Zeitschrift: Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

Herausgeber: Società Svizzera Ingegneri e Architetti

Band: - (2001)

Heft: 5

Artikel: L'idrogeno

Autor: Romer, Sara / Romer, Arturo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-132226

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'idrogeno

Sara Romer, Arturo Romer

1. Caratteristiche fisiche dell'idrogeno

L'idrogeno, il cui nome significa «generatore di acqua», rappresenta l'elemento più abbondante dell'universo. Nel sole ad esempio è presente per circa il 90%, e con l'ossigeno ed il silicio è uno degli elementi più diffusi della crosta terrestre. Particolarmente abbondante è allo stato combinato; combinato con carbonio, ossigeno ed alcuni altri elementi è uno dei principali costituenti del mondo vegetale e animale.

L'idrogeno è a temperatura ambiente un gas incolore, inodore e praticamente insolubile in acqua. Dopo l'elio è il gas più difficile a liquefarsi. Generalmente poco attivo a freddo, l'idrogeno dà luogo a caldo o in presenza di catalizzatori a numerose reazioni chimiche. La combinazione con ossigeno per dare acqua avviene spesso con esplosione a temperatura elevata o con un catalizzatore.

L'idrogeno ha il più alto contenuto di energia per unità di massa di tutti gli altri combustibili (potere calorico superiore).

Massa molecolare di H_2	g/mole	2.016
Densità	kg/m^3	0.0838
Densità come liquido	kg/m^3	70.8
Potere calorico superiore	MJ/kg	141.90
Temperatura di ebollizione	K	20.3
Punto critico	K	32.94
	bar	12.84
	kg/m^3	31.40

Proprietà dell'idrogeno (H_2)

2. L'idrogeno come combustibile

L'idrogeno è un gas industriale di primaria importanza. Fu per lungo tempo utilizzato per il gonfiamento degli aerostati. Fu poi sostituito dall'elio, leggermente più pesante ma non infiammabile. Attualmente, l'impiego dell'idrogeno come combustibile avviene nei programmi spaziali.

Oggetto delle più recenti ricerche è l'impiego dell'idrogeno nelle celle a combustibile. L'obiettivo è quello di realizzare un sistema energetico basato sull'idrogeno, con la costruzione di impianti per la produzione di energia che utilizzino l'idrogeno prodotto dall'elettrolisi dell'acqua marina.

L'interesse dell'idrogeno come vettore energetico risale all'inizio degli anni 1970, durante la prima crisi petrolifera. La visione di un sistema energetico basato sull'idrogeno era però strettamente correlata, nella realtà, con la disponibilità di energia elettrica a basso costo. Di conseguenza, i progetti di ricerca legati all'energia dall'idrogeno furono progressivamente abbandonati.

Nel corso degli anni 1980, furono fatti passi in avanti nello studio delle tecnologie relative alle risorse rinnovabili e all'efficienza energetica, tanto che la ricerca su sistemi energetici altamente efficienti basati su idrogeno e fonti rinnovabili apparve sempre più interessante.

La materia prima fondamentale per la produzione dell'idrogeno è l'acqua. Il prodotto finale dell'utilizzazione dell'idrogeno è acqua pura o vapore acqueo. L'idrogeno è dunque compatibile con l'ambiente e non produce alcun gas serra, in particolare CO_2. Tuttavia l'impiego di idrogeno incontra nella pratica numerosi problemi soprattutto riguardo gli alti costi di produzione e di immagazzinamento. Le principali *tecnologie di produzione* dell'idrogeno sono:

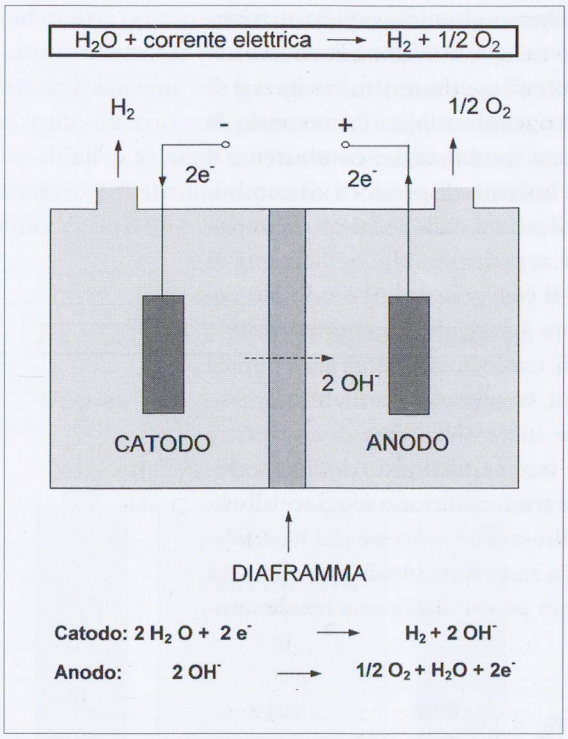
- Elettrolisi dell'acqua
- Steam reforming del gas metano
- Ossidazione parziale non catalitica di idrocarburi
- Gassificazione del carbone
- Gassificazione e pirolisi delle biomasse
- Altri metodi

2.1 L'elettrolisi dell' acqua

$$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$$

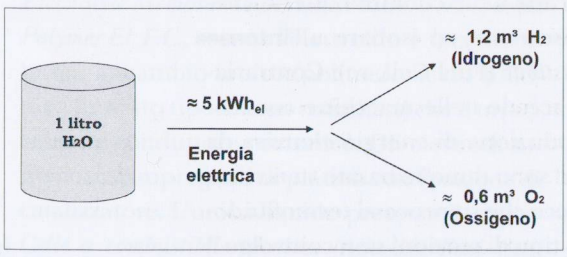
Il processo dell'*elettrolisi* fu applicato per la prima volta da Sir William Grove, nell' anno 1839. Questo processo richiede il passaggio di corrente elettrica attraverso l'acqua. La corrente entra nella cella elettrolitica tramite un elettrodo caricato negativamente, il catodo, attraversa l'acqua e va via attraverso un elettrodo caricato positivamente, l'anodo. L'idrogeno e l'ossigeno così separati confluiscono rispettivamente verso il catodo e

verso l'anodo. L'elettrolisi è il metodo più comune per la produzione di idrogeno anche se incontra notevoli ostacoli per la quantità limitata di idrogeno prodotta e per i costi, ancora troppo elevati, dovuti all'impiego di energia elettrica. Attualmente, solo il 4% della produzione mondiale di idrogeno avviene per elettrolisi. Per risolvere questi problemi, si prevede l'applicazione dell'elettrolisi con vapore ad alta temperatura (900-1000 °C).



Schema di funzionamento di un elettrolizzatore

L'alta temperatura del sistema accelera le reazioni, riduce le perdite di energia dovute alla polarizzazione degli elettrodi ed accresce l'efficienza complessiva del sistema.
In ogni caso, prima che le nuove tecnologie vengano perfezionate e divengano operative, il costo per la produzione di idrogeno dall'elettrolisi resta il più alto rispetto a qualsiasi altra tecnologia. Comunque l'elettrolisi è il processo che riveste maggiore interesse e su cui la ricerca punta maggiormente.



L'elettrolisi di un litro d'acqua (1,2m^3 di H_2 ≈ 4kWh di energia chimica)

2.2 Steam reforming del gas metano

Lo Steam reforming del gas metano (SMR) è un processo ben sviluppato ed altamente commercializzato e attraverso il quale si produce il 48% dell'idrogeno mondiale. Lo SMR implica la reazione tra metano e vapore in presenza di catalizzatori. Tale processo, su scala industriale, richiede una temperatura operativa di circa 800 °C ed una pressione di 2.5 MPa. La prima fase consiste nella decomposizione del metano in idrogeno e monossido di carbonio. Nella seconda fase, chiamata «shift reaction», il monossido di carbonio e l'acqua si trasformano in biossido di carbonio ed idrogeno. Tramite assorbimento o separazione con membrane, il biossido di carbonio è separato dalla miscela di gas, la quale viene ulteriormente purificata per rimuovere altri componenti non desiderati. Scenari futuristici prevedono la separazione del biossido di carbonio e il rispettivo stoccaggio finale nei fondi marini.
Il costo del gas naturale incide fortemente sul prezzo finale dell'idrogeno. Per impianti di grosse dimensioni il costo del gas naturale rappresenta il 52-68% del costo totale. I costi dello SMR sono notevolmente inferiori a quelli dell'elettrolisi e competitivi con quelli di altre tecnologie. Questa tecnologia comporta inoltre un ridotto impatto ambientale.

a) «Steam reforming» di metano:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3 \cdot H_2$$
$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$
$$CH_4 + 2 \cdot H_2O \rightarrow CO_2 + 4 \cdot H_2$$

b) «Steam reforming» di metano e di idrocarburi in generale:

$$C_nH_m + n \cdot H_2O \rightarrow n \cdot CO + (n+m/2) \cdot H_2$$
$$n \cdot CO + n \cdot H_2O \rightarrow n \cdot CO_2 + n \cdot H_2$$
$$C_nH_m + 2n \cdot H_2O \rightarrow n \cdot CO_2 + (2n+m/2) \cdot H_2$$

«Steam reforming» di metano e idrocarburi

2.3 Ossidazione parziale non catalitica di idrocarburi

L'idrogeno può essere ottenuto dall'ossidazione parziale non catalitica, ad una temperatura che varia tra 1300-1500 °C, di idrocarburi pesanti come la nafta. L'efficienza complessiva del processo (circa il 50%) è minore di quella ottenuta dalla tecnologia SMR (65-75%) ed è necessario ossigeno puro. I costi sono sensibilmente più elevati.

2.4 Gassificazione del carbone

In generale, il processo della gassificazione consiste nella parziale ossidazione, non catalitica, di una sostanza solida, liquida o gassosa con l'obiettivo finale di produrre un combustibile gassoso,

formato principalmente da idrogeno, ossido di carbonio e idrocarburi leggeri come il metano. La produzione di idrogeno mediante gassificazione del carbone è una tecnologia che trova numerose applicazioni commerciali, ma è competitiva con la tecnologia SMR solo dove il costo del gas naturale è molto elevato.

2.5 Gassificazione e pirolisi delle biomasse

Come la gassificazione, anche la pirolisi, o distillazione secca, è un processo che per mezzo della decomposizione termica spezza le molecole complesse delle sostanze organiche in elementi semplici. Essa consiste nel riscaldare la sostanza a 900-1000 °C, in assenza di ossigeno con ottenimento di sostanze volatili e di un residuo solido. L'applicazione di calore alle biomasse (legno, grassi e rifiuti agricoli) produce numerosi differenti gas, tra cui l'idrogeno.

La gassificazione delle biomasse prevede l'impiego sia di materiale derivato dai rifiuti solidi urbani sia da materiali specifici appositamente coltivati per essere impiegati come fonte d'energia.

Un importante vantaggio ambientale dell'utilizzo delle biomasse come fonte di idrogeno è il fatto che il biossido di carbonio emesso nella conversione delle biomasse, non contribuisce ad aumentare la quantità totale di gas nell'atmosfera. I biossido di carbonio è consumato dalle biomasse durante la crescita (fotosintesi) e solo la stessa quantità è restituita all'ambiente durante il processo della gassificazione. Purtroppo il contenuto d'idrogeno è solo del 6-6.5% , rispetto al 25% del gas naturale. Per questa ragione i costi sono ancora molto elevati e questo sistema non è competitivo.

2.6 Altri metodi

Si sta puntando molto su sistemi che consentano la produzione di idrogeno tramite l'impiego diretto dell'energia solare, in sostituzione dell'energia elettrica necessaria per l'elettrolisi dell'acqua. Si tratta comunque di tecnologie in fase sperimentale. Uno di questi metodi usa il processo della fotoconversione ed associa un sistema di assorbimento della luce solare ed un catalizzatore per la scissione dell'acqua. Questo processo usa l'energia della luce senza passare attraverso la produzione separata di elettricità. Ci sono due classificazioni principali di tali sistemi: fotobiologico (alcune alghe e batteri sono in grado di produrre idrogeno sotto specifiche condizioni) e fotoelettrochimico. Un altro esempio sono le centrali fotovoltaiche a idrogeno. Una delle tecnologie di produzione dell'idrogeno che è ancora ai primissimi stadi della ricerca, è basata sui metodi di conversione enzimatica del glucosio e altri zuccheri. Un'altra tecnologia agli inizi è la radiolisi. Essa consiste nella separazione delle molecole dell'acqua tramite la collisione con particelle ad alto contenuto energetico prodotte in un reattore nucleare. A causa della rapida ricombinazione di ossigeno e idrogeno l'efficienza di questo metodo è però molto bassa (1%).

3. Impiego dell'idrogeno nelle celle a combustibile

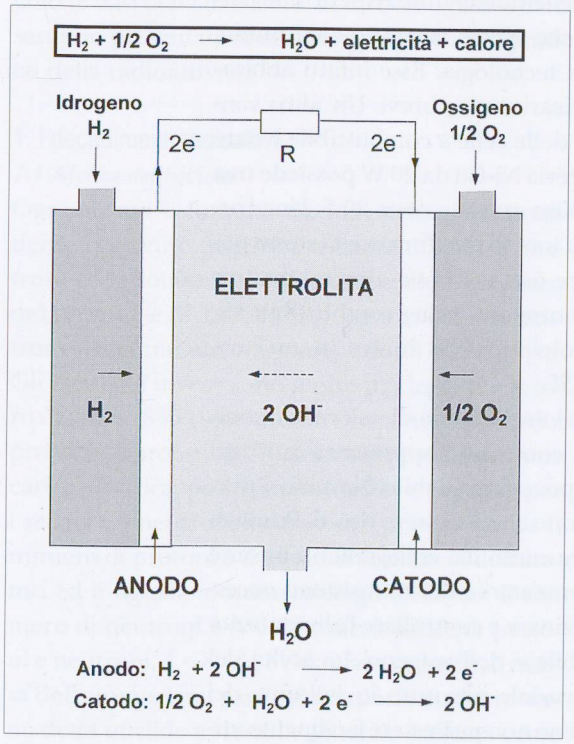
Nelle reazioni di combustione si assiste essenzialmente ad un processo chimico rapido e fortemente esotermico nel quale avviene l'ossidazione tramite un reagente (il comburente, l'ossigeno) di una sostanza detta combustibile. Provocando la reazione del sistema combustibile+comburente il risultato sarà un insieme di prodotti di combustione: l'energia rilasciata dalle reazioni chimiche di ossidazione si è resa disponibile nella forma di calore dei gas caldi così generati. Il modo più comune per ottenere lavoro da un combustibile è proprio quello di trasformare l'energia chimica in energia termica, tramite un normale processo di combustione, e successivamente di convertire l'*energia termica* in *lavoro* utilizzando delle macchine. Questo tipo di trasformazione soggiace alle limitazioni termodinamiche espresse dal *rendimento di Carnot* per una macchina ideale che operi tra una sorgente ed un pozzo di calore a temperature costanti:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Il valore del rendimento potrebbe innalzarsi, ed il lavoro estraibile potrebbe corrispondentemente avvicinarsi al lavoro massimo W_{max} ovvero all'exergia del combustibile, solo se la temperatura della sorgente di calore crescesse fino a valori enormi (caratteristici delle cosiddette «fiamme reversibili»: ad esempio circa 3700K per il metano), tecnologicamente inaccessibili. Non esistono materiali utilizzabili per la costruzione delle macchine che dovrebbero lavorare con fluidi così caldi.

La *trasformazione* di energia *chimica* in energia *elettrica* può invece avvenire *direttamente*, in modo simile a quanto accade nelle comuni batterie, mediante reazioni isoterme ed isobare all'interno delle *celle a combustibile* (Fuel Cell, FC). Contrariamente a quanto accade nelle macchine convenzionali per la produzione di energia elettrica da combustibili, le FC sono dunque basate su *reazioni elettrochimiche* invece che su processi termofluidodinamici. Questo tipo di reazioni non coinvolge il

passaggio attraverso il calore come forma intermedia di energia come accade nella conversione «energia chimica - calore - lavoro», caratteristica dello sfruttamento della reazione di combustione. Si produce direttamente energia elettrica da energia chimica e non si deve pertanto sottostare alle limitazioni del principio di Carnot. In una tipica cella a combustibile, il combustibile gassoso (p.e. H_2) è fornito con continuità all'anodo (elettrodo negativo, dove avviene l'ossidazione del combustibile e la produzione di elettroni), mentre il comburente (ad es. aria oppure ossigeno) può essere rifornito al catodo (elettrodo positivo, dove avviene la riduzione dell'ossigeno con gli elettroni provenienti dal circuito esterno collegato con l'anodo). La reazione chimica avviene mediante scambio di ioni attraverso l'elettrolita e produce corrente elettrica chiudendo il circuito tra gli elettrodi.



Schema di funzionamento di una cella combustibile

3.1 La classificazione delle celle a combustibile

Le celle a combustibile possono essere *classificate* in base al *tipo di elettrolita* utilizzato:

a) *Celle a combustibile ad elettrolita polimerico (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell,* PEMFC *o* PEFC*; Solid Polymer El. F.C.,* **SPEFC***)*: l'elettrolita è una membrana a scambio ionico (polimero acido sulfonico fluorato tipo NAFION o similari) che è un eccellente conduttore protonico. Gli elettrodi sono porosi impregnati di platino con funzione di catalizzatore. L'unico liquido presente è acqua.

b) *Celle a combustibile alcaline (Alkaline Fuel Cell,* **AFC***)*: l'elettrolita è una soluzione acquosa di KOH, che agisce da conduttore di ioni OH^-. Anodo e catodo consistono in un elettrodo poroso a base di nichel o di carbonio rivestito con vari possibili elettrocatalizzatori (Ag, Pt, Au, Pd, ossidi metallici, spinelli).

c) *Celle ad acido fosforico (Phosphoric Acid Fuel Cell,* **PAFC***)*: l'elettrolita è una soluzione molto concentrata di acido fosforico che agisce da conduttore ionico (ioni H^+) per temperature di funzionamento di 150-220°C risultando nel contempo sufficientemente stabile. Si opera oggi correntemente in acido fosforico puro, trattenuto da una matrice di carburi di silicio, a temperature di circa 200°C. Gli elettrodi sono costituiti generalmente da una matrice porosa rivestita in platino.

d) *Celle a combustibile a carbonati fusi (Molten Carbonate Fuel Cell,* **MCFC***)*: l'elettrolita è usualmente una miscela di carbonati alcalini (Li, Na, K) trattenuta da una matrice ceramica. La cella opera a 600-700°C, temperatura alla quale i carbonati formano un sale fuso altamente conduttivo, con ioni di carbonato CO_3^{--} che permettono la conduzione ionica. A temperature di questo livello non sono necessari metalli nobili (per es. Pt) per svolgere la funzione di elettrocatalizzatori e sono sufficienti elettrodi porosi a base di nichel per promuovere le reazioni.

e) *Celle a combustibile ad ossidi solidi (Solid Oxide Fuel Cell,* **SOFC***)*: l'elettrolita è un ossido solido metallico non poroso, tipicamente un ossido di zirconio stabilizzato con ittrio. La cella opera a temperature comprese tra 650°C e 1000°C, tra le quali ha luogo una sufficiente conduzione ionica tramite ioni di ossigeno O^{--}. Gli elettrodi sono costituiti tipicamente da ossidi di zirconio al cobalto o al nichel (anodo) e da manganite di lantanio drogata con stronzio (catodo).

La tabella 2 riassume le caratteristiche principali dei 5 tipi di cella a combustibile sopra descritti:

tipo / caratteristica	SPEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elettrolita	elettrolita polimerico	soluzione acquosa di KOH	soluzione molto concentrata di acido fosforico H_3PO_4	miscela di carbonati alcalini K_2CO_3,Li_2CO_3	ossido solido metallico ZrO_2
Combustibile	H_2	H_2	H_2, gas naturale, gas di carbone	H_2, gas naturale, gas di carbone	H_2, gas naturale, gas di carbone
Comburente	aria	O_2	aria	aria	aria
Temperatura di funzionamento	80 - 90 °C	ca. 80 °C	150 - 220 °C	600 - 700 °C	650 - 1000 °C
η_{el} della cella	60%	60%	55%	55-65%	60-65%
η_{el} del sistema	ca. 55%	ca. 55%	35 - 42%	48 - 60%	55 - 60%

Tab. 2 – Dati caratteristici delle celle a combustibile
fonte: F. D. Drake

4. L'impiego delle celle a combustibile

Se fino al 1960 le celle a combustibile erano una pura curiosità scientifica, al giorno d'oggi esse trovano o troveranno a breve termine impiego in tre grandi aree:

- Trazione per veicoli
- Alimentazione di reti elettriche (per esempio per case, condomini, ospedali)
- Celle a combustibile miniaturizzate per impieghi portatili (telefoni cellulari, laptop computer)

4.1 Trazione per veicoli

Toyota e General Motors, che insieme producono un quarto delle automobili del mondo, hanno recentemente firmato un accordo per sviluppare alternative ai motori a benzina. Tale accordo comprende anche la realizzazione di veicoli motorizzati con celle a combustibile. Un'intesa simile è stata anche raggiunta da Chrysler e Ford, che producono un altro quarto delle automobili, e Ballard Power System, la società canadese che ha costruito celle a combustibile per uso veicolare. Anche in Europa, le principali case automobilistiche hanno allo studio prototipi di tali veicoli. Uno dei vantaggi dell'uso di celle a combustibile per la trazione di veicoli è il loro rendimento energetico. Dell'energia prodotta dal carburante, la percentuale che risulta effettivamente utilizzabile per il movimento del veicolo è potenzialmente di oltre il 50%. Nei sistemi con motore a benzina si raggiunge al massimo il 40%. Inoltre nel traffico urbano dove l'impiego è quasi sempre a basso carico per la limitata velocità, il rendimento energetico dei veicoli con celle a combustibile risulta circa il doppio delle auto classiche. Infine il materiale di scarico è solo del vapore acqueo. Autoveicoli a celle a combustibile sono dunque vantaggiosi, efficienti e consentono di superare le limitazioni intrinseche dei veicoli elettrici come la limitata autonomia e i lunghi tempi di ricarica delle batterie tradizionali. Sotto il profilo strettamente tecnologico le celle PEMFC e MCFC appaiono le più promettenti per la trazione veicolare.

4.2 Alimentazione di reti elettriche

Numerosi sono i vantaggi che rendono le celle a combustibile idonee per la produzione di energia elettrica. Il loro rendimento, contrariamente a quanto avviene negli impianti elettrici convenzionali, è poco sensibile alle variazioni del carico e indipendente dalla potenza installata. Una centrale a celle a combustibile, inoltre, ha una struttura modulare che può essere realizzata in breve tempo, con la possibilità di accrescere la sua potenzialità in proporzione all'aumento della domanda. A questi vantaggi vanno aggiunti il basso livello di inquinamento ambientale e la scarsa rumorosità. La prima centrale sperimentale a celle a combustibile, con il preciso intento di dimostrare l'impatto ambientale nullo in un centro abitato, è stata realizzata nel 1983 a New York. Va notato che a regime stazionario la cella a combustibile si presta alla cogenerazione, ossia, alla produzione congiunta di elettricità e calore.

4.3 Celle a combustibile miniaturizzate per impieghi portatili

Per giocattoli, telefonini, laptop computer ed altri prodotti di elettronica si fa uso al giorno d'oggi di batterie pesanti e costose. L'alternativa è rappresentata da una cella a combustibile miniaturizzata, con una durata superiore a quella di una batteria Ni-Cd e senza bisogno di ricarica, in quanto basta rimpiazzare in modo rapido il combustibile. Il pregio di una rapida sostituzione del combustibile rende tali celle anche vantaggiose rispetto alle batterie ricaricabili, che spesso vengono confrontate con questa nuova tecnologia. Esse infatti abbisognano tempi di ricarica non brevi. Un altro vantaggio potenziale delle celle a combustibile è dato dai costi. Una batteria Ni-Cd da 20 W possiede una massa di 0.5 kg, dura un'ora e costa 20 $. Una batteria ricaricabile a ioni di litio fornisce la stessa potenza per circa tre ore, ma costa almeno quattro volte di più. Per contro una cella a combustibile alimentata a metanolo potrebbe durare 30 ore e costare appena 2-5 $!

Tuttavia la produzione in massa di una cella a combustibile a costi contenuti rappresenta tutt'oggi un'impresa a dir poco formidabile. Numerosi problemi tecnici devono ancora essere risolti. Prima di tutto c'è da tenere conto dei collegamenti in serie di molte celle elementari e dei sottosistemi necessari per immagazzinare e controllare l'alimentazione del combustibile e dell'ossigeno. La scelta del combustibile è cruciale per tutto lo sviluppo del progetto. L'idrogeno non può essere facilmente utilizzato per prodotti di consumo. In alternativa si possono usare idruri metallici (per esempio il palladio) che hanno la proprietà di assorbire idrogeno gassoso a 0°C, o i più economici idruri organici liquidi (per esempio la decalina $C_{10}H_{18}$). Da molte ricerche è emerso che il metanolo (=CH_3OH), ricco di idrogeno, è la forma chimica migliore.

Fonti bibliografiche Internet
www.svizzera-energia.ch
www.hydrogen.org
www.psi.ch
www.enea.it
www.eren.doe.gov/hydrogen/
www.diebrennstoffzelle.de
www.fuelcells.com