

Dispense del Corso di

## **Fonti Rinnovabili dell'Energia**

n. 2

# **La tecnologia delle celle a combustibile**

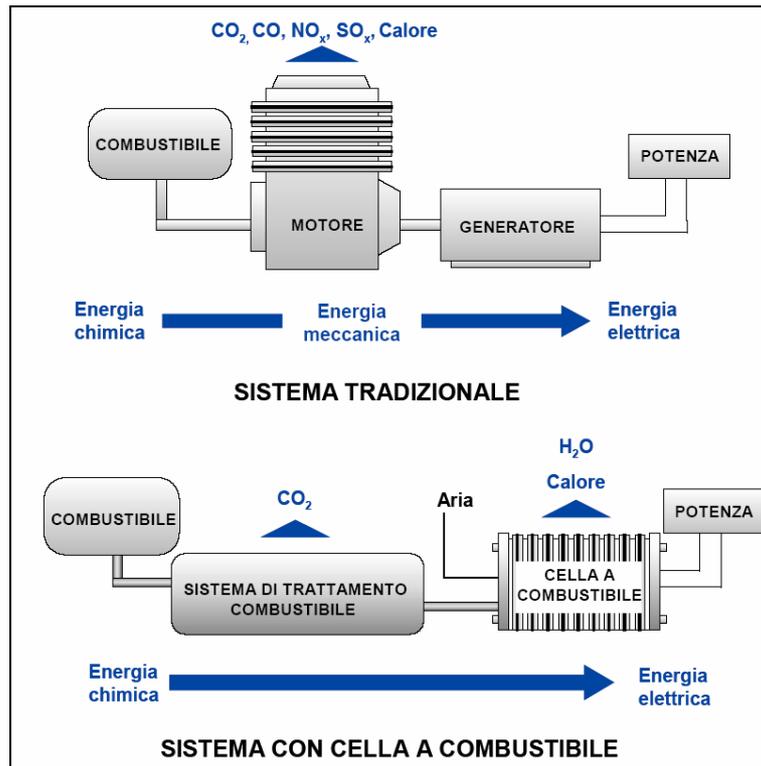
Docente: Prof. Andrea Frattolillo

## **INDICE**

1.	Caratteristiche di una cella a combustibile .....	3
2.	Cenni storici .....	11
3.	Applicazioni stazionarie e cogenerative .....	14

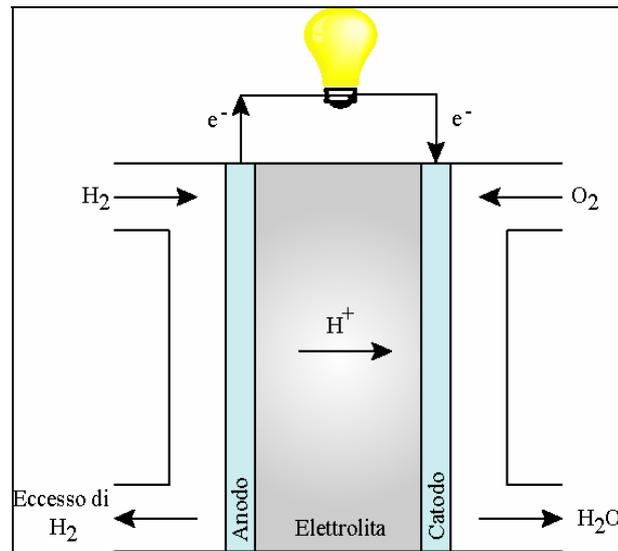
## **1. Caratteristiche di una cella a combustibile**

Le celle a combustibile sono sistemi elettrochimici che permettono di convertire l'energia chimica di un combustibile (in genere idrogeno) direttamente in energia elettrica, senza la conversione intermedia in energia termica, ottenendo rendimenti di conversione più elevati rispetto a quelli delle macchine termiche convenzionali. Una cella a combustibile funziona in modo analogo ad una batteria, in quanto produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico; tuttavia, a differenza di quest'ultima, consuma sostanze provenienti dall'esterno ed è quindi in grado di funzionare senza interruzioni, finché al sistema vengono forniti un combustibile ed ossidante (ossigeno o aria). Da questo punto di vista una cella a combustibile non differisce da un sistema di conversione dell'energia di tipo tradizionale. Tuttavia, la possibilità di ossidare il combustibile elettrochimicamente offre la prospettiva di realizzazione di sistemi a bassissimo impatto ambientale. In Figura 1 sono rappresentati schematicamente un sistema di conversione dell'energia di tipo tradizionale ed un analogo sistema di conversione dell'energia basato sulla tecnologia delle celle a combustibile. Mentre in un sistema di tipo tradizionale l'energia potenziale chimica del combustibile viene dapprima trasformata in energia termica, quindi in energia meccanica ed infine in energia elettrica, in un sistema di conversione dell'energia basato sulle celle a combustibile l'energia potenziale chimica del combustibile è convertita direttamente in energia elettrica, senza ulteriori passaggi intermedi. A differenza dei sistemi tradizionali, tuttavia, le prestazioni delle celle a combustibile sono molto sensibili alla presenza di impurezze nel combustibile che, quindi, richiede una apposita unità di trattamento.



**Figura 1** Confronto tra un sistema di conversione dell'energia di tipo tradizionale ed un sistema basato sulle celle a combustibile [1]

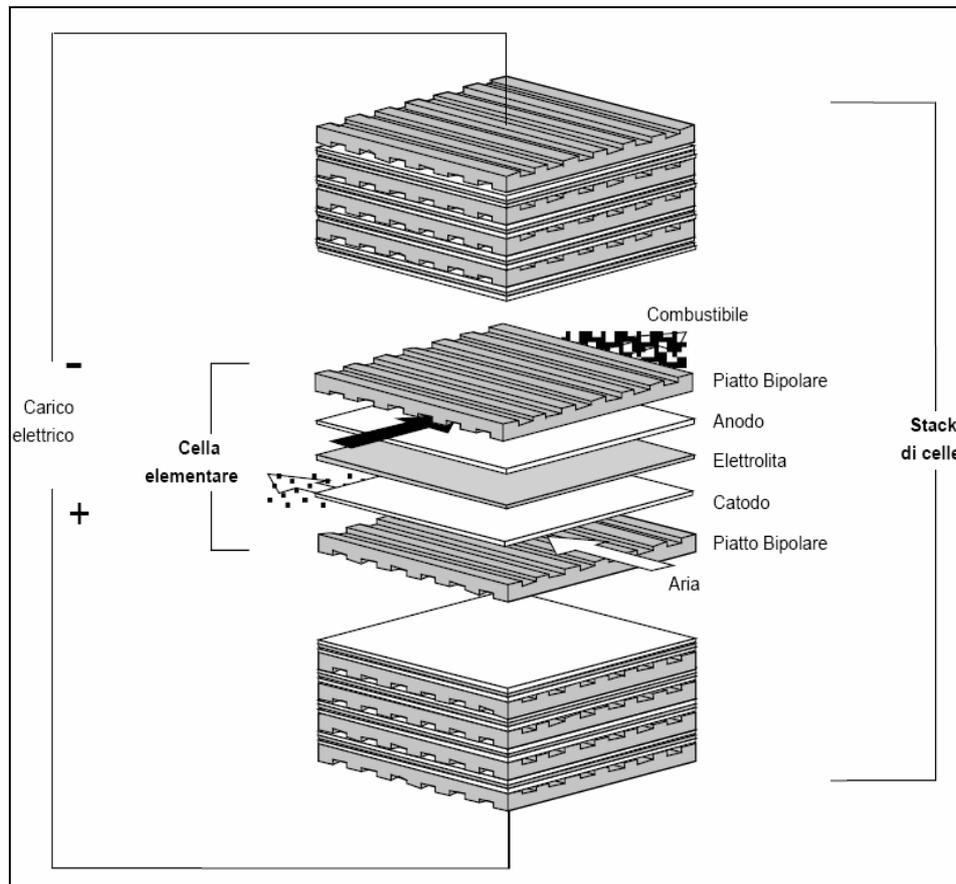
Una cella a combustibile è composta da due elettrodi in materiale poroso, separati da un elettrolita. Gli elettrodi fungono da siti catalitici per le reazioni di cella, fondamentalmente tra idrogeno ed ossigeno, con produzione di acqua e passaggio di corrente elettrica nel circuito esterno. L'elettrolita ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiudendo il circuito elettrico all'interno della cella. In Figura 2 è riportato lo schema rappresentativo di base di una cella a combustibile alimentata da idrogeno ed ossigeno, con produzione di vapore acqueo al catodo.



**Figura 1.2** Schema di funzionamento di una cella a combustibile

La trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore, che è necessario asportare con continuità per mantenere costante la temperatura di funzionamento della cella. Una singola cella produce normalmente una tensione di circa 0,7 V, con correnti comprese tra 300 e 800 mA/cm<sup>2</sup>. Per ottenere la potenza ed il voltaggio desiderato è quindi necessario disporre più celle in serie, a mezzo di piatti bipolari, a formare il cosiddetto "stack" (Figura 3). Gli stack, a loro volta, sono assemblati in moduli, per ottenere sistemi della potenza richiesta.

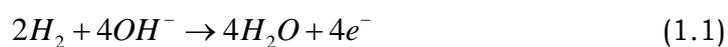
Esistono diverse tecnologie di cella a combustibile, con differenti caratteristiche e diverso grado di sviluppo. Normalmente le celle vengono classificate sulla base dell'elettrolita utilizzato (celle alcaline, ad elettrolita polimerico, ad acido fosforico, a carbonati fusi, ad ossidi solidi) o della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



**Figura 3** Per ottenere la potenza richiesta le celle vengono collegate in serie mediante piatti bipolari a formare uno Stack

Di seguito vengono descritte brevemente le principali tipologie di cella a combustibile, classificate in base al tipo di elettrolita impiegato. Per ogni tipologia sono riportate, nell'ordine, la semi-reazione anodica, la semi-reazione catodica e la reazione complessiva di cella:

- *Celle Alcaline, AFC (Alkaline Fuel Cell)*, che usano un elettrolita costituito da idrossido di potassio ed operano a temperature intorno ai 120 °C. Hanno raggiunto un buon grado di maturità tecnologica soprattutto per usi speciali (applicazioni militari e spaziali). La necessità di utilizzo di gas estremamente puri ne ha limitato fortemente la diffusione, tanto che attualmente non vi sono programmi si sviluppo in corso.



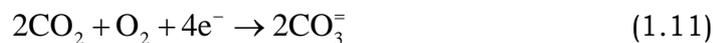
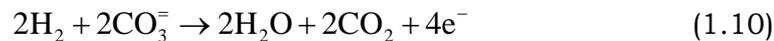
- *Celle ad elettrolita polimerico, PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)*, che utilizzano come elettrolita una membrana polimerica ad elevata conducibilità protonica e funzionano a temperature comprese tra 70 e 100 °. Sono state sviluppate soprattutto per l'autotrazione e la generazione/cogenerazione di piccola taglia.



- *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 da 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).



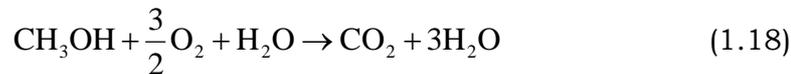
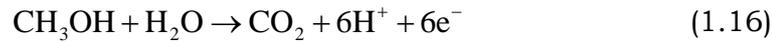
- *Celle a carbonati fusi, MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)*, che utilizzano come elettrolita un soluzione di carbonati alcalini fusi, con una temperatura operativa di circa 540 °C, contenuta in una matrice ceramica porosa. Le MCFC rappresentano una tecnologia promettente soprattutto per la generazione 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 sufficiente conducibilità ionica all'elettrolita, il quale è costituito da materiale ceramico (ossido di zirconio drogato con ossido di ittrio). Come per le celle a carbonati fusi (MCFC) le SOFC 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 comprese tra 70 e 120 °C e, come le PEMFC, utilizzano come elettrolita una membrana polimerica. Sono ancora nello stadio di ricerca di laboratorio.



In Tabella 1.1 sono riportate le principali caratteristiche delle celle a combustibile in termini di parametri di funzionamento, prestazioni tipiche e stato della tecnologia. Dai valori riportati in tabella è possibile osservare come le celle a combustibile a bassa temperatura richiedano l'utilizzo di catalizzatori costituiti da materiali nobili (platino) mentre, nel caso delle SOFC e delle MCFC, l'elevata temperatura di funzionamento favorisce le reazioni elettrochimiche di cella, permettendo l'uso di catalizzatori più economici o, al limite, riuscendo a funzionare senza catalizzatore. Per contro, le celle a combustibile ad alta temperatura richiedono dei tempi di avviamento sensibilmente più elevati rispetto a quelli richiesti dalle celle a combustibile a bassa temperatura. Anche per tali motivi, le celle a bassa temperatura risultano essere più indicate per le applicazioni mobili, mentre le caratteristiche delle celle ad alta temperatura le rendono molto interessanti per applicazioni stazionarie cogenerative ad alta efficienza energetica.

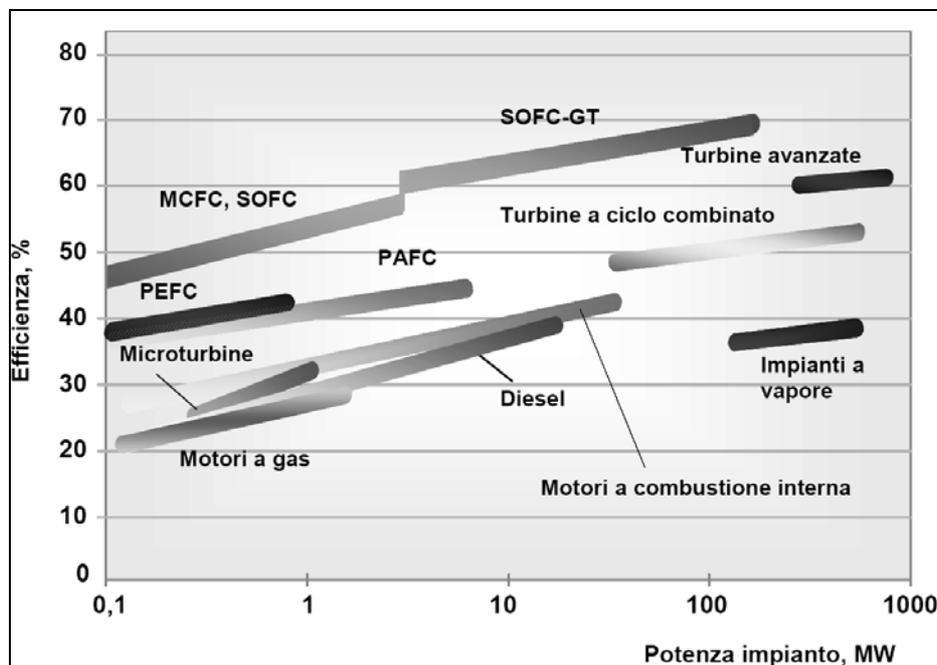
	Celle a bassa temperatura		Celle ad alta temperatura		
	<b>AFC</b>	<b>PEMFC</b>	<b>PAFC</b>	<b>MCFC</b>	<b>SOFC</b>
<i>Elettrolita</i>	Idrossido di potassio	Membrana polimerica	Acido fosforico	Carbonato di litio e potassio	Ossido di zirconio drogato
<i>Ione trasportato</i>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	O <sup>=</sup>
<i>Temperatura, °C</i>	60-120	70-100	160-220	600-650	800-1000
<i>Catalizzatore</i>	Pt/Pd, Ni	Platino	Platino	Nichel	Non richiesto
<i>Materiali costruttivi</i>	Plastica, grafite, Inconel	Materiali grafittici, metalli	Materiali grafittici	Nichel, acciaio inossidabile	Materiali ceramici, metalli
<i>Combustibile</i>	Idrogeno puro	Idrogeno, gas riformati	Idrogeno, gas riformati	Idrogeno, gas riformati	Idrogeno, gas riformati, gas da carbone
<i>Ossidante</i>	Ossigeno puro	O <sub>2</sub> /aria	O <sub>2</sub> /aria	O <sub>2</sub> /aria	O <sub>2</sub> /aria
<i>Efficienza elettrica (PCI), %</i>	60	40-60	40-50	45-55	45-60
<i>Densità di potenza, mW/cm<sup>2</sup></i>	300-500	300-900	150-300	150	150-270
<i>Stato della tecnologia</i>	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
<i>Tempo di avviamento</i>	Minuti	Minuti	1-4 h	5-10 h	5-10 h

**Tabella 1** Principali tipi di celle a combustibile e loro caratteristiche [1].

Rispetto ai sistemi di conversione dell'energia di tipo tradizionale, le celle a combustibile risultano avere:

- *Rendimento elettrico elevato* (riferito al potere calorifico inferiore del combustibile impiegato), con valori che vanno dal 40-48%, per gli impianti con celle a bassa temperatura, fino ad oltre il 60% per gli impianti con celle ad alta temperatura utilizzate in cicli combinati. La Figura 1.4 permette di confrontare le efficienze di diverse celle a combustibile e di sistemi di conversione dell'energia tradizionali;
- *Possibilità d'utilizzo di un'ampia gamma di combustibili* come metano, gas naturale, gas di sintesi (prodotti da combustibili liquidi, gassificazione del carbone, biomasse);

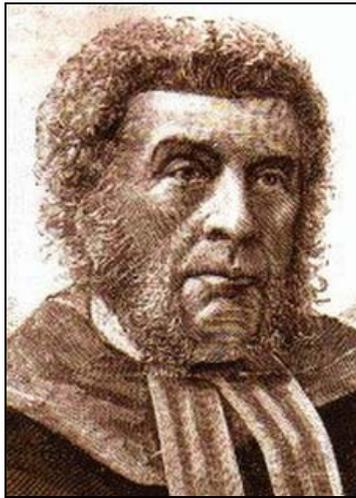
- *Modularità* che permette di aumentare la potenza installata in funzione della domanda di energia;
- *Efficienza poco sensibile al carico ed alle dimensioni dell'impianto.* A differenza di un impianto tradizionale di conversione dell'energia, una cella a combustibile può operare tra il 30% ed il 100% di carico, senza variazioni consistenti della propria efficienza la quale, inoltre, è indipendente dalla potenza installata entro un ampio intervallo di potenza;
- *Ridottissimo impatto ambientale,* sia dal punto di vista delle emissioni gassose che dal punto di vista dell'inquinamento acustico, il che consente di collocare gli impianti con celle a combustibile anche in aree residenziali, permettendo di abbattere i costi relativi alla rete di distribuzione;
- *Possibilità di cogenerazione.* L'energia termica a valle dalle celle a combustibile, disponibile a diverse temperature a seconda della tipologia di cella impiegata, può essere utilizzata in impianti di cogenerazione, oppure per ottenere vapore per uso industriale o acqua calda per usi sanitari e/o riscaldamento ambienti.



**Figura 1.4** Confronto delle efficienze tra celle a combustibile e sistemi di conversione dell'energia di tipo tradizionale

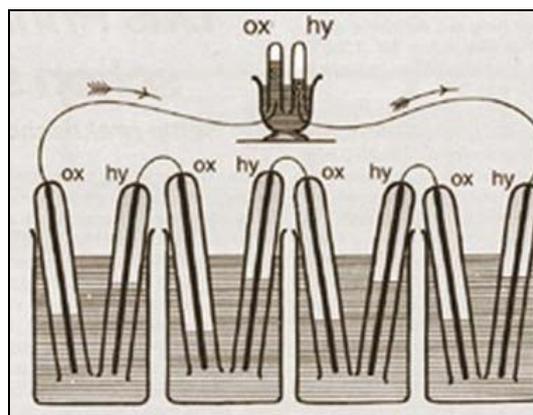
## 2. Cenni storici

Già nell'anno 1839 vennero posate le fondamenta dell'odierna tecnologia delle celle a combustibile. Fu Sir William Robert Grove (1811-1896), gentiluomo gallese (Figura 1.5), a realizzarne il primo prototipo funzionante. Nato in Swansea, Galles, Professore di fisica nella London Institution dal 1841 al 1846, occupò anche la carica di avvocato e poi di giudice nella "Court of Common Pleas" e nella "High Court of Justice".



**Figura 5** *Sir William Robert Grove*

Le sue celle a combustibile erano costituite da elettrodi porosi di platino, contenuti in cilindri di vetro, immersi in una soluzione a base di acido solforico, che fungeva da bagno elettrolita e originava un contatto elettrico; uno dei due tubi di vetro era alimentato da ossigeno, mentre l'altro da idrogeno. Collegando i due elettrodi mediante un circuito esterno ad un amperometro, Grove osservò che l'apparecchiatura così realizzata generava corrente elettrica, oltre che la produzione di acqua e calore e l'inevitabile consumo dell'idrogeno e dell'ossigeno. La tensione poteva essere dunque prelevata dagli elettrodi, ma poiché era esigua, Grove combinò una serie di celle (4) tra loro per ottenerne di più. Il sistema ideato da Grove prese il nome di "batteria voltaica a gas" (Figura 6), il prototipo sulla base del quale sono concepite le attuali celle PAFC.



**Figura 6** “Batteria voltaica a gas” di Grove

Purtroppo la sua invenzione non era in grado di produrre abbastanza elettricità da essere considerata utile: i contemporanei di Grove non riconobbero la sua scoperta e il tema “cella a combustibile” venne dimenticato. I motivi sono essenzialmente due: l'idrogeno, usato come combustibile per la cella, allora come oggi non è disponibile immediatamente in natura, e richiede, per la sua produzione, complessi processi di estrazione e costose apparecchiature; negli anni immediatamente successivi alla scoperta di Grove, sulla scena mondiale apparvero le prime macchine termiche, ovvero la turbina a vapore e il motore alternativo a combustione interna, che utilizzavano combustibili certamente meno costosi e più facilmente reperibili dell'idrogeno (carbone e derivati del petrolio). È possibile citare unicamente, tra gli studiosi contemporanei di Grove, interessati al tema delle celle a combustibile, Ludwig Mond (1839-1909) ed il suo assistente Charles Langer, che nel 1889 costruirono una cella a combustibile da 6 A ft<sup>2</sup> e 0.73 Volt, funzionante ad aria e gas prodotto da carbone industriale. Circa nello stesso periodo, William White Jaques, che coniò il termine cella a combustibile, ne costruì una che come bagno elettrolita utilizzava acido fosforico. A partire dalla prima metà del secolo scorso, si sono susseguiti una serie di studiosi che si sono occupati dell'analisi prevalentemente teorica delle celle a combustibile, ovvero dei suoi principi di funzionamento: Friederich Wilhelm Ostwald (1853-1932) si occupò di studi volti a comprendere la dinamica delle celle; Emil Baur (1873-1944), ingegnere svizzero, si dedicò allo studio dei differenti tipi di celle, in particolare di quelle operanti ad alta temperatura. Durante gli anni Venti del secolo scorso, ricerche in Germania riguardanti le celle a combustibile aprirono la porta allo sviluppo del ciclo carbonato ed alle celle a combustibile ad ossidi solidi di oggi. Nel 1932, il Dott. Francis Thomas Bacon (1904-1992) diede un importante contributo alla ricerca dei combustibili. I primi progettisti di celle utilizzavano elettrodi porosi in platino ed acido solforico come bagno elettrolita; ma

utilizzare platino era molto costoso e l'acido solforico era corrosivo. Bacon decise di utilizzare un elettrodo poco costoso, quale il nickel ed un elettrolita alcalino meno corrosivo. Dovette lavorare fino al 1959 per perfezionare il suo progetto, dimostrandone l'efficacia con una saldatrice alimentata da una cella a combustibile da 5 kW. Francis T. Bacon, un discendente diretto dell'altro famoso Francis Bacon, chiamò così la sua famosa cella la "Cella Bacon" (*Bacon Cell*). Solo negli anni cinquanta, nel segno della guerra fredda, l'idea venne ripresa, poiché la tecnica spaziale e militare necessitava di forme energetiche compatte ed efficienti. Nell'ottobre del 1959, Harry Karl Ihrig, un ingegnere della Allis-Chambers, realizzò un trattore da 20 cavalli alimentato da celle a combustibile: fu il primo veicolo di questo tipo. Il serio interesse per le celle a combustibile quale generatore di energia non sorse prima degli anni '60, con i programmi spaziali che adottarono questa tecnologia a scapito del nucleare, di maggior rischio, e del solare, più costoso. La General Electric produsse un sistema di generazione d'energia elettrica basato sulle celle a combustibile, per le navicelle spaziali Gemini ed Apollo della NASA. I principi della "Cella Bacon" furono la base di questo progetto. Attualmente tutti i veicoli spaziali dei programmi dello Space Shuttle utilizzano con successo questa tecnologia: l'elettricità per lo Shuttle è fornita infatti da celle a combustibile, ed alcune di queste provvedono anche alla produzione d'acqua per l'equipaggio. I veicoli spaziali e i sottomarini hanno bisogno di energia elettrica, ma non consentono l'uso di motori a combustione interna per generarla. Visto che le batterie sono troppo pesanti per essere installate nei veicoli spaziali, la NASA optò per la trasformazione di energia chimica tramite celle a combustibile. Il Dr. Lawrence H. DuBois del Dipartimento di Difesa e dell'Agenzia per Progetti di Ricerca Avanzata (DARPA) ebbe l'idea per lo sviluppo di una cella a combustibile che potesse operare alimentata da vari idrocarburi liquidi (metano, etanolo, ecc.). Cooperò così con il Dr. Surya Prakash, un famoso esperto di super acidi ed il Dr. George A. Olah, entrambi dell'Istituto di Idrocarburi Loker dell'Università del Sud della California (USC), per inventare questo tipo di cella a combustibile. La USC, in collaborazione con il Laboratorio di Propulsione Jet (JPL)/Istituto Tecnologico della California (Cal Tech), inventò così l'ossidazione diretta di idrocarburi liquidi, successivamente conosciuta come DMFC o Cella a Combustibile con Alimentazione Diretta al Metanolo. La DTI ha acquistato in esclusiva mondiale i diritti di licensing per l'Ossidazione Diretta di idrocarburi Liquidi, la Tecnologia DMFC. Il Presidente e CEO della DTI, Todd Marsh, prevedendo il futuro impatto di questa nuova e pulita alternativa ai combustibili fossili, si offrì di aiutare a commercializzare questa tecnologia. Oggi la DMFC è largamente considerata come una tecnologia utile e conveniente in molte applicazioni, un'alternativa pulita ai combustibili fossili.

Pertanto, sebbene le celle a combustibile siano state scoperte intorno al 1839, sono occorsi 120 anni affinché la NASA dimostrasse alcune delle loro potenziali applicazioni nella produzione di energia durante i voli spaziali. Come risultato di questi successi, negli anni '60, l'industria ha cominciato a riconoscere il potenziale commerciale delle celle a combustibile, ma trascurando le barriere tecniche e gli alti costi d'investimento (le celle a combustibile non sono economicamente competitive con le esistenti tecnologie per la produzione di energia). Dal 1984, l'Office of Transportation Technologies al U.S. Department of Energy sta supportando la ricerca e lo sviluppo della tecnologia della cella a combustibile e, tra i risultati ottenuti, centinaia di compagnie nel mondo stanno attualmente lavorando affinché tali sistemi abbiano sviluppo e successo, conscie delle caratteristiche di alta performance, affidabilità, resistenza e dei benefici ambientali garantiti da tale tecnologia.

L'utilizzo civile delle celle a combustibile è diventato pertanto interessante solo negli ultimi anni. Agli inizi degli anni novanta, scienziati ed ingegneri ne svilupparono diversi nuovi tipi e tecnologie, con i quali si è potuta aumentare continuamente l'efficienza e abbassare i costi. Nel frattempo le applicazioni si sono estese da motori, caldaie e centrali con una potenza di alcuni MW, a microapplicazioni nella telefonia e nell'informatica mobile.

### **3 Applicazioni stazionarie e cogenerative**

La diffusione dei sistemi con celle a combustibile richiede 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. Le celle a combustibile risultano particolarmente adatte alla generazione di potenza distribuita e lo sviluppo del loro mercato dipende 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

sempre al di sotto di quelle di un equivalente impianto convenzionale [1]. Inoltre, il contenuto in  $\text{NO}_x$  e CO è praticamente trascurabile, in quanto viene eliminato il processo di conversione dell'energia chimica del combustibile in energia termica. Anche composti come particolato e  $\text{SO}_x$  sono trascurabili nelle emissioni di celle a combustibile, in quanto ogni impianto prevede la conversione e/o l'eliminazione degli  $\text{SO}_x$  prima dell'ingresso in cella per evitare problemi di avvelenamento e/o deattivazione del catalizzatore. Le emissioni di impianti PC25 (200 kW PAFC della UTC Fuel Cells), ad esempio, sono così basse da meritarsi un'esenzione totale dalle leggi sulla qualità dell'aria della California meridionale (SCAQMD, South Coast Air Quality Management District), considerate fra le più restrittive esistenti al mondo [1]. Una significativa riduzione della quantità di  $\text{CO}_2$  emessa dagli impianti con celle a combustibile, a parità di energia elettrica e calore prodotti rispetto ad un impianto tradizionale, inoltre, è dovuta alla loro maggiore efficienza energetica. Prendendo come esempio un impianto da 200 kW (emissioni  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ , di circa 1.000 t/anno, considerando un utilizzo medio di 7000 ore/anno [1].

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 richieste da alcuni kW a qualche MW, che presso aziende elettriche che richiedono la produzione di alcune decine di MW. 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 [1]. 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. Presumibilmente, 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. 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 [1].

Ad oggi diverse aziende nel mondo sono impegnate nella produzione di sistemi di conversione energetica stazionari, che impiegano celle a combustibile. E' possibile trovare sul mercato impianti che vanno da potenze dell'ordine di 1 kW, fino a qualche centinaio di kW. Di seguito sono riportati alcuni esempi di sistemi a celle a combustibile disponibili in commercio.

**Ballard Power Systems** (Vancouver, Canada, [www.ballard.com](http://www.ballard.com)) 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, 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). L'impianto Ballard da 250 kW è visibile in Figura 1.7, mentre in Tabella 1.2 ed in Tabella 1.3 sono riportate, rispettivamente, le specifiche tecniche dell'intero impianto e dello stack.



**Figura 7** Impianto Ballard 250 kW, Bewag Treptow Heating Plant, Berlino

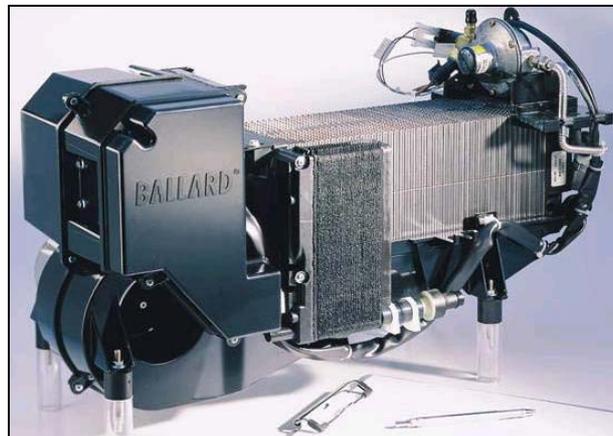
Potenza	250 kW <sub>e</sub> / 237 kW <sub>term</sub>
Combustibile	Gas naturale
Efficienza elettrica	40 % (PCI)
Efficienza totale	80 % (PCI)
Modalità di funzionamento	In automatico
Dimensioni	2,4 m × 2,4 m × 5,7 m
Peso	12100 kg

**Tabella 1** Caratteristiche tecniche dell'impianto Ballard PEFC da 250 kW

Potenza	250 kW
Prestazioni di cella	0,78 V a 0,37 A/cm <sup>2</sup>
Numero di celle	688 (4 × 172 celle quadrate connesse in serie)
Voltaggio	535 Vdc
Efficienza	62 %
Dimensioni	1,4 m × 1,6 m × 2,1 m

**Tabella 2** Specifiche tecniche dello stack, serie Mk6000

Nell'ambito della generazione portatile, la BGS ha reso disponibile un modulo, il NEXA (Figura 8), nato per essere integrato in sistemi per generazione portatili, generazione di emergenza e unità UPS (*uninterruptible power supply*). Il NEXA, alimentato ad idrogeno, eroga 1200 W e pesa 12 kg.



**Figura 8** Modulo NEXA nato per essere integrato in sistemi per generazione portatili (potenza: 1200 W; corrente: 46 A; peso: 12 kg; alimentazione: H<sub>2</sub>)

**GE MicroGen/Plug Power** ([www.gemicrogen.com](http://www.gemicrogen.com)) è stata costituita nel febbraio 1999 dalla General Electric Power Systems e dalla Plug Power, ed è impegnata nello sviluppo di unità di potenza per usi residenziali e commerciali. Ad esempio, la società ha sviluppato sistemi PEFC di potenza 7 kW (HomeGen 7000) a gas naturale (Figura 9). In Tabella 1.4 sono riportate le caratteristiche tecniche dell'unità 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. 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 kW per usi residenziali (Figura 10). Sono previsti test sperimentali su impianti pilota con il marchio Vaillant in diverse nazioni europee, soprattutto in Germania, Austria, Svizzera e Olanda. Entro il 2010 la Vaillant prevede un numero di apparecchi venduti pari a 100.000 all'anno.



**Figura 9** Sistema GE HomeGen 7000 (7 kW) in grado di soddisfare i bisogni energetici di una civile abitazione di media grandezza.

Potenza	7 kW
Voltaggio	120/240 VAC a 60 Hz 100/230 VAC a 50 Hz
Efficienza (utilizzando gas naturale)	40 % erogando una potenza di 2 kW 29% erogando una potenza di 7 kW
Efficienza (utilizzando GPL)	38 % erogando una potenza di 2 kW 27% erogando una potenza di 7 kW
Efficienza di cogenerazione	> 75 %
Temperatura di esercizio	Circa 70 °C
Temperatura esausto	Circa 105 °C
Emissioni	NOx < 1 ppm SOx < 1 ppm
Durata	15 anni
Rumorosità	< 65 dBa ad una distanza di 1 m
Dimensioni	1,9 m × 0,9 m × 1,4 m

**Tabella 1.3** Caratteristiche tecniche dell'unità HomeGen 7000



**Figura 10** Prototipo Vaillant/Plug Power in grado di erogare 4,5 kW<sub>e</sub>

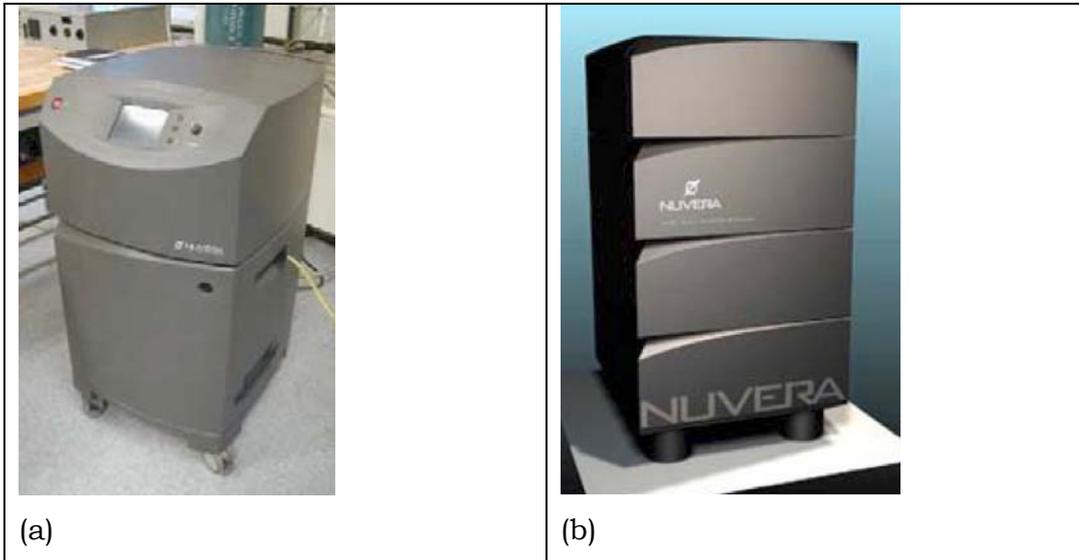
La prima unità Vaillant con certificazione CE (Conformità Europea) è stata installata in un edificio a Gelsenkirchen (Germania), a dicembre 2001, per fornire elettricità, calore ed acqua calda. Il progetto è finanziato da Vaillant, Ruhrgas AG, E.ON Engineering GmbH, ELE GmbH, EUS GmbH e dalla regione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

**Nuvera Fuel Cells** ([www.nuvera.com](http://www.nuvera.com)) 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. 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. Oggi la Nuvera Fuel Cells è riconosciuta come azienda leader nel settore delle celle a combustibile, sia per applicazioni stazionarie che mobili.

Tra i programmi di sviluppo rientrano la realizzazione di sistemi cogenerativi basati su celle a combustibile alimentate a gas naturale (2007) ed unità di trattamento combustibile che permetteranno di realizzare veicoli con celle a combustibile alimentate a gasolio.

In Figura 11 sono riportate due unità realizzate dalla Nuvera Fuel Cells. L'unità di sinistra, Figura 11(a), eroga una potenza di 1 kW ed è alimentata direttamente ad idrogeno, mentre l'unità a destra, Figura 11(b), eroga una potenza fino a 5 kW ed è alimentata a gas naturale. Le specifiche tecniche dettagliate sono riportate in Tabella 5.

La **IdaTech** ([www.idatech.com](http://www.idatech.com)) 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.



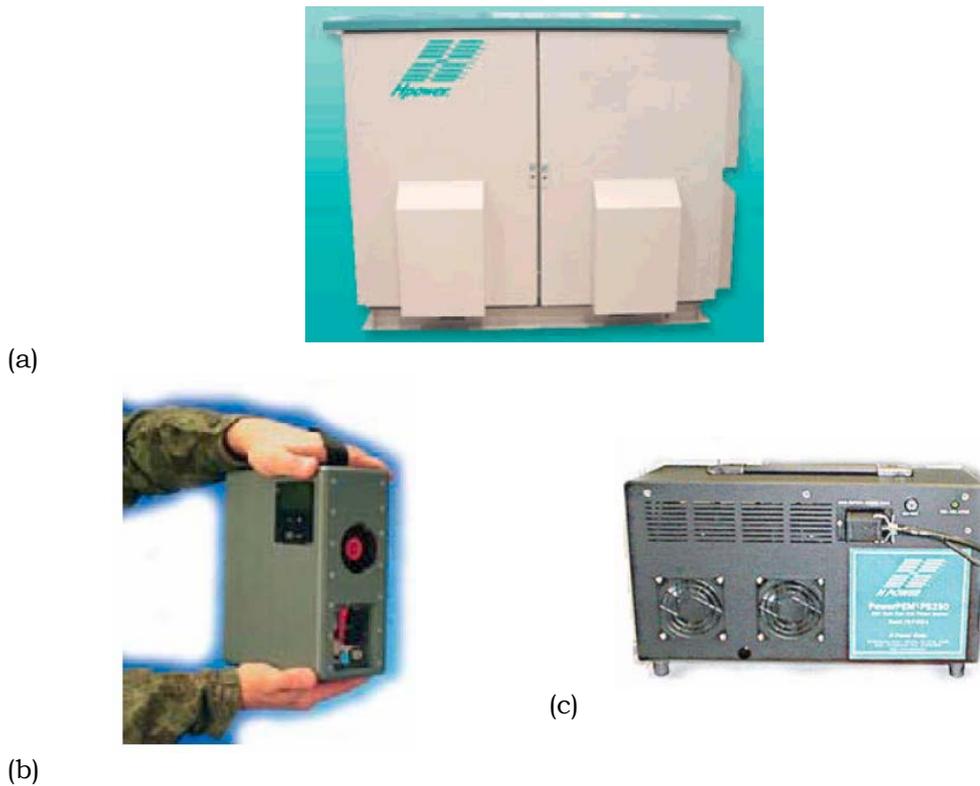
**Figura 11** Alcune unità prodotte dalla Nuvera Fuel Cells: (a) unità da 1 kW alimentata ad idrogeno; (b) unità da 5 kW alimentata a gas naturale.

	<b>1 kW - Idrogeno</b>	<b>5 kW - Gas naturale</b>
Combustibile	H <sub>2</sub> - 1,4 bar	GN, GPL - 17 mbar
Potenza	1 kW	1-5 kW
Voltaggio	120/240 VAC a 60 Hz 100/230 VAC a 50 Hz	120/240 VAC a 60 Hz 100/230 VAC a 50 Hz
Efficienza elettrica	40 % erogando 1 kW	40 % erogando 1 kW
Efficienza di cogenerazione	-	> 75 % erogando 1 kW
Temperatura di esercizio	70 °C	70 °C
Temperatura esausto	105 °C	105 °C
Temperatura operativa	-18 ÷ 50 °C	-18 ÷ 50 °C
Avviamento da 21 °C	3 s	10 min
Volume	85 l	650 l
Peso	65 kg	200 kg

**Tabella 4** Specifiche tecniche delle unità delle Nuvera Fuel Cells da 1 kW e da 5 kW alimentate, rispettivamente, ad idrogeno ed a gas naturale

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. A dicembre 2000 è stato annunciato un accordo con la Tokyo Boeki Ltd., per la quale era prevista la fabbricazione, distribuzione e vendita di sistemi di potenza 1-3 kW in Giappone ed altri 13 paesi asiatici.

In Figura 12 sono riportati alcuni esempi di sistemi a celle a combustibile realizzati dalla H Power Corp.



**Figura 12** Esempi di sistemi a celle a combustibile realizzati dalla H Power Corp.: (a) Unità RCU da 1-10 kW; (b) Sistema portatile PPS da 100 W; (c) Sistema PowerPEM-PS 250 da 250 W

**Acumentrics** ([www.acumentrics.com](http://www.acumentrics.com)) è stata fondata nel 1994 da Gary Mook per la produzione di sistemi di generazione di potenza su richiesta ed è diventata un'azienda di riferimento nella produzione di AC/DC UPS (Uninterruptible Power Supplies) per applicazioni industriali e militari. Nel corso del proprio sviluppo la Acumentrics si è sforzata nell'espandere il proprio campo di azione ad altri sistemi di conversione dell'energia e sta attualmente presentando sul mercato una innovativa linea di sistemi di produzione di potenza basati sulla tecnologia SOFC (l'azienda ha sviluppato una propria tecnologia SOFC, di cui è proprietaria) che, rispetto ai sistemi tradizionali, risultano essere molto più puliti e vantaggiosi. L'azienda ha brevettato una configurazione SOFC di tipo tubolare che offre una maggiore efficienza e che è stata utilizzata sia per applicazioni industriali che residenziali. La sede centrale amministrativa dell'azienda per la ricerca, lo sviluppo e l'ingegnerizzazione si trova nel Westwood, Massachusetts.

**Ansaldo Fuel Cells S.p.A.** (AFCo, [www.ansaldofuelcells.com](http://www.ansaldofuelcells.com)) è stata costituita per scissione da Ansaldo Ricerche nel 2001 e, dal 2004, sono entrate a far parte del capitale sociale di AFCo le Società EnerTAD (gruppo TAD) e FINCANTIERI. L'attività sulle celle a combustibile MCFC inizia in Ansaldo tra fine anni '70 e inizio anni '80 nei laboratori di Ansaldo Energia. Successivamente (1986) tutte le attività nel settore delle celle a

combustibile sono state incorporate in Ansaldo Ricerche Srl, nata come Corporate R&D centre del gruppo Ansaldo. Nel corso di questo ventennio, lo sviluppo della tecnologia è passato dalla scala di laboratorio, attraverso numerosi stack “tecnologici” di diversa taglia, fino alla realizzazione, nel 1999, di un impianto proof of concept da 100 kW presso Enel Ricerca a Milano, che ha segnato il passaggio dalla fase di sviluppo strettamente tecnologico alla attuale fase dimostrativa. Sulla base delle esperienze maturate nel corso dell’esercizio dell’impianto da 100 kW è stata progettata la “Serie 2TW” che costituirà la entry unit ed è una unità pensata per potenze fino a 500 kW e destinata anche a costituire il mattone elementare per la realizzazione di impianti di taglia multimegawatt. Sono tuttavia allo studio soluzioni potenzialmente idonee anche per potenze nel campo delle decine di kW.