVEZIA	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 litato al catodo).

Rispetto alle celle che operano a bassa temperatura presentano alcuni vantaggi:

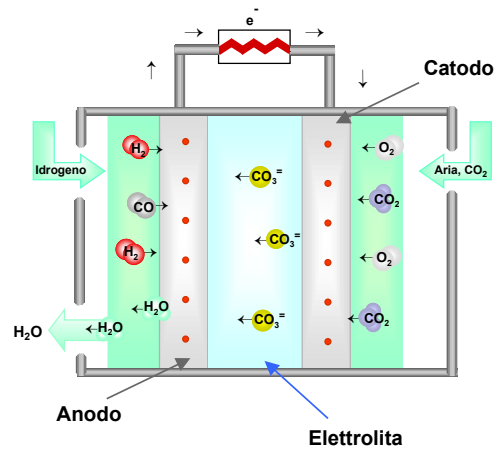
- cinetiche di reazioni più veloci che eliminano il bisogno di metalli preziosi come catalizzatori;
- maggiore flessibilità nell'uso di combustibili, con possibilità di alimentare la cella direttamente con gas naturale o distillati leggeri senza stadio di riforma esterna del combustibile;
- possibilità di cogenerare a temperature d'interesse industriale.

Con esse 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 stia incontrando ancora difficoltà ad affermarsi. Tra i principali problemi vi sono la dissoluzione del catodo in ossido di litio litato ($\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$), la sinterizzazione dell'anodo di nichel e la corrosione dei componenti metallici, come ad esempio i piatti bipolari.

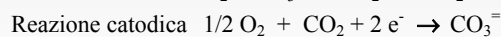
Nonostante i notevoli progressi compiuti negli ultimi anni, resta ancora molto da fare per superare questi problemi e per raggiungere gli obiettivi di durata e di costi richiesti per il suo impiego in impianti di generazione di energia elettrica (almeno 40.000 ore per lo stack, costi d'impianto inferiori a 1500 \$/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 20-30 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 principali 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.

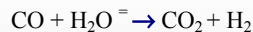


REAZIONI ELETTROCHIMICHE

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 (H_2S , COS). Tenore di S ammesso < 1 ppm.

MATERIALI DEI COMPONENTI DI CELLA

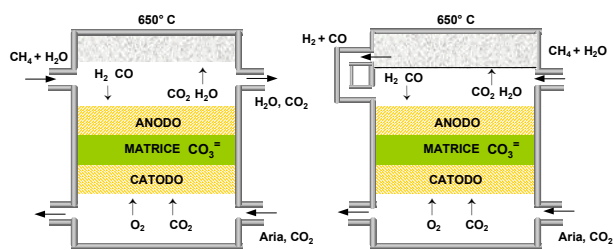
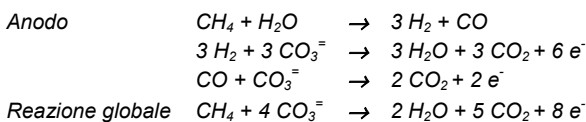
Anodo	Nichel-Cromo o Ni-Alluminio; area superficiale 0,1-1 m ² /g; spessore 0,20-1,5 mm
Catodo	NiO litato, area superficiale 0,5 m ² /g; spessore 0,5-1 mm
Elettrolita	Li ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃ 62-38% su matrice di γ-LiAlO ₂ ; area superficiale 0,1-12m ² /g; spessore 0,5-1 mm
Piatto Bipolare	Leghe metalliche (Incoloy 825, acciaio 310S o 316) con materiali protettivi

REFORMING INTERNO

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.

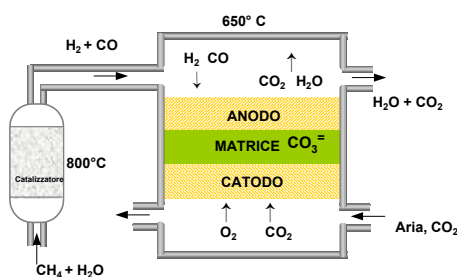
In una IRMCFC il catalizzatore (in genere nichel supportato su MgO o su LiAlO_2) per la reazione di reforming è nella camera anodica o in una zona separata adiacente all'anodo; le due diverse soluzioni vengono indicate rispettivamente come: internal reforming diretto (DIR) ed internal reforming indiretto (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 dir (DIR)

Reforming interno indiretto (IIR)



MCFC con reforming esterno

PROGRAMMI DI RICERCA E SVILUPPO

Situazione internazionale

Programmi di sviluppo di MCFC sono in corso negli Stati Uniti, in Giappone ed in Europa. Le diverse attività sono orientate allo sviluppo di stack di potenza crescente (alcune centinaia di kW) ed alla realizzazione di impianti dimostrativi, anche se le attività di ricerca rivolte al miglioramento della tecnologia di cella occupano ancora uno spazio rilevante tra le azioni in atto a livello internazionale.

STATI UNITI

Negli Stati Uniti nello sviluppo di MCFC è impegnata, con il supporto del Department of Energy (DoE), la FuelCell Energy (già Energy Research Corp.); programmi dimostrativi in passato sono stati condotti anche dall'UTC Fuel Cells e dalla MC-Power Corporation, che hanno poi sospeso le loro attività.

■ FuelCell Energy

La FuelCell Energy (Danbury, CT) lavora nel settore delle celle a carbonati fusi dalla metà degli anni '70 ed è arrivata a dimostrare stack ed impianti MCFC di diversa potenza.

L'impianto da 1,8 MW (16 stack da 125 kW) con alimentazione diretta del metano, installato dalla FCE a S. Clara (CA, USA), rappresenta l'unità di tecnologia MCFC di taglia maggiore finora realizzata. L'impianto, entrato in esercizio nell'aprile 1996, dopo aver operato per qualche centinaio di ore alla sua potenza massima, era stato riavviato ad una potenza di 1 MW e mantenuto in esercizio fino al marzo 1997, raggiungendo circa 5800 ore di funzionamento.

La FCE sviluppa una tecnologia, nota commercialmente come DFC[®], Direct Fuel Cell, in cui la riforma del combustibile (gas naturale, metanolo, biogas, gas da carbone) avviene all'interno della cella.

Un primo impianto in configurazione DFC di potenza 250 kW è rimasto in esercizio, nella sede FCE di Danbury, dal febbraio 1999 al giugno 2000. L'unità, connessa agli edifici della FCE e alla rete elettrica, ha totalizzato 11.800 ore di esercizio, durante le quali ha generato 1.906 MWh, dimostrando un'efficienza elettrica del 45% ed una disponibilità del 93%.



Impianto da 1,8 MW a S. Clara (CA, USA)



Impianto Direct Fuel Cell da 250 kW

Il programma FCE è rivolto allo sviluppo di prodotti per il mercato della generazione di potenza distribuita per applicazioni al di sotto di 10 kW. Per il breve termine è prevista la realizzazione di 3 classi di prodotti, rispettivamente da 300 kW, 1,5 MW e 3 MW, configurati come riportato nella figura a lato.

Le unità DFC®300 sono realizzate all'interno di una collaborazione con la **DaimlerChrysler-MTU**. Questa ultima, come vedremo in dettaglio nel seguito, sviluppa impianti in configurazione "Hot Module".

FCE ha in corso o già pianificato una serie di dimostrazioni sul campo, presso diversi utenti.

Dimostrazioni unità da 250 kW (impianti in configurazione "Hot Module", realizzati nell'ambito del programma congiunto con la MTU) sono in corso o previste presso:

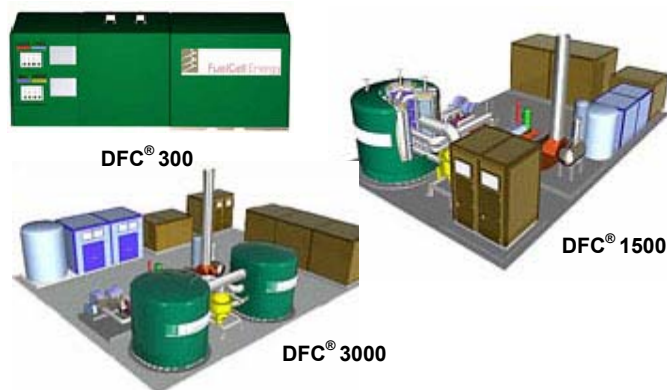
- **Bielefeld University Campus** (Bielefeld, D) - Unità da 250 kW, avviata nel novembre 1999.
- **Sede MercedesBenz** (Tuscaloosa, AL, USA) - Unità da 250 kW nel 2001; progetto parzialmente finanziato dalla Southern Company (Alabama, Georgia) e dalla Alabama Municipal Electric Authority.
- **Los Angeles Department of Water and Power** - Accordo per l'installazione di due unità da 250 kW da installare nell'area di Los Angeles (settembre 2001-aprile 2002).
- **Rhoen-Klinikum** - Un'unità fornita dalla MTU è entrata in esercizio a maggio 2001 presso un ospedale a Bad Neustadt, in Germania.
- **Marubeni Corp.** - La Marubeni Corp. (Tokyo, J e New York, USA) si è impegnata ad installare 8 unità da 250 kW in località ancora da individuare.

Ci sono poi accordi per installare in Europa, Asia e Stati Uniti ulteriori unità da 250 kW.

Impianti classe 1 MW

- **King County, Washington** - Un impianto da 1 MW alimentato con gas metano ottenuto da un impianto di trattamento di rifiuti (Renton, WA), sarà realizzato nel 2002. Al progetto partecipano l'U.S. Environmental Agency ed il King County Department of Natural Resources.
- **Global Energy /U.S. Dept. Of Energy** - Nel quadro del Federal Clean Coal Technology Programme del DoE, FCE fornirà (2003) un impianto da 2 MW alla Kentucky Pioneer Energy (consociata della Global Energy Inc.). Il progetto è orientato a dimostrare nuovi modi di utilizzo del carbone per la produzione di energia.

La FCE sta inoltre lavorando per sviluppare impianti ibridi DFC/turbina a gas. In questi una serie di scambiatori di calore trasferisce il calore di scarto della cella alla turbina a gas, che lo converte in energia meccanica, e quindi in ulteriore energia elettrica. Con configurazioni di questo tipo sarebbe possibile arrivare ad ottenere efficienze totali del 75-80%.



Programma di commercializzazione FCE

	Test dimostrativi	Entrata mercato	Prodotto maturo
DFC® 300			
kW (AC netta)	250	250	300
Efficienza (PCI), %	47	49	54
DFC® 1500			
kW (AC netta)	1000	1200	1500
Efficienza (PCI), %	49	51	56
DFC® 3000			
kW (AC netta)	2000	2500	3000
Efficienza (PCI), %	50	52	57

All'interno del Vision21 Program del DoE, sono in corso attività per sviluppare un impianto ad alta efficienza da 40 MW.

Ricordiamo che FCE ha realizzato un impianto di produzione stack da 40 MW/anno, che a medio termine (2004) intende portare a 400 MW/anno.

GIAPPONE

In Giappone, programmi nazionali sulle MCFC sono stati avviati agli inizi degli anni '80, come parte di un progetto di notevole dimensioni per il risparmio energetico supportato dall'Agency of Industry and Science Technology (AIST) del Ministry of International Trade and Industry (MITI) e dal NEDO (New Energy Industrial Technology Development Organization).

Lo sviluppo delle celle a carbonati è attualmente promosso all'interno del New Sunshine Programme e vede coinvolte industrie di primaria importanza come **Hitachi**, **Ishikawajima-Harima-Industries (IHI)** e **Mitsubishi Electric Company**.

Technology Research Association for MCFC Power Generation System / Hitachi / IHI

Sotto il coordinamento del NEDO è stato realizzato un **impianto pilota da 1 MW** con reforming esterno del combustibile (gas naturale).

Il progetto avviato nel 1993 ha portato alla realizzazione di un impianto costituito da quattro moduli da 250 kW, forniti da due costruttori diversi (IHI e Hitachi); la progettazione di tutti gli altri componenti dell'impianto era affidata alla MCFC Research Association (Technology Research Association for MCFC Power Generation System).

L'impianto, che è entrato in esercizio nel luglio '99 presso la stazione di potenza di Kawagoe della Chubu Electric Co., ha funzionato per 4.916 ore, generando 2.103 MWh, con un'efficienza elettrica del 45% (HHV); le attività dimostrative si sono chiuse a marzo 2000.

Membri della MCFC Research Association

Central Research Institute Power Industry	Shikoku Electric Power Co., Inc.	Mitsubishi Electric Corp.
Hokkaido Electric Power Co., Inc.	Kyushu Electric Power Co., Inc.	Toshiba Corp.
Tohoku Electric Power Co., Inc.	Electric Power Development Co., Ltd.	Ebara Corp.
The Tokyo Electric Power Co., Inc.	Tokyo Gas Co., Ltd.	Kobe Steel, Ltd.
Chubu Electric Power Co., Inc.	Osaka Gas Co., Ltd.	Kawasaki Heavy Industries, Ltd.
Hokuriku Electric Power Co., Inc.	Toho Gas Co., Ltd.	Japan R & D. Center for Metal
The Kansai Electric Power Co., Inc.	Hitachi, Ltd.	Japan Fine Ceramic Center
The Chugoku Electric Power Co., Inc.	Ishikawajima-Harima-Heavy Industries Co., Ltd.	

Gli stack inseriti nell'impianto presentano una diversa configurazione. La tecnologia IHI prevede infatti celle di tipo rettangolare (area attiva 1 m²) e per la distribuzione dei gas sceglie il manifold interno, con flussi dei gas anodico e catodico in ecorrente parallela.

L'Hitachi propone invece una configurazione cosiddetta "Multiple Large Capacity" che consiste in una cella quadrata composta da quattro celle più piccole con manifold interno e flusso incrociato dei gas di alimentazione. Uno stack di questo tipo non è molto diverso, per quanto riguarda le prestazioni, da unità ottenute assemblando quattro stack più piccoli, salvo i vantaggi costruttivi e di resistenza che presenta. In questo modo Hitachi produce stack di area attiva 1,21 m².

Gli stack hanno operato con prestazioni stabili ed uniformi. Le velocità di decadimento, registrate nell'arco di 1000 ore, sono state di 0,47% per gli stack IHI e di 0,65% per quelli Hitachi, al di sotto quindi dei valori fissati dal NEDO come obiettivo (1%/1000 ore).

Nell'aprile 2000 è stata avviata la III^a fase del New Sunshine Programme (durata quinquennale), finalizzata allo sviluppo di sistemi da 750 kW. Tali unità dovrebbero costituire i moduli base di impianti per la generazione di potenza distribuita di taglia 7-8 MW, da impiegare eventualmente in cicli combinati. Una fase intermedia del programma prevede la messa a punto di impianti di generazione di potenza, pressurizzati, da 300 kW.

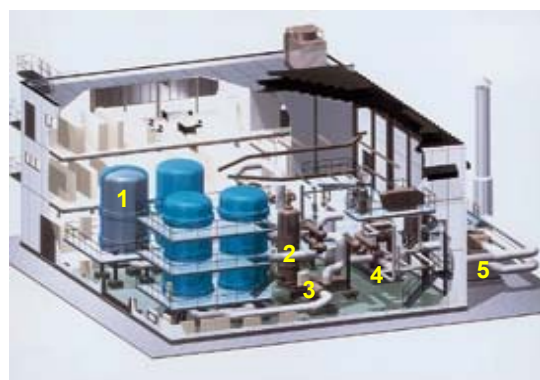
OBIETTIVI DEL PROGETTO MCFC - III^a FASE 2000-2004

	Impianti da 300 kW	Modulo ad alta efficienza da 750 kW
Potenza	300 kW (AC)	750 kW (DC)
Pressione	0,4 Mpa	1,2 Mpa
Combustibile	Gas naturale	Gas naturale
Efficienza	43% (HHV, netta)	47% (HHV, totale)
Tempo di esercizio	> 10.000 ore	
Velocità di decadimento prestazioni	< 0,3%/1.000 h (200 mA/cm ²)	

In parallelo sono stati previsti studi relativi al riciclaggio dei materiali usati negli stack, valutazioni economiche ed indagini riguardanti la possibilità di utilizzo di gas derivati da carbone.

■ Mitsubishi Electric Corp.

La Mitsubishi Electric Corp. (MELCO) sviluppa MCFC con reforming interno del metano (AIR, Advanced Internal Reforming, un ibrido tra la configurazione DIR e IIR). In passato le attività sono state condotte in collaborazione con l'FCE ed ora in maniera totalmente autonoma.



Schema impianto dimostrativo da 1 MW di Kawagoe

1. Stack da 250 kW
2. Reformer
3. Blower
4. Compressore
5. Generatore di vapore

La MELCO ha realizzato, in collaborazione con la Kansai Electric Power Co., un impianto di potenza 200 kW che ha operato, utilizzando gas naturale, presso la test facility di Amagasaki. Il lavoro è svolto all'interno del New Sunshine Programme dell'AIST/MITI e con supporto da parte del MCFC R.A. (Technology Research for Molten Carbonate Fuel Cell Generation System).

Nel corso della sua dimostrazione, l'impianto ha fatto registrare prestazioni in linea con gli obiettivi fissati dal NEDO. L'unità è rimasta in funzione per 5.229 ore, durante le quali ha generato 1.134 MWh.

EUROPA

Programmi sulle MCFC, oltre che in Italia, sono in corso in Germania con la MTU Friedrichshafen ed in Olanda da parte della BCN (Brandstofcel Nederland, consorzio fondato da ECN, Stork e Schelde).

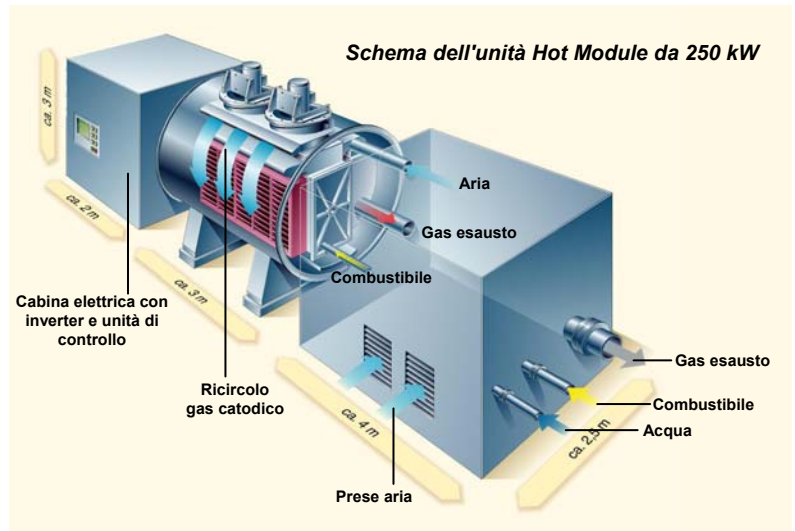
■ MTU Friedrichshafen

La MTU Friedrichshafen (del gruppo Daimler-Chrysler) è intervenuta nel settore delle MCFC alla fine degli anni '90, acquisendo una quota azionaria (circa l'11%) della FuelCell Energy.

La MTU è impegnata nello sviluppo di sistemi da 300 kW per cogenerazione. Le attività sono svolte nell'ambito dell'European Fuel Cell Consortium (ARGE-MCFC), del quale sono membri, oltre alla MTU, le aziende tedesche RWE Energie e Ruhrgas AG e la società danese Elkraft.

L'unità base dell'impianto, nota come **"Hot Module"**, integra tutti i componenti ausiliari che operano a temperatura e pressione simili in un vessel isolato termicamente. In pratica il modulo contiene lo stack con riforma interna del combustibile, sviluppato dalla FuelCell Energy, il bruciatore catalitico dell'esausto anodico ed il riciclatore catodico.

La prima unità completa di questo tipo è stata provata nel 1997 presso la Ruhrgas AG a Dorsten (D) con l'intento di verificarne la funzionalità meccanica e fluido-meccanica. I risultati di queste prove e l'esperienza acquisita, nel corso degli anni, dalla FCE nell'esercizio degli stack di varia potenza, hanno portato all'avvio nel 1998 della terza fase del programma di sviluppo, che prevede la dimostrazione di diversi impianti pilota da 250 kW entro il 2002 (vedere sezione dedicata alla FCE). Un primo vero impianto di questo tipo è entrato in funzione all'Università di Bielefeld nel novembre 1999.



Unità da 250 kW in prova presso il Rhoen-Klinikum, Bad Neustadt/Saale (D)

Una seconda unità è entrata in esercizio a maggio 2001 presso un ospedale, il Rhoen-Klinikum, a Bad Neustadt/Saale, in Germania.

Quest'impianto, connesso alla rete elettrica e termica interna dell'ospedale, al 26 luglio 2001 operava con le seguenti caratteristiche:

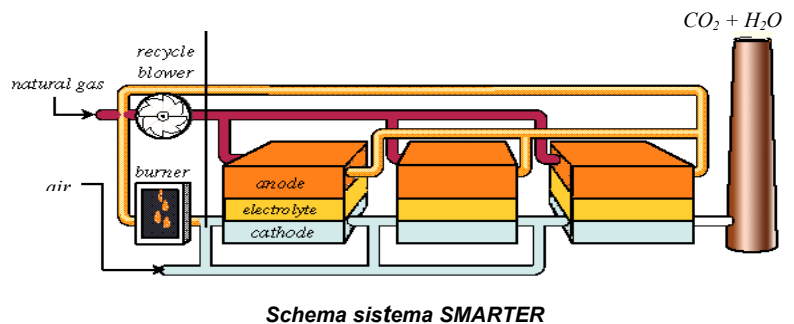
- Potenza netta 213 kW
- Efficienza impianto (AC) 46 %
- Efficienza stack (DC) 56%
- Energia elettrica prodotta 323 MWh
- Ore totali di esercizio 2325.

Prodotti commerciali sono previsti sul mercato a partire da quest'anno. L'accordo di licenza, sottoscritto da MTU e FuelCell Energy nel luglio 1998, consente a quest'ultima di fabbricare e vendere impianti "Hot Module" in Nord America.

■ ECN/BCN

Le organizzazioni olandesi ECN e BCN, nell'ambito del Progetto Advanced DIR MCFC, avviato nel 1996 e svolto con supporto finanziario da parte del Novem (Agenzia per l'Energia e l'Ambiente dei Paesi Bassi) e dell'Unione Europea, hanno eseguito studi di fattibilità tecnico-economica di sistemi MCFC, di potenza fino a 400 kW, per cogenerazione.

In collaborazioni con la British Gas (UK), Gaz de France (F) e Sydkraft (S), è stato condotto uno studio che ha portato ad elaborare, attraverso modelli matematici, un sistema di nuova concezione, denominato SMARTER. L'idea è quella di utilizzare tre stack che operano a pressione atmosferica, disposti come riportato in figura. Questa nuova configurazione dovrebbe consentire di ottimizzare la temperatura all'interno degli stack e di ottenere prestazioni maggiori. Al tempo stesso la maggiore semplicità degli impianti dovrebbe permettere una maggiore affidabilità e un più basso costo dell'energia elettrica prodotta.



Situazione italiana

In Italia, lo sviluppo delle celle a carbonati fusi è stato avviato a metà degli anni '80, e vede coinvolte Ansaldo Fuel Cells Spa (AFCo, fino a dicembre 2001 Ansaldo Ricerche), ENEA ed alcune strutture di ricerca.

Le attività nel periodo 1994-99 sono state condotte nell'ambito dell'Accordo di Programma ENEA-MICA, con l'obiettivo di realizzare un **impianto dimostrativo da 100 kW**, alimentato a metano. Tale attività doveva consentire di acquisire conoscenze e tecnologie necessarie per lo sviluppo delle celle a carbonati fusi e della impiantistica relativa, verificando le potenzialità di questi sistemi e mettendone in evidenza gli aspetti critici. Le attività svolte in quest'ambito confluivano in un programma europeo, in cui erano coinvolte anche alcune aziende spagnole.

Da parte italiana nel programma erano coinvolte:

- **AFCo**, responsabile della progettazione e realizzazione dell'impianto e dei suoi componenti;
- **ENEA**, con attività di base sui componenti di cella;
- **FN**, Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, che ha curato la produzione dei componenti porosi di cella su formulazioni di Ansaldo Ricerche;
- **ENEL Ricerca** (oggi CESI), presso la quale viene provato l'impianto.

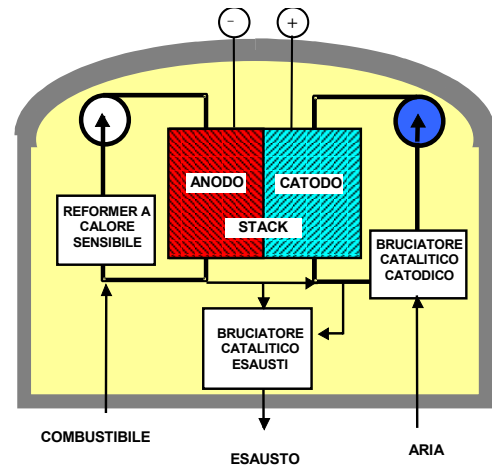
In Spagna, risultavano impegnate le aziende elettriche **Iberdrola** ed **ENDESA** (Empresa Nacional De Electricidad SA e la **Babcock & Wilcox Española**, a loro volta consorziate a formare il **PEP**, Programa Español de Pilas de Combustible, costituito per coordinare tutte le attività spagnole nel campo delle MCFC.

Il programma è articolato in tre fasi principali, come illustrato in figura, la prima delle quali conclusa nel 1999.

In questa fase sono state eseguite attività che hanno portato alla realizzazione e prova di prototipi di stack fino a 100 kW, alla definizione e progettazione di tutti i principali componenti d'impianto ed allo sviluppo dell'ingegneria per un impianto "proof-of-concept" da 100 kW e alla sua realizzazione e prova.

Il modulo base da 100 kW è realizzato da Ansaldo in configurazione **"Compact Unit"**, integrando all'interno di un recipiente in pressione oltre allo stack, il reformer a calore sensibile, il bruciatore catalitico, alimentato dai residui di reazione anodici e catodici, i riciclatori anodico e catodico. Rimangono esterni al modulo base, il sistema di pretrattamento del combustibile, il turbocompressore per l'alimentazione dell'aria di processo ed il sistema di utilizzo del calore.

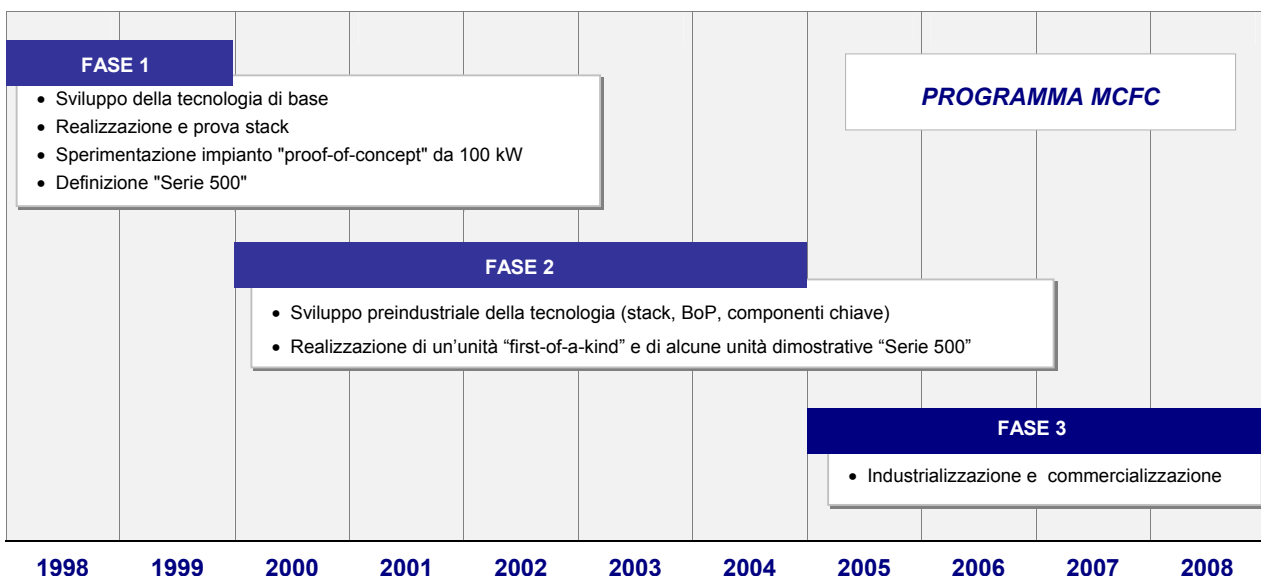
Progettato per lavorare in un recipiente in pressione, lo stack da 100 kW era costituito da due moduli dotati di un'unica struttura di supporto e di un'unica alimentazione debitamente ripartita tra i due moduli (75 celle per modulo, area circa 0,75 m²).



Schema della Compact Unit



Moduli per impianto MCFC da 100 kW
(laboratori Ansaldo Ricerche)



Per quanto riguarda il combustibile di alimentazione inizialmente si è utilizzato gas naturale, ma è stato anche esplorato l'impiego di altri tipi di combustibili, con particolare riferimento ai prodotti della gassificazione del carbone (fino al 62% di CO).

Lo stack da 100 kW è stato provato con successo in Spagna, presso la stazione di prova di San Augustin de Guadalix (Madrid) realizzata da PEP Iberdrola. L'impianto è dimensionato per il condizionamento e la prova di stack di potenza fino a 130 kW, ma con possibilità di esercire anche stack di taglia inferiore (10 kW).



Impianto "proof-of-concept" da 100 kW - CESI (Milano)

Al termine delle prove previste, lo stack è stato trasferito a Milano ed integrato in un impianto "proof-of-concept" realizzato presso l'area sperimentale di Segrate dell'ENEL Ricerca (attualmente CESI). Il sistema ha le caratteristiche di un impianto reale di tipo cogenerativo ed il sito dispone delle infrastrutture necessarie al suo esercizio in diverse condizioni operative. Sono state eseguite prove sperimentali di validazione dell'intero sistema, ivi inclusa la verifica della capacità cogenerativa.

Accanto alle attività di progettazione e realizzazione di stack e di impianti sono state svolte attività orientate allo sviluppo ed al miglioramento dei componenti di cella.

ENEA, in particolare, ha svolto attività che riguardano lo studio delle proprietà elettrochimiche ed elettriche dei componenti e la preparazione e caratterizzazione di materiali innovativi. Sono state individuate nel nichel rivestito con cobaltite di litio e nel nichel-alluminio materiali molto promettenti per lo sviluppo rispettivamente di catodi ed anodi, più stabili di quelli attuali. Elettrodi innovativi (catodi in cobaltite di litio) preparati per tape-casting sono stati provati in una stazione di prova per MCFC con elettrodi fino a 100 cm².

La seconda fase del Programma, in pieno svolgimento, è tesa a dimostrare che la tecnologia MCFC, a parte affinamenti ancora necessari, è pronta per passare da soluzioni "proof-of-concept" di tipo prototipale a impianti "first-of-a-kind" di tipo precommerciale e quindi a unità idonee per l'introduzione sul mercato.

In questa fase Ansaldo sta sviluppando il progetto di un'unità identificata come "SERIE 500", studiata per potenze fino a 500 kW, ma progettata anche per derivarne taglie diverse, e ne sta avviando la realizzazione. In generale le unità della "SERIE 500" saranno costituite da due moduli, ciascuno assemblato secondo una configurazione proprietaria di Ansaldo Ricerche denominata **TWINSTACK**[®] e a sua volta formato da una coppia di stack. Questi moduli saranno quindi inseriti, secondo una configurazione originale, in un vessel pressurizzato.



Stazione di prova per MCFC fino a 100 cm²

Sono previste alcune azioni dimostrative, per la sperimentazione di queste nuove unità; si sta tra l'altro valutando la possibilità di una riconversione dell'impianto PAFC realizzato a Milano da Ansaldo, AEM ed ENEA.



Stazione di prova PEP Iberdrola a S. Augustin de Guadalix (Madrid, E)

Al momento, parzialmente finanziati dalla Comunità Europea, sono in corso il **Progetto "MCTWINS"** relativo al "first-of-a-kind" "SERIE 500" e il **Progetto "Clean Energy from Biomass"** per l'impiego di stack MCFC con gas da biomassa. In parallelo **AFCO** sta operando per consolidare le azioni di sviluppo tecnologico da svolgere nel medio termine in appoggio alla seconda fase del Programma complessivo anche col supporto di altri partner industriali e di varie Strutture di Ricerca.

Le principali attività previste in questo ambito, in particolare col contributo di **FN, ENEA e CNR-ITAE**, riguardano

SVILUPPO MATERIALI E COMPONENTI DI CELLA

Sviluppo di materiali e componenti di cella innovativi. Preparazione e caratterizzazione chimico-fisica ed elettrochimica "fuori-cella" ed in cella 100x100 mm². In particolare saranno oggetto di studio:

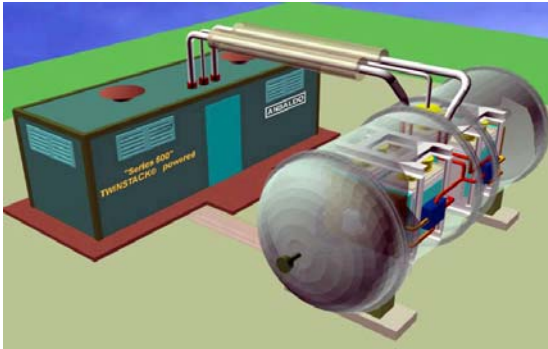
- Anodi in Ni/Al;
- Catodi sia in NiO rivestiti con cobaltite, che in NiO/MgO/Fe₂O₃, con selezione del materiale da adottare nel prosieguo dell'attività;
- Matrici rinforzate con fibre a base di allumina e zirconia e matrici in α-LiAlO₂ in luogo di γ-LiAlO₂;
- Modifica dell'elettrolita.
- Messa a punto e qualifica in stack di componenti di cella.

MESSA A PUNTO DEI PROCESSI DI FABBRICAZIONE COMPONENTI

- Allestimento di linee di fabbricazione industriale per la produzione dei componenti porosi dello stack a partire dalle attrezzature e dai processi già disponibili su scala di laboratorio.
- Sviluppo dei processi di fabbricazione dei materiali innovativi via via messi a punto fino alla realizzazione dei componenti da utilizzare nelle diverse unità dimostrative previste.

SVILUPPO E DIMOSTRAZIONE DI STACK ED IMPIANTI

- Progettazione, realizzazione e prova di unità di diversa potenza, per verificare le soluzioni via via adottate in termini di materiali, componenti e ingegneria dello stack.
- Progettazione e realizzazione di impianti dimostrativi e loro ottimizzazione per giungere a prodotti industriali.



Unità MCFC "Serie 500"

■ Ansaldo Fuel Cells SpA

L'impianto della "SERIE 500" rappresenta l'ultimo passo nello sviluppo della tecnologia MCFC sviluppata da Ansaldo Fuel Cells (AFCo) sin dai primi anni '80.

L'impianto è caratterizzato da elevata efficienza, bassissimo impatto ambientale, facile adattamento all'area che lo deve ospitare e rapida risposta alle variazioni di carico richieste, semplice messa in parallelo con la rete elettrica. L'obiettivo è l'ingresso nel settore di mercato relativo alla produzione di potenza distribuita per impianti di piccola-media taglia (da 250 kW a qualche MW o più).

Lo sviluppo dei prodotti della "SERIE 500" è condotto da AFCo in associazione con altri partner italiani e spagnoli ed è interamente basato su tecnologia e fabbricazione europea.

La tecnologia di base e la capacità di raggiungere le condizioni di

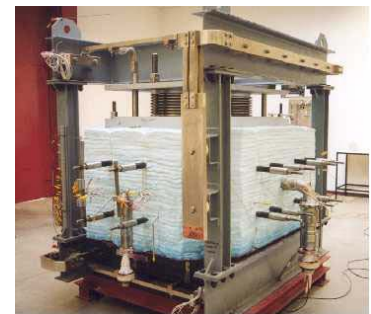
progetto previste per i prodotti della "SERIE 500" sono state consolidate nelle precedenti fasi del programma di sviluppo MCFC. Relativamente ai risultati raggiunti, oltre alla realizzazione ed esercizio dell'impianto "proof-of-concept" da 100 kW installato presso il CESI a Segrate, va segnalata la realizzazione di uno stack "full area" di nuova concezione a geometria rettangolare (denominato STAD-3 ed evoluzione migliorata dello stack utilizzato nell'impianto da 100 kW). Questo è stato sperimentato in differenti condizioni operative presso l'impianto di condizionamento e prova nel sito Iberdrola di Guadalix vicino a Madrid (Spagna).

Il cuore dei prodotti della "SERIE 500" è basato su due moduli elettrochimici, ciascuno costituito da due stack integrati con opportuni sistemi ausiliari ed accoppiati tra loro secondo una configurazione originale denominata TWINSTACK®.

Attualmente l'unità "first-of-a-kind" "SERIE 500" è in fase di sviluppo mentre è stato recentemente avviato, su un contratto della Comunità Europea nell'ambito del Framework Program 5 (FP5 - Preserving the Ecosystem), il progetto per un secondo dimostrativo relativo ad uno stack MCFC da 125 kW alimentato da gas proveniente dalla gassificazione di biomasse, da realizzare presso il Centro Ricerche ENEA della Trisaia.

Rispetto agli impianti tradizionali di taglia equivalente, l'impianto MCFC basato sulla configurazione TWINSTACK®, si presenta competitivo per i seguenti aspetti:

- Realizzazione compatta grazie al posizionamento dello stack, del modulo di reforming integrato e del bruciatore catalitico all'interno di un recipiente in pressione;
- Riduzione del numero dei componenti;
- Semplificazione delle procedure di manutenzione e riduzione dei tempi di intervento, grazie ad un'appropriata sistemazione dei componenti, allo loro già citata compattezza e ad una accresciuta durata di vita;
- Ottimizzazione del lay-out con una particolare soluzione "skid-mounted" che ne facilita l'installazione.



**Stack MCFC "STAD-3"
(AFCo)**

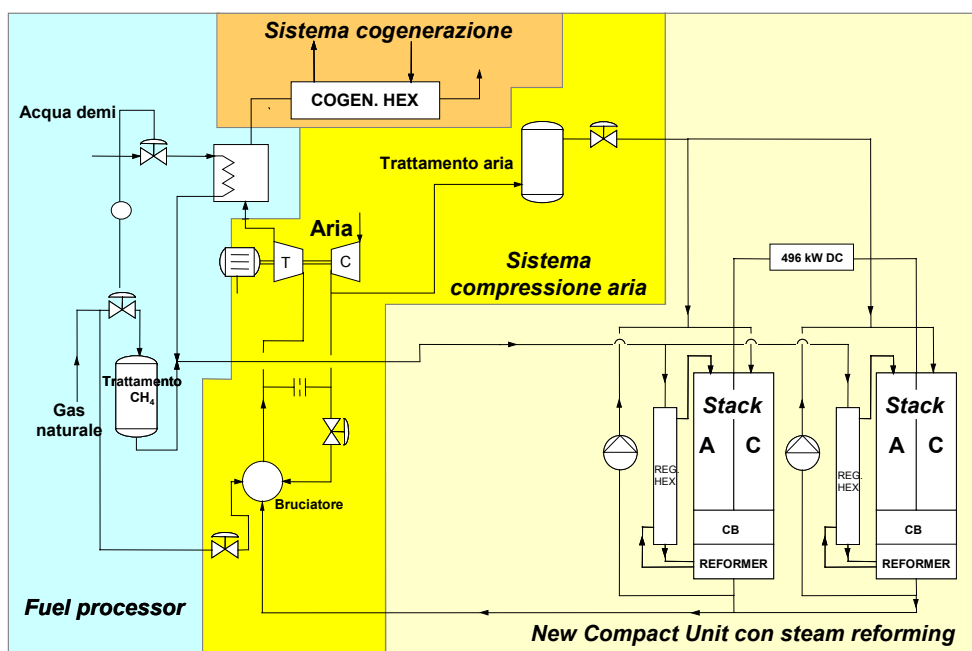


Diagramma di flusso dell'unità "Serie 500"

L'unità "SERIE 500", dalla quale potrà essere derivata anche una taglia inferiore ("SERIE 100", fino a 250 kW) sarà anche impiegata come unità di base ("building block") per la realizzazione di impianti di taglia maggiore fino a 20 MW. In tal caso, il sistema sarà ottimizzato per un'adeguata integrazione con i componenti specifici del Balance of Plant in modo da ridurre l'area occupata e i costi e migliorarne ulteriormente le prestazioni.

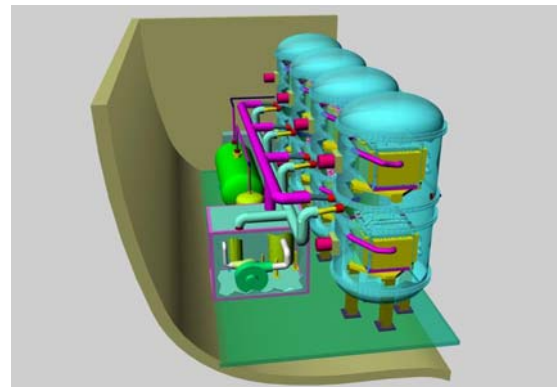
Al riguardo, in parallelo con la realizzazione del primo dimostrativo, si stanno conducendo diversi studi per applicazioni multiMW della configurazione TWINSTACK® basati proprio su uno scale-up della "SERIE 500" sia per applicazioni terrestri che navali.

La sezione di mercato di maggior interesse nel medio termine per i sistemi basati sulle MCFC è la generazione di potenza distribuita per taglie che variano tra i 100 kW e i 5 MW: un settore caratterizzato da piccoli impianti vicini all'utente finale che viene considerato come un mercato emergente. In quest'ottica, AFCo ha individuato un percorso verso la commercializzazione di un prodotto che vede la taglia da 500 kW come la più conveniente per impianti basati sull'attuale tecnologia MCFC per una felice convergenza di obiettivi tecnici, economici e di mercato. La strategia Ansaldo per portare l'attuale tecnologia verso un prodotto industriale, prevede una serie di azioni sia di carattere tecnologico che di natura commerciale:

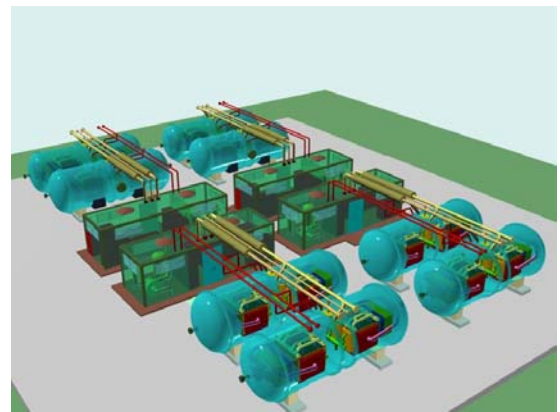
- realizzazione di un impianto "first-of-a-kind" basato sulla tecnologia consolidata, studiato per potenze fino a 500 kW (in corso);
- realizzazione di un numero significativo di unità dimostrative, intese come repliche del "first-of-a-kind" per differenti segmenti del mercato e per differenti tipi di combustibile (già avviato il progetto per un secondo dimostrativo relativo ad uno stack MCFC alimentato da gas proveniente dalla gassificazione di biomasse);
- sviluppo tecnologico dei principali componenti dell'impianto in modo da:
 - minimizzare i costi relativi ai materiali, alla produzione ed all'assemblaggio;
 - migliorare le prestazioni dello stack ed allungarne il periodo di funzionamento;
 - migliorare l'efficienza del sistema riducendo le dissipazioni termiche;
 - migliorare l'efficienza globale dell'impianto mediante processi innovativi e maggiori integrazioni del sistema.

I segmenti di mercato a cui è rivolta la "SERIE 500" sono:

- applicazioni di cogenerazione
- impianti con prodotti residui e/o di scarto ("waste fuels" ed "opportunity fuels") utilizzabili dalle MCFC quali:
 - gas da discarica e da digestori anaerobici;
 - processi industriali che producono H₂ come gas residuo;
 - gas da carbone e da impianti di gassificazione.
- applicazioni per energia "pulita"
- applicazioni navali
- applicazioni di "potenza silenziosa" per impieghi in ambito militare
- applicazioni per industrie leggere
- applicazioni remote.



Studio per un unità da 4 MW per la propulsione navale



Studio per un unità da 4 MW basata sulla "SERIE 500"

■ FN - Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati

FN (società controllata da ENEA al 98,6%) è impegnata sin dal 1990 in attività che riguardano la produzione di componenti porosi di celle a carbonati fusi.

Nella prima fase di ricerca FN si era occupata dello sviluppo dei materiali di base per la matrice ceramica e della messa a punto del processo di fabbricazione, nonché dell'allestimento di una linea di fabbricazione semi-industriale. Avvalendosi dell'esperienza di Ansaldo, nel 1995 è iniziata la produzione sistematica dei componenti porosi (anodo, catodo, matrice in γ -alluminato di litio)

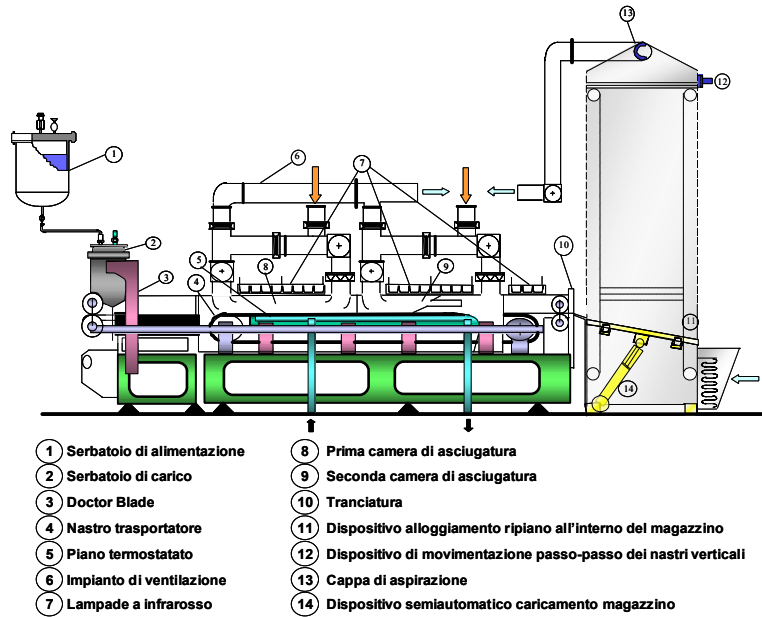
Allestita in FN una linea di fabbricazione sperimentale per le forniture dei componenti finiti per stack di potenza crescente da 5 a 100 kW; nel 2001 è stata allestita una linea di fabbricazione preindustriale di componenti porosi colati su nastro che consente di passare dall'attuale capacità produttiva di 200 kW/anno a quella di 3 MW/anno

La nuova linea di produzione prevede:

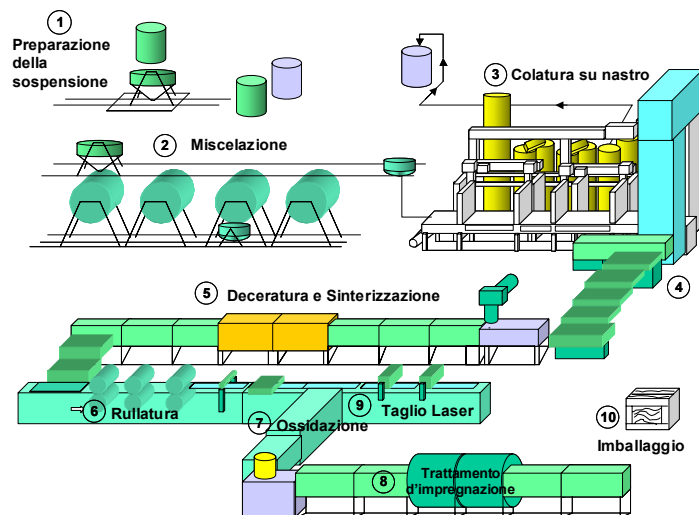
- sistemazione delle attività ad umido, preparazione sospensioni e colatura su nastro in un edificio interamente dedicato;
- potenziamento della linea di preparazione della sospensione mediante l'utilizzo di quattro mulini da 800 litri dotati dei relativi dispositivi per carico e scarico, secondo la normativa vigente in materia di sicurezza;
- completamento del banco colatura su nastro ISA 130 con l'inserimento di un magazzino-essiccatoio, che consenta di incrementare sensibilmente la produzione e governare al meglio il processo di asciugatura;
- adeguamento dell'impianto di colatura/essiccazione ad un regime di lavoro "a ciclo chiuso" in azoto con emissioni in atmosfera nulle;
- trattamento degli effluenti gassosi con la possibilità di recupero solventi;
- monitoraggio continuo delle atmosfere di processo;
- potenziamento dei controlli sulla qualità dei componenti verdi.

In un prossimo futuro, Ansaldo Fuel Cells in collaborazione con FN ed ENEA prevede il potenziamento delle attività produttive con realizzazione di:

- forni continui di deceratura e sinterizzazione;
- forni per i trattamenti supplementari sui componenti anodici;
- un dispositivo per il taglio laser;
- realizzazione di un banco di colatura in continuo, con la possibilità di funzionamento in automatico (potenzialità previste: qualche decina di MW/anno).



Linea di produzione componenti MCFC presso FN - Capacità prevista: 1-3 MW/anno



Schema linea di produzione industriale - Capacità prevista: qualche decina di MW/anno

Celle ad ossidi solidi

Le celle ad ossidi solidi (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) operano a temperatura elevata (circa 900-1000 °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. Accanto alla cella classica a configurazione tubolare, sviluppata dalla Siemens Westinghouse, abbiamo celle di tipo planare e monolitiche.

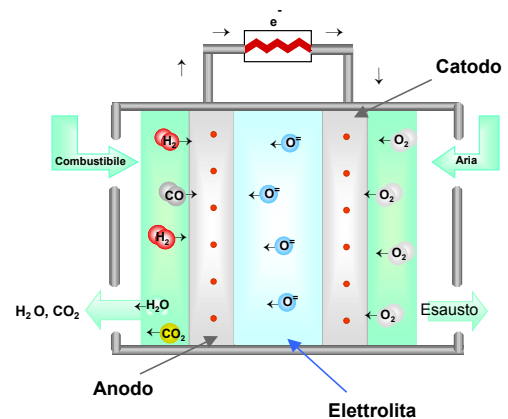
I materiali costituenti i componenti di cella, così come i requisiti richiesti a questi ultimi, sono per lo più indipendenti dalla configurazione adottata: l'elettrolita è un materiale ceramico (ossido di zirconio stabilizzato con ossido di ittrio), l'anodo è un cermet di ossido di nichel e ossido di 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 del combustibile prima di alimentare la cella, avvenendo tale fenomeno all'interno dello stack stesso. 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.

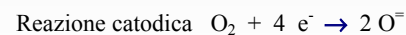
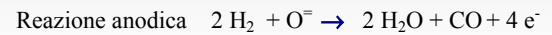
Con una temperatura di funzionamento dell'ordine dei 1000 °C il calore di scarto che le celle ad ossidi solidi mettono a disposizione può essere utilizzato nell'ambito di cicli in combinazione con turbine a gas nella configurazione denominata «ciclo combinato avanzato», per i quali l'efficienza elettrica attesa è superiore al 60%, potendo raggiungere, così come indicato dal maggior produttore di celle ad ossidi solidi, la Siemens Westinghouse, addirittura il 70%. Sistemi ad alta efficienza che combinano l'uso di 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 per i prossimi anni.

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 nel campo delle applicazioni che vanno da piccole unità per uso residenziale della potenza di 2 kW, fino agli impianti da 15-20 MW ed oltre per la produzione distribuita di energia elettrica. Celle di questo tipo vengono indicate come adatte anche per applicazioni nel settore della trazione.



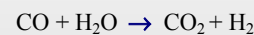
REAZIONI ELETTROCHIMICHE

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

Anodo	Cermet Ni-ZrO ₂ ; spessore ≈ 150 μm porosità 20-40 %. Processo di fabbricazione: Slurry-coat, EVD
Catodo	La(Sr)MnO ₃ ; spessore ≈ 2 mm porosità 30-40 %. Processo di fabbricazione: Estrusione/sinterizzazione
Elettrolita	ZrO ₂ (Y ₂ O ₃); spessore ≈ 30-40 μm Processo di fabbricazione: EVD
Interconnessione	La(Mg)CrO ₃ ; spessore ≈ 100 μm Processo di fabbricazione: plasma spray

Specifiche SOFC Siemens Westinghouse

I problemi che restano ancora da risolvere per questa tecnologia sono essenzialmente legati al degrado dei materiali ed al loro assemblaggio; questi problemi hanno finora impedito, tranne che per il caso Siemens Westinghouse, la realizzazione di sistemi di potenza superiore a qualche kW. Un grosso sforzo, per diminuire le sollecitazioni ai materiali si sta inoltre compiendo, cercando di abbassare la temperatura di funzionamento di queste celle dagli attuali 1000 °C a circa 700-800 °C, senza con questo provocare sensibili degrading di prestazioni, ma ancora nessuno sembra essersi riuscito con risultati soddisfacenti.

Naturalmente anche per questa tecnologia, che pure sembra poter essere realizzabile a costi accettabili, si dovrà fare un grosso sforzo verso la riduzione dei costi.

CONFIGURAZIONI DI CELLA

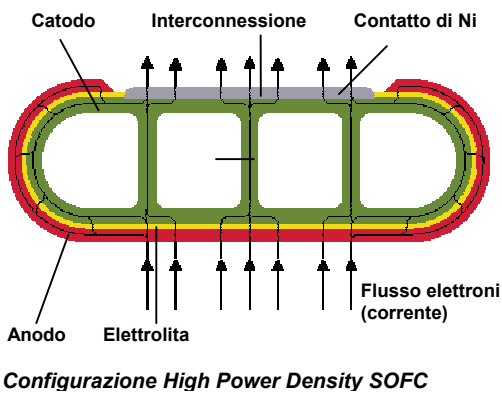
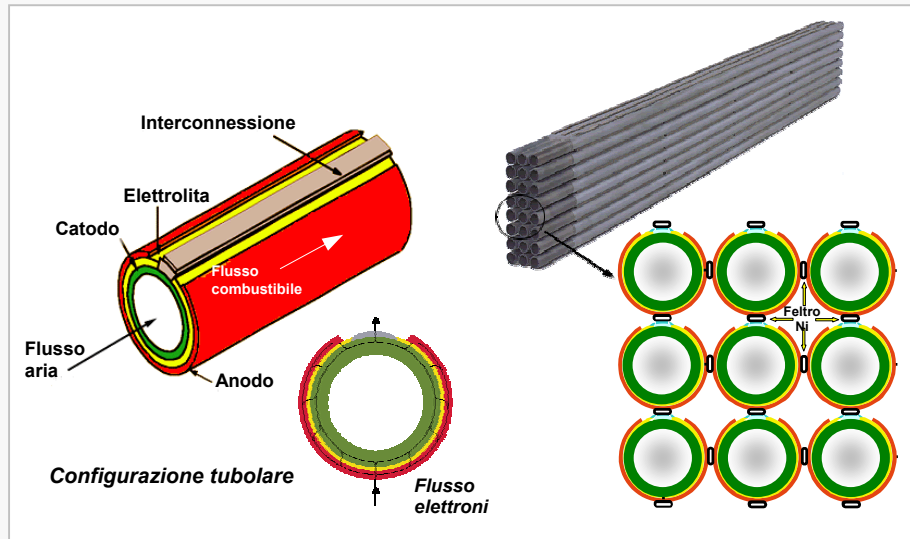
Celle tubolari

I componenti di cella (catodo, interconnessione, elettrolita ed anodo) sono in forma di film sottili (50-100 μm) depositati uno sull'altro e sinterizzati a formare la struttura tubolare, come mostrato in figura. Nelle celle Westinghouse 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.

Nello stack, le celle sono disposte in serie o in parallelo ed il contatto elettrico tra le stesse è realizzato mediante conduttori metallici (feltri di nichel).

I limiti della 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 solo per la deposizione dell'elettrolita).

La configurazione tubolare, oltre che dalla Siemens Westinghouse, viene sviluppata in Giappone dalla Mitsubishi Heavy Industries.



Siemens Westinghouse sta attualmente lavorando alla messa a punto di una nuova configurazione di cella, denominata **High Power Density SOFC**, 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 densità di potenza più alta.

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 modulo SOFC.

Confronto prestazioni configurazione tubolare e HPD SOFC

	Conf. tubolare (EDB/Elsam ¹)	HPD ₄ ²	HPD ₆	HPD ₁₂
Lunghezza cella, cm	150	50	50	50
N. celle per 10 kW	79	114	73	49
Potenza cella, W	126	88	136	205
Potenza per massa, W/kg	113	191	203	200
Potenza per volume, W/m ³	136	297	409	388

Temperatura di esercizio: 950 °C; voltaggio cella: 0,65 V

1) Impianto da 110 kW esercito da EDB/Elsam (NL)

2) Configurazioni High Power Density SOFC con differente numero di rib

Fonte: Siemens

Celle planari

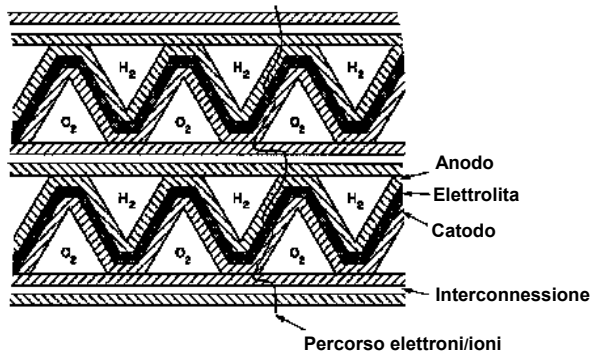
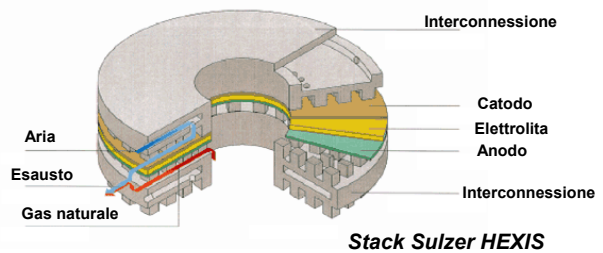
La geometria è quella tipica degli stack di celle a combustibile di altra tecnologia, anche se presenta delle varianti connesse essenzialmente al materiale (ceramico o metallico) e alla configurazione in cui vengono realizzati i piatti bipolari.

Le celle con configurazione planare sono potenzialmente molto promettenti, sia perché consentono di ottenere densità di potenza elevate (la trasmissione della corrente è più razionale che nelle altre configurazioni), sia perché sono ottenibili utilizzando diverse tecnologie di fabbricazione, alcune delle quali facilmente trasferibili su scala industriale.

Lo sviluppo di celle planari è stato finora limitato da difficoltà connesse con la produzione di componenti (soprattutto dell'elettrolita che deve essere realizzato in fogli sufficientemente grandi e sottili e al tempo stesso densi e resistenti) e la realizzazione delle tenute sia tra i diversi componenti che tra cella e cella. L'impegno notevole che molte organizzazioni stanno dedicando a questo tipo di cella dovrebbe consentire di risolvere tali problemi nel breve-medio termine.

Esistono numerose varianti della configurazione planare: si passa da configurazioni abbastanza semplici in cui i componenti di cella sono realizzati sotto forma di dischi sottili, con i canali per la distribuzione dei gas al centro (es. celle Fuji, Technology Management Inc. e Ztek), a configurazioni del tutto particolari come la HEXIS (Heat EXchanger Integrated Stack) sviluppata dalla Sulzer.

Elemento chiave di quest'ultima configurazione 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.



Celle monolitiche

Questa configurazione, che è stata proposta da Argonne National Laboratory nel 1983, consiste di strati (25-100 μm) compositi corrugati catodo/elettrolita/anodo alternati a strati piani anodo/interconnessione/catodo disposti come mostrato in figura. Il combustibile e l'ossidante sono alimentati alternativamente nei canali che si vengono a creare.

Le celle monolitiche presentano problemi legati essenzialmente alla tecnologia di fabbricazione ed all'ingegneria dello stack (tenute, realizzazione di collettori di corrente e per la distribuzione dei gas).

PROGRAMMI DI RICERCA E SVILUPPO

■ Siemens Westinghouse

La Siemens Westinghouse Power Corporation (SWPC; Orlando FL, USA), rappresenta l'attuale leader mondiale nella tecnologia delle celle ad ossidi solidi. La Westinghouse sviluppa la tecnologia cosiddetta "tubolare" da oltre 30 anni, durante i quali ha condotto diversi programmi dimostrativi per sistemi fino a 200 kW, sia nei propri laboratori, che presso utilities negli Stati Uniti e in Giappone.

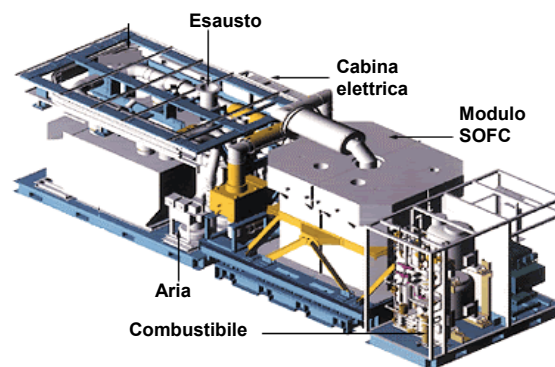
Il primo impianto di potenza significativa (100 kW) è stato installato nel dicembre 1997 in Olanda nell'ambito di una collaborazione con un consorzio di utilities olandesi e danesi (EDB/ELSAM), e con la partecipazione del Department of Energy statunitense e del NOVEM olandese.

Il sistema, che impiega gas naturale, ha operato alla NUON a Westervoort, nei pressi di Arnhem, per oltre 4000 ore nel periodo febbraio-giugno 1998, durante il quale ha generato 471 MWh di elettricità; successivamente è stato fermato per apportare alcune riparazioni allo stack.



Impianto SOFC da 100 kW EDB/ELSAM

IMPIANTO PER COGENERAZIONE EDB/ELSAM <i>Risultati della dimostrazione</i>	
Potenza elettrica	109 kW
Voltaggio (400 V AC)	254 V (DC)
Corrente	501 A (DC)
Efficienza elettrica (LHV)	46%
Potenza termica	63 kW
Emissioni:	440 kg/MWh
CO ₂	0,2 ppm
NO _x	0 ppm
CO, SO _x , VHC	
Ore di esercizio	> 16.000
Livello di rumorosità (a 7 m)	65 dBa
Degradazione voltaggio	Trascurabile



Schema impianto da 100 kW per cogenerazione

Riavviato nel marzo 1999, l'impianto ha proseguito l'esercizio totalizzando oltre 16.600 ore e dimostrando, oltre che un'efficienza elettrica del 46%, una buona affidabilità ed emissioni trascurabili.

IMPIANTI DIMOSTRATIVI SIEMENS WESTINGHOUSE

Anno	Esercente impianto	Potenza (kW)	Lungh. cella (mm)	No. celle	Ore di eserc.	MWh
1986	Tennessee Valley Authority	0,4	300	24	1760	0,5
1987	Osaka Gas	3	360	144	3012	6,1
1987	Osaka Gas	3	360	144	3683	7,4
1987	Tokyo Gas	3	360	144	4882	9,7
1992	JGU-1	20	500	576	817	10,8
1992	UTILITIES-A	20	500	576	2601	36,0
1992	UTILITIES-B1	20	500	576	1579	25,5
1992	UTILITIES-B2	20	500	576	7064	108,0
1994	SCE-1	20	500	576	6015	99,1
1995	SCE-2	27	500	576	5582	118,2
1997	JGU-2	25	500	576	13194	282,1
1997	EDB/ELSAM-1*	125	1500	1152	+ 4035	471
1997	EDB/ELSAM-2*	125	1500	1152	+ 10000	+1153
2000	SCE PSOFC/MGT	180	1500	1152	+263	+25
2001	Ontario Power Technology	250	1500	2304	-	-
2002	RWE / 300 kW ibrido	230	1500	1728	-	-
2002	Edison / 300 kW ibrido	230	1500	1728	-	-
2003	Ft. Meade / 1 MW ibrido	800	1500	5760	-	-
2003	EnBW / 1 MW ibrido	800	1500	5760	-	-
2003	Shell /separazione CO ₂	250	1500	2304	-	-

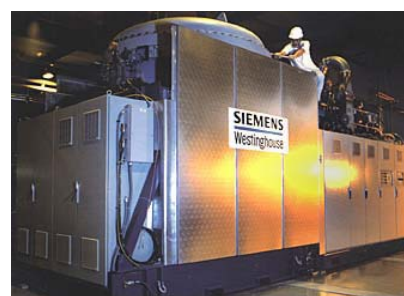
(*) Impianti che usano lo stesso sistema, ma differenti stack.

JPU = Joint Gas Utilities, consorzio Tokyo Gas /Osaka Gas
 UTILITIES = Consorzio Kansai Electric Power Co./Tokyo Gas /Osaka Gas
 SCE= Southern California Edison Co.
 EnBW= Energie Baden-Württemberg
 PSOFC/MGT= SOFC/Microturbina

+ prove in corso

La SWPC ha realizzato nel 2000 il primo **sistema ibrido SOFC/turbina a gas**. Il sistema, che consiste di un modulo SOFC pressurizzato integrato con una microturbina fornita dalla Ingersoll-Rand Energy Systems (in passato Northern Research and Engineering Corp.), ha una potenza totale di 220 kW, di cui 200 kW forniti dalla cella.

L'unità è stata consegnata nel maggio 2000 alla Southern California Edison che l'ha provata presso il National Fuel Cell Research Center dell'Università di California (Irvine, CA). L'efficienza elettrica prevista per quest'impianto "proof-of-concept" è del 55%; impianti di questa tipologia, raggiunta la maturità, saranno in grado di fornire efficienze dell'ordine del 60-70%



Sistema ibrido SOFC/MTG da 220 kW, University of California, Irvine (USA)

La SWPC sta sviluppando sistemi per cogenerazione da 250 kW che operano a pressione atmosferica e sistemi ibridi SOFC/turbina a gas da 300 kW ed 1 MW, pressurizzati.

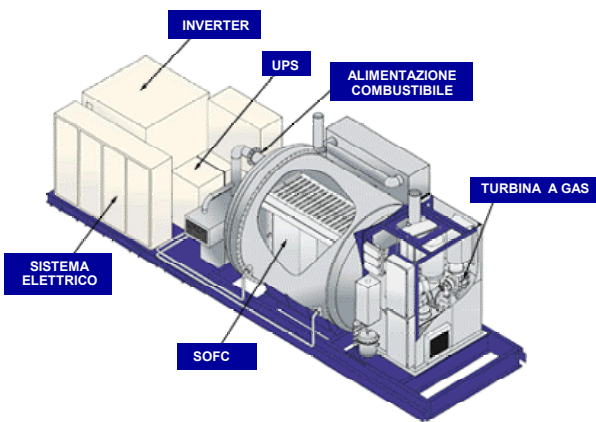
Siemens Westinghouse prevede di disporre nel 2004 di prodotti commerciali per il mercato della generazione distribuita, nell'intervallo di potenza 0,25-5 MW.

Sono attualmente in fase di realizzazione impianti di varia taglia, da provare presso diversi utenti entro il 2003.

■ **Unità SOFC per cogenerazione da 220 kW** (efficienza elettrica 45%)

Un impianto di configurazione simile a quello fornito alla EDB/ELSAM, ma di potenza doppia (220 kW), è stato consegnato alla Kinetics Inc. (Ontario Power Generation). Il progetto gode di finanziamenti da parte del Canadian Industrial Research Assistance Programme, del DoE e del DoD.

Un secondo impianto dimostrativo sarà installato presso un'azienda elettrica di North Slope Borough, in Alaska (supporto finanziario da parte del DoE e della BP Amoco).

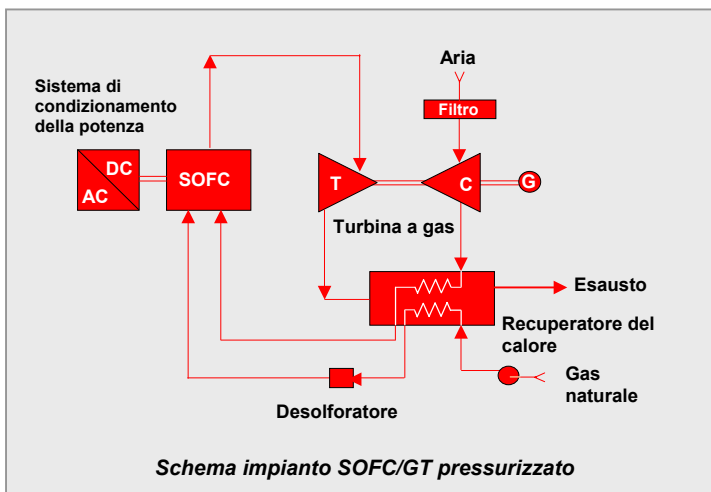


Schema impianto PSOFC/MTG da 300 kW (Siemens Westinghouse)

■ **Sistemi PSOFC/MTG da 1 MW**

Sistemi di potenza 1 MW saranno ottenuti utilizzando un modulo SOFC (800 kW) posto in un vessel pressurizzato, accoppiato con una microturbina, secondo lo schema illustrato in figura.

Impianti di questa taglia saranno collocati presso l'Environmental Protection Agency's Environmental Science Center (Maryland), nel quadro di una collaborazione con Cinergy, EPA e DoE, ed alla Energy Baden-Württemberg AG (EnBW) a Marbach, in Germania. Questo secondo sistema sarà progettato e realizzato dalla SWPC, con finanziamenti da parte della



Schema impianto SOFC/GT pressurizzato

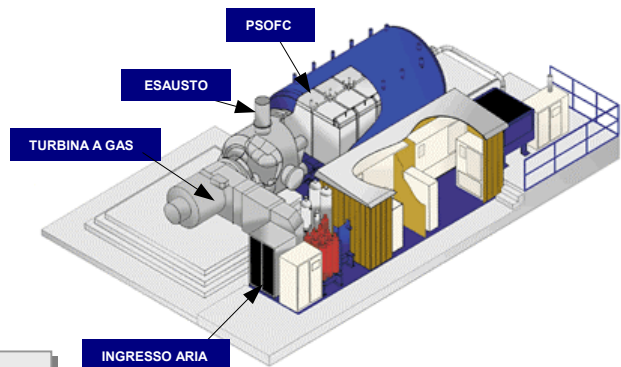
IMPIANTI IBRIDI SOFC/TG Prestazioni attese dagli impianti di Classe 300 kW e 1 MW		
	300 kW	1 MW
Efficienza elettrica (LHV)	> 55%	> 60%
Potenza SOFC (AC)	244 kW	805 kW
Potenza turbina (AC)	65 k	220 kW
Potenza totale	300 kW	1014 kW
Emissioni:		
CO ₂	< 350 kg/MWh	< 350 kg/MWh
NO _x	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm
CO	0 ppm	0 ppm
SO _x	0 ppm	0,1 ppm
particolato	0 ppm	0 ppm
Livello di rumorosità (a 5 m)	< 75 dBA	< 75 dBA

■ **Sistemi PSOFC/MTG da 300 kW**

E' prevista l'installazione in Europa di due impianti SOFC/microturbina a gas da 300 kW (di cui 220 kW forniti dall'unità SOFC). Il primo impianto, che sarà installato ad Essen in Germania, è realizzato nell'ambito di una collaborazione con un consorzio guidato dalla RWE Energy AG e di cui fanno parte Thyssengas GmbH ed ENEL Produzione. L'avvio del sistema è previsto per aprile 2002.

Il secondo impianto sarà invece installato a settembre 2002 in Italia, presso la centrale della Edison di Spinetta Marengo (Alessandria). La Edison curerà ingegneria, avviamento ed esercizio dell'impianto.

L'impianto, grazie all'abbinamento delle celle a combustibile, con la microturbina, raggiungerà un'efficienza elettrica del 58%.



Schema impianto PSOFC/MTG da 1 MW (Siemens Westinghouse)

Commissione Europea e del DoE, in collaborazione con l'EnBW, Electricity de France, Gas de France e Tiroler Wasserkraftwerke AG (Austria).

Si ricorda che la Siemens Power Generation, prima della fusione con la Westinghouse Electric, aveva in corso programmi di sviluppo di SOFC di tipo planare; questa linea di attività è stata definitivamente chiusa nel dicembre 1998.

■ Sulzer Hexis

La Sulzer Hexis (Winterthur, CH) è impegnata nello sviluppo di sistemi integrati per usi residenziali.

Nel 1997 sono state provate con successo due unità da 1 kW per usi residenziali, in collaborazione con le aziende municipalizzate di Winterthur (CH) e Dortmund (D); entrambe hanno operato con gas naturale, immettendo energia elettrica in rete.

Due anni più tardi è stata avviata una seconda fase di prove, di durata triennale, che ha portato ad installare sistemi Hexis in diversi paesi europei ed in Giappone; tranne che l'impianto installato a Basilea, gli altri operano tutti presso aziende fornitrici di elettricità o gas.

La Sulzer Hexis dichiara che la commercializzazione di questi sistemi sarà avviata nel periodo 2002-2003.



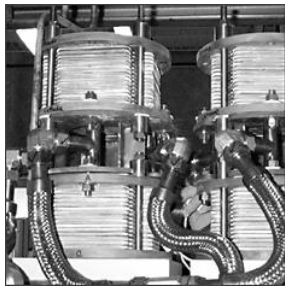
**HXS 1000 Premiere
1 kWe - Sulzer Hexis**

SISTEMI DIMOSTRATIVI SULZER HEXIS DA 1 kW		
Anno	Esercente	Località
1997	Dortmunder Energie und Wasserversorgung GmbH	Dortmund, D
1997	Azienda Municipalizzata di Winterthur	Winterthur, CH
1998	Office for Energy and Technical Installations	Basilea, CH
1998	EWE AG	Oldenburg, D
1998	Thyssengas GmbH	Duisburg, D
1998	Tokyo Gas Co. Ltd.	Tokyo, J
1999	Sociedad de Gas de Euskadi, SA	Bilbao, E
2000	NV Nederlandse Gasunie	Groningen, NL

■ Global Thermolectric

La Global Thermolectric (Calgary, Canada) sviluppa celle planari, in cui a differenza di quanto avviene nelle celle di tipo tradizionale, è l'anodo a fungere da supporto per gli altri componenti attivi di cella.

La cella è basata su una configurazione messa a punto presso i laboratori del Centro Ricerche di Jülich, in Germania.



**Unità da 1 kW
(Global Thermolectric)**

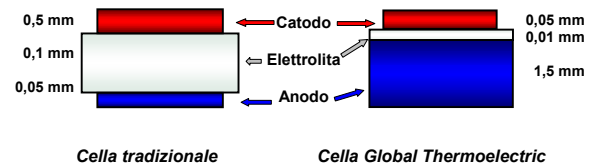
Il programma della Global è rivolto allo sviluppo di prodotti per applicazioni residenziali di potenza 1-25 kW, alimentati a gas naturale. La Enbridge Inc., la maggiore società distributrice di gas canadese, ha investito 25 milioni di dollari per assistere le attività di sviluppo della Global.

Nel 2000 è stato realizzato e provato un primo sistema, costituito da 4 stack da 15 celle, che ha fornito 1,35 kW e che ha operato per oltre 1150 ore.

Recentemente (gennaio 2002) è stato siglato un memorandum d'intesa con la Bonneville Power Administration (Portland, Oregon, USA) per l'acquisto (costo circa 240.000 \$) di tre unità di potenza 2-5 kW da alimentare a gas naturale o propano. L'inizio delle prove è previsto nel 2003.

Va ricordato che la Global Thermolectric ha in corso una collaborazione con la Delphi Automotive Systems che sviluppa sistemi per autotrazione. La Delphi sta utilizzando stack (3-5 kW) della

Global per realizzare sistemi APU (auxiliary power unit) a benzina.



■ Ztek

La Ztek sviluppa stack con celle in configurazione planare, per applicazioni nel settore della generazione di potenza distribuita, all'interno di un programma di collaborazione con l'Electric Power Research Institute (EPRI) e la Tennessee Valley Authority (TVA).

Completato lo sviluppo di stack da 1 kW, la Ztek ha sperimentato, a Huntsville, in Alabama (USA), un'unità di potenza 25 kW, realizzata per la TVA. Tali unità costituiranno i moduli base di impianti ibridi SOFC/GT da 250 kW che la Ztek ha in programma di realizzare.

■ Technology Management Inc.

La Technology Management Inc. (TMI) dal 1991 è impegnata in un programma per la realizzazione di generatori portatili con celle SOFC di tipo planare, per applicazioni militari e civili. Questo programma riceve supporto dal Dipartimento della Difesa statunitense attraverso la Defence Advanced Research Project Agency (DARPA) e l'Army Research Office.

TMI sta realizzando unità portatili da 500 W, con gasolio come combustibile, progettate per rispondere ai requisiti richiesti dalla DARPA.

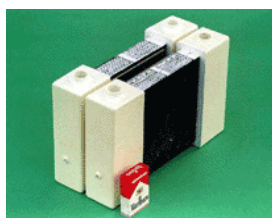
■ SOFCo

La SOFCo, gruppo costituito dalla Ceramatec e dalla McDermott International Inc., ha in corso programmi di sviluppo di SOFC di tipo planare. Sono stati già realizzati e provati sistemi di potenza 1-4 kW che operano con gas naturale, in cui stack e reformer sono integrati in un unico modulo.

All'interno di un programma finanziato dalla Defence Advanced Research Project Agency e gestito dall'US Army Research Office, la SOFCo sta sviluppando generatori da 10-50 kW in grado di operare con combustibili di facile trasporto e stoccaggio, compatibili con usi militari (es. gasolio, JP-8).

■ **Mitsubishi Heavy Industries**

La MHI è l'unica società che sviluppa SOFC in configurazione tubolare, oltre la Siemens Westinghouse. La tecnologia di cella e dello stack è stata messa a punto tra il 1986 ed il 1989 in collaborazione con la Tokyo Electric Power Co. (TEPCO), sono stati quindi sviluppati moduli di varia potenza. Nel corso del 1998, in collaborazione con la Electric Power Development Co. (EPDC) è stata avviata la dimostrazione di un modulo da 10 kW pressurizzato, presso il Coal Utilization Research Center della EPDC, a Wakamatsu (Giappone).



SOFC MOLB

Presso la Mitsubishi Heavy Industries è attivo anche un progetto di sviluppo di SOFC planari, che vede la partecipazione della Chubu Electric Power Co. MHI propone celle di tipo MOLB (Mono-block Layer Built), in cui l'anodo, di spessore maggiore, funge da supporto.

Utilizzando questa tecnologia sono stati realizzati moduli di potenza 5 kW e 10 kW; l'obiettivo è quello di giungere a breve termine ad unità da 25 kW (celle 200x200 mm).

■ **Ceramic Fuel Cells Ltd**

In Australia, la Ceramic Fuel Cells Ltd (CFCL) sta sviluppando sistemi di piccola-media taglia (25-400 kW) per il mercato residenziale e commerciale.

Le prime prove dimostrative sono programmate al 2003.

■ **Fuel Cell Technologies Ltd**



FCT (Canada) sta sviluppando moduli di taglia 5 kW per usi residenziali ed applicazioni remote. Sistemi di questo tipo, in grado di fornire efficienze pari all'80%, in cogenerazione, dovrebbero essere disponibili sul mercato dalla fine del 2002.

**Sistema SOFC da 5 kW
(Fuel Cell Technologies)**

Fra i soggetti europei coinvolti in attività di ricerca e sviluppo sulle celle ad ossidi solidi ricordiamo **ETH-Zurich** (CH), **Forschungszentrum Julich** (D), **Cambridge University** (UK), **Keele University** (UK), **Lund Institute of Technology** (S), **Riso National Laboratory** (DK), **ECN** (NL) e **Statoil** (N), che operano o hanno operato con il supporto dell'Unione Europea.

In Italia attività su celle di tipo planare sono state condotte presso **Enitecnologie** e il **CNR-ITAE**, con coinvolgimento minimo di ENEA e di altre strutture di ricerca. Le azioni svolte hanno riguardato principalmente la messa a punto di materiali e di processi di produzione su piccola scala dei componenti (100x100 mm²), con la realizzazione di celle da laboratorio.

Celle alcaline

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 (ad esempio celle ad acido fosforico), le AFC 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.

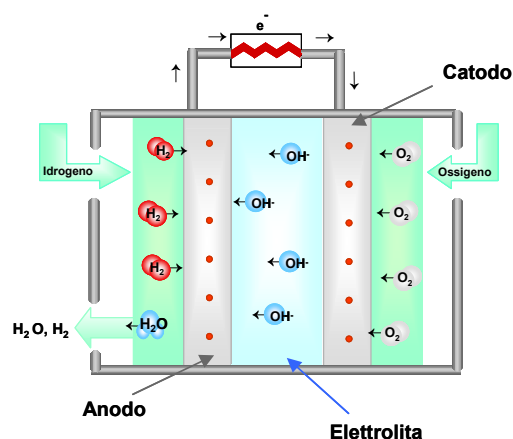
La principale limitazione delle AFC è la bassa tolleranza alle impurezze presenti nei gas reagenti; gli ioni OH⁻ reagiscono con i composti del carbonio, anche se presenti in tracce, rendendo problematico l'uso di gas di sintesi ottenuti con processi di reforming e della stessa aria, che normalmente presenta un contenuto di CO₂ 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 celle alcaline per impianti di generazione di potenza stazionaria.

Pur avendo raggiunto un buon grado di maturità tecnologica, le attività in questo settore sono 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 impiegata con successo in molti programmi della NASA (Apollo e Shuttle) fin dagli anni '60.

Negli ultimi anni le attività di ricerca nel campo delle AFC sono state svolte principalmente da aziende europee: molto attiva in questo campo è stata fino allo scorso anno la società britannica **ZeTek Power**; in passato attività di un certo rilievo sono state svolte dalla ELENCO (B) e dalla Siemens (D).

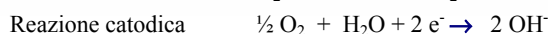
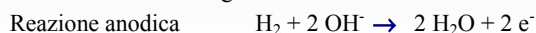
Quest'ultima, nella seconda metà degli anni '80, aveva sviluppato stack di potenza 16 kW e costruito, nell'ambito di una collaborazione con il Ministero della Difesa tedesco, una unità da 100 kW destinata ad alimentare un sommergibile. Le attività Siemens in questo settore si sono chiuse nel 1992, a seguito della decisione di proseguire questo tipo di attività con celle di diversa tipologia (celle ed elettrolita polimerico).

La **ZeVco** (Zero Emission Vehicle Company Ltd), divisione della ZeTek Power, ha concluso le sue attività a fine 2001 per mancanza di finanziamenti. Stack ZeVco erano stati sperimentati su diverse tipologie di veicoli. Nel 1998, in collaborazione con la London Taxi International, era stato realizzato un prototipo di taxi ibrido che forniva prestazioni e autonomia in linea con i modelli alimentati con motore diesel in servizio a Londra. Sul veicolo era montato uno stack da 5 kW, mentre la potenza totale del sistema era di 63 kW.



REAZIONI ELETTROCHIMICHE

Le reazioni che avvengono in una cella alcalina sono:



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, CO₂) che interagiscono con l'elettrolita.

MATERIALI DEI COMPONENTI DI CELLA

Elettrodi	Nichel, argento, metalli nobili
Elettrolita	Soluzione di idrossido di potassio al 30-45% _p (circolante nella cella o su matrice di asbesto)
Materiali di costruzione	Grafite, materie plastiche



Taxi ZeVco (1998)

La ZeVco per la cella riporta un costo di 1000 \$/kW. La società stava lavorando per sviluppare catalizzatori che non facessero uso di metalli nobili, e che fossero più efficienti e meno costosi di quelli attualmente impiegati. Le prime prove effettuate su questi materiali avevano dimostrato che è possibile ottenere un notevole incremento della densità di potenza (fino al 400%) ed una riduzione dei costi di produzione dell'ordine del 75%.

Nel dicembre '99 la ZeVco aveva consegnato al Westminster City Council un veicolo ibrido celle/batterie alimentato ad idrogeno da utilizzare nel servizio di manutenzione dei parchi e delle aree verdi del centro di Londra.

Il veicolo, per il quale era stato riportato un costo di 52.800 \$, è il risultato della collaborazione della ZeVco con la Air Products & Chemical (fornitura idrogeno) e la Shell Hydrogen. Il prototipo era stato realizzato con finanziamenti governativi all'interno dell'Energy Savings Trust Powershift Programme.

Van ZeVco

Veicolo ibrido
Potenza: 63 kW_e
Potenza celle: 5 kW
Combustibile: H₂ compresso
Autonomia: 250-300 km
Velocità max: 100 km/h.



Altre divisioni della Zetek Power, la **ZeGen** e la **ZeMar**, si stavano invece occupando rispettivamente dello sviluppo di sistemi per usi residenziali e commerciali per potenze comprese tra 2,5 e 250 kW e di unità per la propulsione di battelli.

La tecnologia di cella utilizzata nei prototipi ZeTek era quella acquisita dalla ELENCO, società belga rilevata nel 1994. La ELENCO nella prima metà degli anni '90 aveva preso parte al progetto EUREKA finalizzato alla realizzazione di un autobus ibrido celle alcaline/ batterie, alimentato ad idrogeno.

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 la generazione di potenza a bordo di veicoli e 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 utilizzata, oltre che come combustibile, come refrigerante liquido per lo stack. Da non trascurare il fatto che lo stoccaggio del metanolo è senz'altro più semplice di quello dell'idrogeno.

Le celle a metanolo diretto presentano una configurazione molto simile a quella delle celle ad elettrolita polimerico, dal momento che entrambe usano una membrana polimerica come elettrolita ed elettrodi porosi con catalizzatore a base di platino o sue leghe.

Le attuali celle fanno registrare un'efficienza elettrica dell'ordine del 35% ed una densità di potenza ancora bassa (180-250 mW/cm², valori inferiori a quelli delle PEMFC, 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.

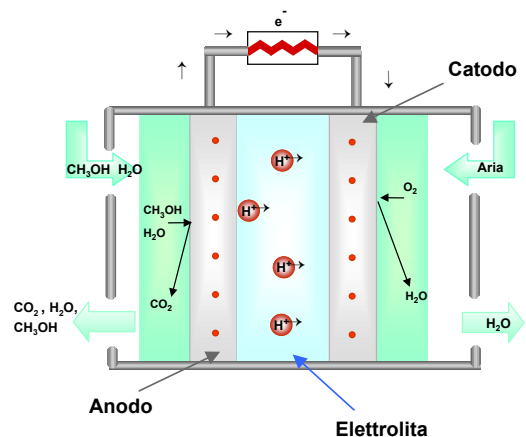
La tecnologia DMFC è ancora allo stadio di ricerca di laboratorio e per una sua applicazione pratica restano da risolvere una serie di problemi. Questi sono essenzialmente legati ad una reattività elettrochimica del metanolo non abbastanza elevata, che limita la densità di potenza, ed al fatto che si registrano effetti di trasporto del combustibile attraverso la membrana che provocano una degradazione delle prestazioni di cella.

I progressi compiuti negli ultimi anni ed il crescente interesse per applicazioni nel trasporto, stanno facendo crescere in modo significativo le attività di ricerca e sviluppo sulle DMFC, considerate le potenzialità della tecnologia tutte le maggiori case automobilistiche stanno oggi finanziando programmi di ricerca in questo settore.

Molti laboratori ed organizzazioni di ricerca negli Stati Uniti, Europa e Giappone hanno in corso attività sulle DMFC, la letteratura disponibile sull'argomento è tuttavia ancora limitata.

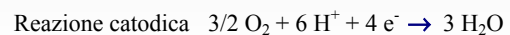
La maggior parte delle attività in corso sono orientate:

- 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 "cross-over";
- allo sviluppo di nuovi catalizzatori per l'ossidazione elettrochimica del metanolo;
- all'ottimizzazione dei componenti elettrodici e dell'assemblato membrana/elettrodi.



REAZIONI ELETTROCHIMICHE

Le reazioni che avvengono in una cella a metanolo diretto sono:

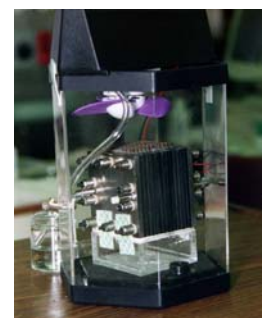


Metanolo ed acqua reagiscono nella camera anodica della cella per produrre anidride carbonica e ioni idrogeno, questi ultimi diffondono quindi nel comparto catodico dove reagiscono con l'ossigeno per produrre acqua.

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	
Membrana	Membrane perfluorosolfoniche
Anodo	Elettrodi di carbone con catalizzatore a base di Pt/Ru (2-4 mg/cm ²)
Catodo	Elettrodi di carbone con catalizzatore a base di Pt (2-4 mg/cm ²)
Piatti bipolari	Grafite

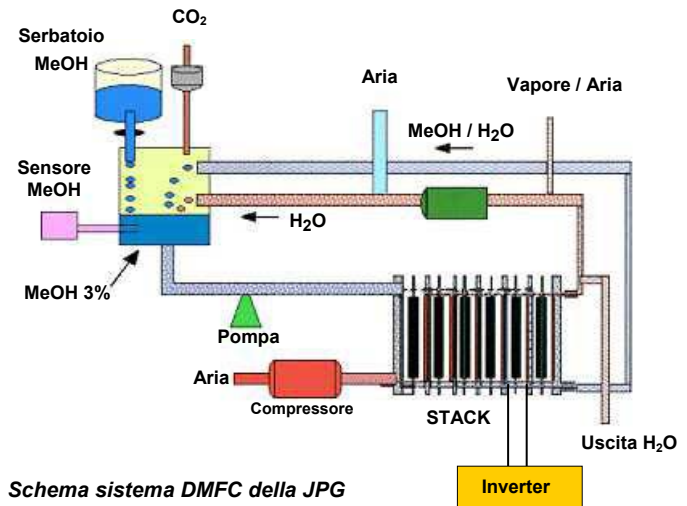
Negli Stati Uniti, **Jet Propulsion Laboratory (JPL)** e **Los Alamos National Laboratory (LANL)**, stanno lavorando con finanziamenti del Defence Advanced Research Project Agency allo sviluppo di generatori portatili da utilizzare per applicazioni isolate.



Stack DMFC - JPL

La JPL, in collaborazione con la University of Southern California) e la Giner Inc., sviluppa DMFC dal 1991. JPL ha brevettato con USC e Loker Hydrocarbons Institute una tecnologia di cella che opera utilizzando una soluzione acquosa di metanolo al 3%. E' stata completata la progettazione di unità da 10 W, 40 W, 150 W e 1 kW ed è in corso la realizzazione del prototipo da 150 W.

Una licenza per l'uso della tecnologia è stata concessa alla **DTI Energy Inc.**, orientata a sviluppare unità di potenza fino a 5 kW per sistemi ibridi per usi veicolari. Prestazioni paragonabili a quelle della JPL sono state ottenute da **LANL** (Los Alamos National Laboratories), che oltre ai sistemi di piccola taglia per usi civili e militari, sta sviluppando materiali (nuovi catalizzatori anodici in collaborazione con Symyx Technologies) e componenti per unità destinate al trasporto, nel quadro dei programmi del Department of Energy.



Schema sistema DMFC della JPG



Stack DMFC 80 W
(30 celle, 45 cm²) - LANL

LANL, in collaborazione con la Motorola, sviluppa inoltre piccole unità da utilizzare per elettronica di consumo (computer portatili, telefoni cellulari).

Come la Motorola, stanno lavorando allo sviluppo di unità DMFC per elettronica di consumo compagnie come la **NEC** e la **Sony** in Giappone e la **Smart Fuel Cell GmbH (SFC)** in Germania.

La NEC, in collaborazione con la Japan Science and Technology Corp., ha sviluppato una microcella a metanolo



Microcella NEC

diretto che utilizza nanotubi di carbonio, come materiale di supporto per gli elettrodi. L'entrata sul mercato di queste microcelle è prevista entro cinque anni a costi che saranno competitivi con quelli delle batterie al litio.

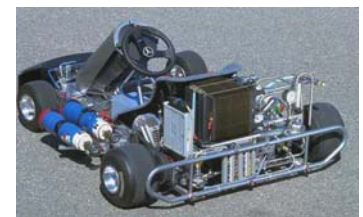


Unità da 25 W -
Smart Fuel Cells

La Smart Fuel Cell dichiara che la sua tecnologia consente già oggi di ottenere capacità 3-5 superiori a quella di una batteria tradizionale ed ha annunciato (30 gennaio 2002) di aver avviato un impianto pilota per produzione di serie di questi sistemi; la capacità produttiva per l'anno 2002 sarà pari a 1000 unità.

Ballard Power Systems, in collaborazione con la **DaimlerChrysler**, ha avviato lo sviluppo di unità DMFC da utilizzare in applicazioni isolate e nel trasporto, dopo aver acquisito nel 1999 una licenza non esclusiva dal California Institute Technology e dalla University of Southern California.

E' stata quindi costruita un'unità da 3 kW che è stata impiegata per realizzare un piccolo veicolo dimostrativo, presentato nel novembre 2000.



Veicolo prototipo
DaimlerChrysler/Ballard
alimentato con DMFC da 3 kW

In Italia lo sviluppo delle DMFC è stato finora condotto esclusivamente dal **CNR-ITAE** di Messina.

L'Istituto TAE del CNR lavora allo sviluppo sia di catalizzatori che di membrane. Relativamente a queste ultime, il lavoro del TAE ha riguardato lo sviluppo di una membrana composita (organica-inorganica), che utilizza una matrice perfluorosulfonica in forma ionomerica, in grado di conferire elevati valori di conducibilità protonica, in combinazione con composti inorganici, ad alta area superficiale (SiO_2 , TiO_2), che facilita la ritenzione di acqua a temperature superiori a 100 °C.

Nel settore dei catalizzatori, l'indagine è stata invece principalmente rivolta all'ottimizzazione morfologica, strutturale ed elettronica dei sistemi ternari. In particolare sono state prodotte leghe metalliche di platino, supportate e non supportate. Sono stati ottenuti significativi incrementi nella cinetica della reazione anodica attraverso l'estensione dell'interfaccia catalizzatore-elettrolita realizzata mediante l'inclusione di micelle di ionomero nella struttura elettrodica.

Il complesso delle attività effettuate ha permesso di operare a temperature prossime a 150 °C, in presenza di metanolo ed etanolo, con temperature di umidificazione non superiori a 80 °C. In termini di potenza erogata, sono stati raggiunti valori di 260 mWcm⁻² a 0,4 V.

All'interno del progetto NEMECCEL, finanziato dalla Unione Europea, il CNR-ITAE sta collaborando con SRTI-Thomson, PSA (Francia), Nuvera Fuel Cells Europe (Italia) e Solvay (Belgio), allo sviluppo di uno stack da 1 kW.

ACRONIMI

ADL	Arthur D. Little
AEM	Azienda Energetica Municipale di Milano
AFC	Alkaline Fuel Cell
AFCo	Ansaldo Fuel Cells
AIST	Agency of Industrial Science and Technology
BCN	Brandstofcell Nederland
BPS	Ballard Power Systems
CAPRI	Car Autothermal Process Reactor Initiative
CNR-ITAE	Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Trasformazione e Accumulo dell'Energia
CTA	Chicago Transit Authority
DARPA	Defence Advanced Research Project Agency
DFC	Direct Fuel Cell
DIR	Direct Internal Reforming
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DOE	Department of Energy
ECN	Netherlands Energy Research Foundation
EDF-GDF	Electricite de France/Gaz de France
EnBw	Energie Baden-Württemberg Regional
EPA	Environmental Protection Agency
EPRI	Electric Power Research Institute
ERRI	European Rail Research Institute
FCCG	Fuel Cell Commercialisation Group
FCE	FuelCell Energy
FEVER	Fuel Cell Electric Vehicle of Extended Range
GE	General Electric
GT	Turbina a gas
IFC	International Fuel Cells
IHI	Ishikawajima-Harima Heavy Industries
IIR	Indirect Internal Reforming
JPU	Joint Gas Utilities (ConsorzioTokyo Gas e Osaka Gas)
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MCI	Motore a combustione interna
MELCO	Mitsubishi Electric Corp.
MEPOX	Methane Partial Oxidation
MHI	Mitsubishi Heavy Industries
MICA	Ministero dell'Industria, Commercio ed Artigianato
MITI	Ministry of International Trade and Industry (J)
NECAR	New Electric Car
NEBUS	New Electric Bus
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
NFCE	Nuvera Fuel Cells Europe
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PCI	Potere calorifico inferiore
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell
PNGV	Partnership for a New Generation of Vehicles
POX	Partial Oxidation
PTFE	Politetrafluoroetilene
SCAQMD	South Coast Air Quality Management District (California, USA)
SCE	Southern California Edison Co.
SCENIC	Sistema Cella ENEA Nuvera a Idrogeno Combustibile
SEABO	Società Energia Ambiente Bologna
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SWPC	Siemens Westinghouse Power Corp.

TEPCO	Tokyo Electric Power Co.
TMI	Technology Management Inc.
TVA	Tennessee Valley Authority
USACERL	US Army Construction Engineering Research Laboratory

SIMBOLI

ΔE	differenza di potenziale
ΔG	energia libera di Gibbs
ΔH	entalpia di reazione
ΔH_c	calore disponibile dal combustibile
ΔS	entropia di reazione
b	pendenza di Tafel
C_b	concentrazione di bulk
C_s	concentrazione sulla superficie dell'elettrodo
D	coefficiente di diffusione
e-	elettrone
E_{rev}	potenziale reversibile di cella
E°	potenziale standard
F	costante di Faraday
h	ora
I	corrente
i	densità di corrente
i_L	densità di corrente limite
i_0	densità di corrente di scambio
K	costante di equilibrio
kW	kilowatt
mol	mole
MW	megawatt
MWh	megawatt-ora
n	numero di elettroni partecipanti alla reazione
P	pressione
ppm	parti per milione
Q	calore
R	resistenza di cella
R	costante universale dei gas
T	temperatura
U	utilizzazione
V	tensione di cella
V	volume
α	coefficiente di trasferimento di carica
δ	spessore dello strato di diffusione
ϵ_T	rendimento termodinamico
ϵ_v	rendimento di tensione
ϵ_i	rendimento di corrente
ϵ_{cella}	rendimento di cella
η_{att}	polarizzazione di attivazione
η_{conc}	polarizzazione di concentrazione
η_{ohm}	polarizzazione ohmica

RIFERIMENTI

- A.J. Appleby, F.R. Foulkes, *Fuel Cell Handbook*, Van Norstand Reinhold, New York, N.Y., 1989.
- S.S. Penner et al, *Commercialization of Fuel Cells*, Energy Volume 20 n. 5, 1995.
- K. Kordesch, G. Simander, *Fuel Cells and Their Applications*, VCH Publishers, New York, N.Y., 1996.
- *Fuel Cell Handbook* (5^a edizione), U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory (NETL), ottobre 2000.
- Proceedings del 5th Grove Fuel Cell Symposium, London, UK, settembre 1997, *Journal of Power Sources*, 71 (1998).
- Proceedings del 7th Grove Fuel Cell Symposium, London, UK, 11-12 settembre 2001.
- F.M. Escombe, S. Glaser, Escoval Consultancy Services "Analysis of the prospects for fuel cell application", rapporto preparato per ENEA, Maggio 1998.
- ENEA, Rapporto Energia e Ambiente 2001.
- Proceeding del 4th European Solid Oxide Fuel Cell Forum, Lucerna, Svizzera, 10-14 luglio 2000, ed. Augustin McEvoy.
- Proceeding della Conferenza Internazionale "Fuel Cell 2000", Lucerna, Svizzera, 10-14 luglio 2000, ed. Leo Blomen.
- F. R. Kalhammer, P.R. Prokopius, V. P. Roan, G. E. Voecks, *Status and prospects of fuel cells as automobile engines*, rapporto preparato per State of California Air Resources Board, Sacramento, California, luglio 1998.
- "Looking Beyond the Internal Combustion Engine. The promise of methanol fuel cell vehicles", Rapporto preparato per American Methanol Institute, Washington DC (US), 2000.
- Proceeding del Fuel Cell Seminar, Portland, Oregon, USA, 30 ottobre-2 novembre 2000.
- Proceeding della "Fuel Cell Vehicle Technology Conference", Università di California, Davis (USA), 30-31 marzo 1999.
- G.Friedlmeir, J. Friedrich, F. Panik, W. Weiss, First Experiences with Fuel Cell demonstration Vehicles, IEA, Implementing Agreement 02 "Fuel cell systems for transportation"; Annex X- Final report 1997-1999, Ed. Forschungszentrum Jülich, 2000.
- Northeast Advanced Vehicle Consortium (NAVC), Future Wheels, Interviews with 44 Global Experts On the Future of Fuel Cells for Transportation and Fuel Cell Infrastructure and a Fuel Cell Primer, Boston, MA, 1 novembre, 2000.
- U.S. Fuel Cell Council, Fuel Cell Power For Vehicle, Report Spring 2001.
- 2000 Annual Progress Report "Trasportation Fuel Cell Power Systems", US Department of Energy /Office of Transportation Technologies, ottobre 2000.
- Rapporto interno ENEA "Sistemi di accumulo di idrogeno in leghe metalliche per veicoli a celle a combustibile", luglio 2001.
- M. Conte, A. Iacobazzi, M. Ronchetti, R. Vellone, *J. Power Sources*, 100 (2001) 171.
- A.C. Dillon, K.M. Jones, T.A. Bekkedahl, C.H. Kiang, C.H. Bethune, M. J. Heben, *Nature*, 386, 377 (1997)
- Y. Ye, C.C. Ahn, C. C. Witham, B. Fultz, J. Liu, A.G. Rinzler, D. Colbert, K.A. Smith, R.E. Smalley, *Appl. Phys. Lett.*, 74 2307 (1999).
- P. Chen, X. Wu, J. Lin, K.L. Tan, *Science*, 285, 91(1999).
- A. Chambers, C. Park, R.T.K. Baker, N.M. Rodriguez, *J. Phys. Chem. B.* 102, 4253 (1998).
- Y.Y. Fan, B. Liao, M. Liu, Y.L. Wei, M.Q.Lu, H.M. Cheng, *Carbon*, 37, 1649 (1999).
- N. F. Bessette, B. P. Borglum, H. Schichl, D. S. Schmidt, "Siemens SOFC Technology on the Way to Economic Competitiveness", Siemens Power Journal 1/2001.

Siti Web consultati

- | | |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. DOE National Energy Technology Laboratory | www.netl.doe.gov |
| 2. DOE Transportation Technologies | www.ott.doe.gov |
| 3. California Hydrogen Business Council | www.ch2bc.org/indexh.htm |
| 4. Department of Defense | www.dodfuelcell.com |
| 5. European Fuel Cell Group | www.fuelcell-eur.nl |
| 6. Fuel Cell 2000 | www.fuelcells.org |
| 7. AMI Fuel Cell Vehicles | www.methanol.org/fuelcell/index.html |
| 8. Fuel Cell World | www.fuelcellworld.org |
| 9. USCAR | www.uscar.org |
| 10. Partnership for a New Generation of Vehicles | www.ta.doc.gov/pngv |
| 11. Electric Power Research Institute | www.epri.com |

12. Gas Research Institute	www.gri.org
13. Agency of Industrial Science and Technology	www.aist.go.jp
14. NEDO	www.nedo.go.jp/nedo-info
15. Ballard Power Systems	www.ballard.com
16. DaimlerChrysler	www.daimlerchrysler.de
17. Mercedes Benz	www.mercedes-benz.com/e/innovation/fmobil/fuelcell/default.htm
18. Energy Partners	www.energypartners.or
19. General Motors	www.gm.com
20. GEMicroGen	www.gepower/distributed_power.html
21. Fuel Cell Energy	www.fce.com
22. H-Power, Inc.	www.hpower.com
23. Nuvera Fuel Cells	www.nuvera.com
24. Idatech	www.idatech.com
25. Methanex	www.methanex.com
26. HbT	www.hbti.net
27. Plug Power	www.plugpower.com
28. Vaillant	www.vaillant.de
29. Siemens AG	www.siemens.de
30. MTU	www.mtu-friedrichshafen.com/
31. Hydrogen & Fuel Cell Letter	www.hfcletter.com
32. HyWeb Hydrogen and Fuel Cell Information System	www.hyweb.de
33. UTC Fuel Cells	www.utcfuelcells.com
34. California Air Resources Board	www.arb.ca.gov
35. California Fuel Cell Partnership	www.drivingthefuture.org
36. Ford General Motors	www.media.ford.com
37. Opel	www.opel.mobil.com
38. Honda Motor Co.	www.world.honda.com
39. Toyota	www.toyota.com
40. Mazda	www.mazda.com
41. Daihatsu	www.ingway.co.jp/~daihatsu
42. Nissan	www.nissan-global.com/EN/HOME
43. PSA Peugeot	www.psa.fr
44. Georgetown University	www.fuelcellbus.georgetown.edu
45. Progetto Idrogeno Aeroporto di Monaco	www.hydrogen.org/hemuc/introe.html
46. Progetto FC Bus MAN	www.fuelcellbus.com
47. CALSTART Advanced Transportation Website	www.calstart.org
48. Sulzer Hexis	www.hexis.ch
49. Global Thermoelectric	www.globalte.com
50. Ztek	www.ztekcorp.com
51. Ceramic Fuel Cell	www.cfcl.com.au
52. Smart Fuel Cell	www.smartfuelcell.de
53. Ansaldo Fuel Cells	www.ansaldofuelcells.it
54. Aem	www.aem.it
55. CNR-ITAE	www.itae.me.cnr.it
56. ENEA	www.enea.it
57. Roen Est	www.roenest.com

Le fotografie degli impianti di generazione di potenza stazionaria e dei veicoli con celle a combustibile riportate nel documento alle pagg. 26, 29 e 56-57 ed alla pag. 33 sono state concesse gentilmente dall'UTC Fuel Cells e dalla Ford Motor Co..

Le altre foto riprodotte nel documento appartengono alle società ed istituzioni sotto elencate e sono state tratte dai loro siti web.

Ballard Power Systems: p. 23, 29, 37-38. DaimlerChrysler: p. 30-31. Daihatsu: p. 35. FuelCell Energy: p. 62-63. GE MicroGen: p. 24. General Motors: p. 27, 32. Global Thermoelectric: p. 76. Hydrogen Burner Technology: p. 43. H Power: p. 26. Honda: p. 33. HyWeb: p. 35-36, 38, 78-79. Idatech: p. 25. J. Matthey: p. 45. Jet Propulsion Laboratory: p. 80. Los Alamos National Laboratory: p. 81. Mazda: p. 34. MTU: p. 65. Neoplan: p. 37. Nissan: p. 35. Opel: p. 32. Sanyo: p. 26. Siemens: p. 36, 73-75. Smart Fuel Cell: p. 81. Sulzer Hexis: p. 73, 76. Toyota: p. 34. Vaillant: p. 24.

Organizzazioni impegnate in programmi di R&S sulle celle a combustibile in Italia

AEM

Corso Porta Vittoria, 4
20122 Milano

CESI

Via Reggio Emilia, 39
20090 Segrate (Milano)

Ansaldo Fuel Cells SpA

Corso Perrone, 25
16161 Genova

FN Tecnologie e Servizi Energetici Avanzati

SS 35bis dei Giovi, km 15
15062 Bosco Marengo

CNR-ITAE

Via Salita S. Lucia sopra Contesse, 5
98126 Messina

Politecnico di Milano

Dipartimento di Chimica Industriale ed Ingegneria
Chimica
P. le Leonardo da Vinci, 32
001333 Milano

Centro Ricerche FIAT

Strada Torino, 50
20143 Orbassano

Università di Genova

Istituti di Ingegneria Chimica e di Processo
Via Opera Pia, 15
16145 Genova

Nuvera Fuel Cells Europe Srl

Via Bistolfi, 35
20134 Milano

Università di Roma

Dipartimento di Chimica
P.le Aldo Moro, 5
00185 Roma

ENEA

Centro Ricerche Casaccia
Via Anguillarese, 301
00060 S. Maria di Galeria (Roma)

Roen Est

Via Ercolana, 670
40059 Medicina (BO)

Informazioni e copie del rapporto possono essere ottenute contattando:

Dott.ssa Marina Ronchetti
ENEA, Grande Progetto Idrogeno e Celle a Combustibile
Tel. 06 30486447
Fax. 06 30486306
e-mail: ronchetti@casaccia.enea.it

Ing. Agostino Iacobazzi
ENEA, Grande Progetto Idrogeno e Celle a Combustibile
Tel. 06 30483790
Fax. 06 30486306
e-mail: iacobazzi@casaccia.enea.it

Edito dall'ENEA
Funzione Centrale Relazioni Esterne
Lungotevere Thaon di Revel, 76 – 00196 Roma
www.enea.it

Edizione del volume a cura di Giuliano Ghisu e Mauro Ciamarra

Copertina: Cristina Lanari

Stampa: Grafiche Ponticelli SpA

Finito di stampare nel mese di aprile 2002