

# Produzione di idrogeno da processi biologici

Giorgio Mario Giacometti

Ordinario di Biochimica, Dipartimento di Biologia, Università di Padova, e-mail: giorgiomario.giacometti@unipd.it

## Introduzione

L'atomo di idrogeno è il più semplice e il più abbondante nell'universo. Sulla terra costituisce i due terzi degli atomi dell'acqua e una notevole proporzione di quelli che compongono gli organismi viventi e le loro vestigia geologiche (i combustibili fossili).

L'idrogeno atomico ha una forte tendenza a formare legami chimici liberando energia. Per questo motivo è praticamente inesistente allo stato libero sulla terra, mentre si trova combinato in moltissime molecole, tra le quali l'acqua è di gran lunga la più abbondante. L'atomo di idrogeno può essere liberato come tale scindendo i legami chimici dei composti che lo legano, ma questo processo richiede energia. Una volta liberati, gli atomi di idrogeno si accoppiano nella molecola biatomica dell'idrogeno gassoso. Si tratta di un gas leggero, molto mobile, difficile da contenere, immagazzinare e trattare in sicurezza in quanto è molto infiammabile e forma una miscela esplosiva con l'ossigeno dell'aria. Può essere liquefatto ma è necessario scendere a  $-253^{\circ}\text{C}$ .

È del tutto evidente che l'impiego dell'idrogeno come comune vettore energetico sarà tutt'altro che semplice.

Il suo grande vantaggio, che giustifica la messa a punto di tecnologie che ne permettano l'introduzione nell'uso comune, è il suo carattere "verde".

Tuttavia, stabilito che l'idrogeno, come gas allo stato libero, non è disponibile in natura e che deve essere prodotto mediante un qualche procedimento, dobbiamo innanzitutto osservare che questo vettore energetico non può essere più rispettoso dell'ambiente di quanto lo sia il processo utilizzato per produrlo. Se avessimo a disposizione un processo, sufficientemente rispettoso dell'ambiente, che ne permettesse la produzione e l'utilizzazione come combustibile, l'idrogeno non avrebbe alcuna controindicazione ambientale essendo acqua pura il prodotto della sua combustione. È questa la grande attrattiva dell'idrogeno come vettore energetico.

Il passaggio dai combustibili fossili all'idrogeno potrebbe ridurre a zero le emissioni nocive nelle grandi città dove l'aria è sempre più irrespirabile.

Certamente tra le molte difficoltà tecniche ed economiche che si frappongono alla realizzazione di un'economia basata sull'idrogeno, quale quella descritta da J. Rifkin<sup>1</sup>, la barriera più seria è la messa a punto di un procedimento per produrlo semplice, economico e rispettoso dell'ambiente. Oggi, la tecnica più semplice ed economica per produrre idrogeno è il *reforming* del gas naturale. Si tratta di utilizzare vapore ad alta temperatura e opportuni catalizzatori per scindere il gas naturale in idrogeno e anidride carbonica. Questo processo, in uso da decenni, recupera in forma di idrogeno circa l'85% dell'energia contenuta nel gas naturale mentre il restante 15% va perduto sotto forma di calore nel processo di *reforming*. Una stima di qualche anno fa pone a circa 1,50 US\$ il costo per produrre la quantità di idrogeno che può rilasciare l'energia equivalente a un litro di benzina. Le tecniche attuali per liberare idrogeno da carbone, petrolio o acqua sono ancora meno efficienti.

Naturalmente, il conto economico può cambiare in misura notevole quando si tenga conto dei costi ambientali; ma qui l'analisi economica diventa difficile e il concetto stesso di "conto economico" perde, a mio avviso, significato. Se, come sembra ormai evidente, ci si deve porre il problema del prospettato esaurimento dei combustibili fossili e della necessità di abbattere l'emissione di anidride carbonica nell'atmosfera, il costo delle nuove risorse energetiche diventa quasi irrilevante e diventa tanto più valido il concetto espresso da Donald Huberts<sup>2</sup>: "L'energia nell'idrogeno sarà sempre più costosa delle sorgenti utilizzate per produrla e potrà essere competitiva soltanto in considerazione dei benefici ad essa associati: aria pulita, abbattimento dell'effetto serra, ecc."

C'è tuttavia da notare che la produzione di idrogeno da combustibili fossili risolve solo parzialmente il problema dell'effetto serra e non risolve quello dell'esaurimento di questi ultimi.

Le tecniche che usano energie alternative come il vento o il sole possono produrre energia elettrica che può essere utilizzata nell'elettrolisi dell'acqua producendo idrogeno senza emissione di anidride carbonica. Questa

sembra quindi essere la strada maestra ma al momento queste tecnologie sono ancora molto costose e poco efficienti dal punto di vista energetico. Disponendo di energia elettrica, che non si può immagazzinare, la conversione a idrogeno permette appunto di conservare l'eccesso di produzione da utilizzarsi nei momenti di assenza di sorgente primaria (di notte o in assenza di vento). Impianti misti di questo tipo sono già operativi in diverse realtà.

La produzione di idrogeno da processi biologici, che utilizzano direttamente l'energia solare senza la conversione intermedia in energia elettrica, è ancora al livello di possibilità futura che necessita di approfondimento teorico e sperimentale. Per questo, da oltre un decennio gli USA e il Giappone e più recentemente la Francia ed altri paesi europei hanno avviato programmi di ricerca in tal senso.

In Italia un analogo progetto di ricerca si è avviato nel 2005 con l'apporto di un finanziamento FISR (Fondo Integrativo Speciale per la Ricerca) nell'ambito del Programma Strategico "Nuovi Sistemi di Produzione e Gestione dell'Energia". Il progetto dal titolo "Metodologie Innovative per la Produzione di Idrogeno da Processi Biologici" si avvale della collaborazione dell'Università di Padova (Capofila del Progetto), dell'Università di Firenze, dell'ENEA Centro di Ricerche Casaccia, e di tre Istituti del CNR: l'Istituto di Chimica Biomolecolare (ICB), l'Istituto di Chimica e Tecnologia dei Polimeri (ICTP) e l'Istituto per lo Studio degli Ecosistemi (ISE).

## Il Progetto Italiano

La produzione biologica d'idrogeno attraverso la bio-fotolisi dell'acqua o attraverso processi di decomposizione di substrati organici è quindi una importante prospettiva per il passaggio da una economia basata sull'uso di combustibili fossili ad un'economia basata sul vettore energetico idrogeno. Tale prospettiva non vuole competere con metodi industriali per la generazione centralizzata, ma si pone nel contesto di una generazione energetica diffusa, con la prospettiva di realizzare impianti dell'ordine di grandezza di 1.000 Nm<sup>3</sup>/giorno. Non trascurando gli ovvi vantaggi ambientali derivanti dall'uso di risorse rinnovabili quali sono luce solare ed acqua nel primo caso e luce solare e substrati organici nel secondo (scarti organici prodotti in continuo dalla nostra civiltà e/o biomasse prodotte per fotosintesi), è evidente che il fattore di successo per la affermazione di queste biotecnologie risiede anche nella accettabilità dei costi di produzione. La letteratura scientifica recente riporta lo stato dell'arte della ricerca in questo campo (1).

La combinazione fermentazione + fotodecomposizione prospetta tassi di produzione dell'ordine di circa 2-4 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> giorno, mentre la bio-fotolisi dell'acqua, a tutt'oggi, ha ottenuto rese di laboratorio molto più basse, dell'ordine di 0,01-0,02 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> giorno. Nonostante ciò molte risorse su scala mondiale sono attualmente investite nella ricerca su questo secondo processo (2).

Il motivo principale di questo impegno è da cercarsi in almeno due considerazioni:

- a) non è ancora stata raggiunta l'efficienza produttiva massima teorica e le conoscenze attuali inducono ottimismo sulla possibilità di raggiungere miglioramenti dell'ordine di due ordini di grandezza, come prospettato dai principali istituti di ricerca internazionali operanti in questo settore;
- b) la bio-fotolisi è un processo "pulito" e richiede strutture impiantistiche più semplici e forse più consolidate dei processi ibridi.

Per ottenere questi risultati è necessario superare due ostacoli: uno a livello biochimico cellulare, che riguarda la sensibilità all'ossigeno dell'enzima idrogenasi, ed uno tecnologico, lo sviluppo di bio-fotoreattori ad alte prestazioni ed a basso costo. Se tali obiettivi fossero raggiunti, si potrebbe produrre idrogeno ad un costo accettabile senza alcun impatto ambientale.

Per quanto riguarda il processo combinato fermentazione + fotodecomposizione, è difficile una stima anche approssimata dei costi, ma va considerato che la degradazione di rifiuti organici ha un costo imprescindibile per la comunità, indipendentemente dalla possibilità di ricavarne energia, e ciò contribuisce all'indiscutibile vantaggio associato alla realizzazione di tale ipotesi.

Molti microrganismi procarioti (batteri) ed eucarioti (microalghe) sono noti come produttori d'idrogeno. Il processo può avvenire in due modi sostanzialmente differenti a seconda che il substrato primario sia materiale organico, già parzialmente ossidato, oppure semplicemente l'acqua. In effetti, il metabolismo dell'idrogeno è probabilmente uno dei più antichi processi della vita. Nei microrganismi esso è mediato da metallo-enzimi, denominati idrogenasi. Sequenze geniche codificanti per queste proteine sono state trovate comunque non solo in microrganismi ma anche in molti organismi superiori incluso *Homo sapiens* (3).

La ricerca sulla produzione biologica di idrogeno è iniziata fin dal 1980 ed ha coinvolto laboratori prestigiosi come quelli dell'University of California a Berkeley, dell'Università di Bonn, del Carnegie Institution di Washington, dell'Oak Ridge National Laboratory e molte agenzie americane ed europee come, ad esempio, l'*International Energy Agency for Biological Hydrogen* ed il *The Netherland Biohydrogen Program*. Da poco più di un anno sono partiti anche un progetto francese ed uno europeo, cui il progetto Italiano si è associato.

Il progetto Italiano si propone di lavorare su ambedue le linee di processo sopraindicate, con l'intendimento che la prima linea (linea 1) costituirà una ricerca più orientata a migliorare procedimenti già esistenti, mentre la seconda (linea 2) avrà anche un carattere di ricerca più fondamentale per ampliare le conoscenze molecolari di base da cui derivare in futuro un procedimento radicalmente nuovo. Contemporaneamente ed in totale coordinamento con le due linee anzidette, il progetto prevede una terza linea (linea 3) per lo sviluppo pilota delle tecnologie impiantistiche necessarie.

## Linea 1

**Identificazione in natura e dimostrazione su scala pilota di processi microbici ibridi per la produzione di idrogeno.**

L'obiettivo principale di questa linea di ricerca è dimostrare ed ottimizzare su scala pilota la produzione d'idrogeno attraverso due processi microbici combinati, che sono la fermentazione e la fotodecomposizione, utilizzando substrati che oggi costituiscono uno scarto e quindi un costo sociale per il sistema paese, ed inserendo il loro trattamento in un contesto di produzione energetica pulita ed innovativa. La fotodecomposizione necessita dei substrati prodotti dalla fermentazione in forma di piccole molecole come acetato, lattato, formato, ecc. La fermentazione è in grado di produrre queste molecole partendo dalla decomposizione di composti organici di vario tipo (reflui civili e/o industriali, rifiuti organici di varia origine, ecc.).

Sono note numerose esperienze nazionali ed internazionali sia su scala di laboratorio che su scala pilota che hanno dimostrato la fattibilità impiantistica (4, 5) e, in alcuni casi, l'efficienza dei due processi separatamente; non sono disponibili però, esempi di dimostrazione di un impianto ibrido in cui i due processi siano coordinati e posti in linea. La parte più innovativa del programma lungo questa linea è la dimostrazione della fattibilità impiantistica di una combinazione stabile dei due processi. Si tratta innanzitutto di analizzare e caratterizzare consorzi batterici naturali ed artificiali per selezionare quelli più promettenti da portare su scala di laboratorio; di caratterizzarne in laboratorio le vie metaboliche e le loro cinetiche. Si potrà così procedere alla ottimizzazione dei processi fermentativi industriali per la produzione di composti organici (per lo più acidi grassi volatili) che possano fungere da substrato per il processo di fotodecomposizione. Si potranno utilizzare processi di digestione anaerobica già consolidati per il trattamento di reflui e rifiuti solidi organici. L'ottimizzazione della produzione di acidi organici dalla digestione anaerobica deve avvenire con la contemporanea inibizione della produzione di metano. Questa può essere



Figura 2 - Fotobioreattore da laboratorio per la produzione di idrogeno da batteri rossi.

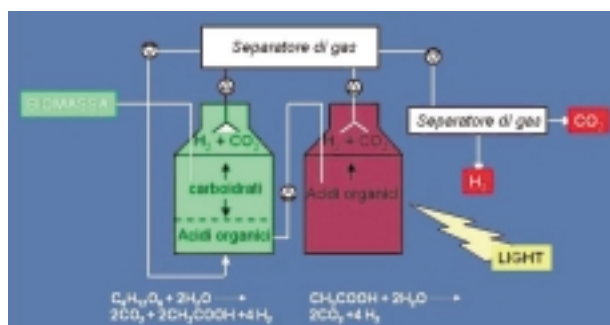


Figura 1 - Schema semplificato di un ipotetico fotobioreattore ibrido.

ottenuta sostanzialmente attraverso variazioni delle condizioni operative di processo. È ben risaputo dalla letteratura che l'inibizione della produzione di metano con conseguente accumulo di composti organici avviene in condizioni termofile (temperature sopra i 55-65°C) o con abbassamento del pH all'interno del reattore; quest'ultimo può essere indotto dall'accumulo di acidi organici prodotti dalla stessa fermentazione (6, 7). Per quanto riguarda il processo di fotodecomposizione mediante l'impiego di batteri fotosintetici rossi non sulfurei, si tratta di ottimizzare il processo sia attraverso la modulazione dei parametri colturali (densità cellulare in funzione dell'intensità luminosa, pH, temperatura, tipo e regime di nutrizione azotata), sia attraverso modificazioni genetiche che portino al superamento dei fattori limitanti il processo di produzione di idrogeno (Figura 1).

La parte più importante di questa linea progettuale è costituita dall'accoppiamento tra i due impianti/processi ossia fermentazione e fotodecomposizione. Quest'ultima è già stata studiata, sia come processo che come configurazione impiantistica, essendo già stati sviluppati, anche nel nostro paese, fotobioreattori con batteri rossi (8), ma rimangono ancora molti aspetti da indagare. I batteri fotosintetici rossi non sulfurei sono comunemente indicati in letteratura come i microrganismi più promettenti per la produzione fotobiologica di idrogeno. Il loro impiego nella produzione di questo gas presenta infatti alcuni significativi vantaggi rispetto all'utilizzazione di altri gruppi microbici, in quanto caratterizzati



da un'alta resa teorica di conversione del substrato e da una grande versatilità metabolica. Essi sono in grado di produrre idrogeno a partire da molti tipi diversi di substrati organici, che includono fanghi di acque reflue di origine industriale (Figura 2). Inoltre, l'utilizzo di questi batteri consente di ottenere, insieme all'idrogeno, altri prodotti di interesse applicativo, quali i polioidrossialcanoati, che possono essere utilizzati come materiale termoplastico biodegradabile, pigmenti carotenoidi di origine naturale, biofertilizzanti, ecc. (9).

La produzione di idrogeno da parte dei batteri fotosintetici rossi non sulfurei è prevalentemente dovuta all'attività di un enzima denominato nitrogenasi, che, in una reazione fortemente dipendente dalla fotosintesi per il rifornimento di ATP e  $\text{NADH}_2$ , riduce i protoni ad idrogeno molecolare. In questo processo, un parziale apporto aggiuntivo alla quantità di idrogeno prodotta può venire dall'attività dell'idrogenasi reversibile, anche se il suo contributo è generalmente poco significativo o addirittura assente; d'altra parte, ci può essere un forte contributo negativo della *idrogenasi uptake*, un enzima che, ossidando l'idrogeno molecolare, consente al batterio il recupero di potere riducente. Nonostante siano stati fatti numerosi progressi nella conoscenza degli aspetti metabolici, molecolari e tecnologici del processo di fotoproduzione di idrogeno da parte dei batteri fotosintetici rossi non sulfurei, molto rimane ancora da indagare per giungere alla individuazione dei ceppi e delle condizioni ottimali di produzione, per individuare le eventuali modificazioni genetiche

dei ceppi naturali che possano portare a significativi miglioramenti del processo e per ottimizzare il disegno dei fotobioreattori (Linea 3) da utilizzare per la produzione del gas. La parte finale di questa linea si propone di valutare efficienza ed economia del processo su scala impiantistica attraverso il confronto con i processi caratterizzati in laboratorio.

## Linea 2

### Produzione di idrogeno dall'acqua mediante microorganismi fotosintetici eucarioti.

Le idrogenasi, che catalizzano la più semplice tra le reazioni chimiche: la riduzione reversibile dei protoni ad idrogeno molecolare, furono scoperte negli anni 30 del '900. Da allora la produzione fotobiologica di  $\text{H}_2$  da parte delle alghe verdi ha costituito un fenomeno di grande interesse scientifico ed applicativo. Le ricerche sul metabolismo fotosintetico dell'idrogeno si trovano oggi ad un punto di svolta. Negli ultimi dieci anni, studi tradizionali di fisiologia e biochimica hanno prodotto un gran numero di informazioni sulle Fe-idrogenasi delle alghe verdi (10). Il numero di geni identificati che codificano per Fe-idrogenasi è oggi arrivato ad una ventina. Ciò, unitamente alla dimostrazione che in particolari condizioni le alghe verdi unicellulari possono dar luogo ad una produzione continua e significativa di  $\text{H}_2$ , ha dato un impulso notevole alla ricerca in questo settore, fornendo nuove importanti informazioni sul metabolismo dell'idrogeno in questi organismi e aprendo nuove prospettive di applicazioni biotecnologiche.

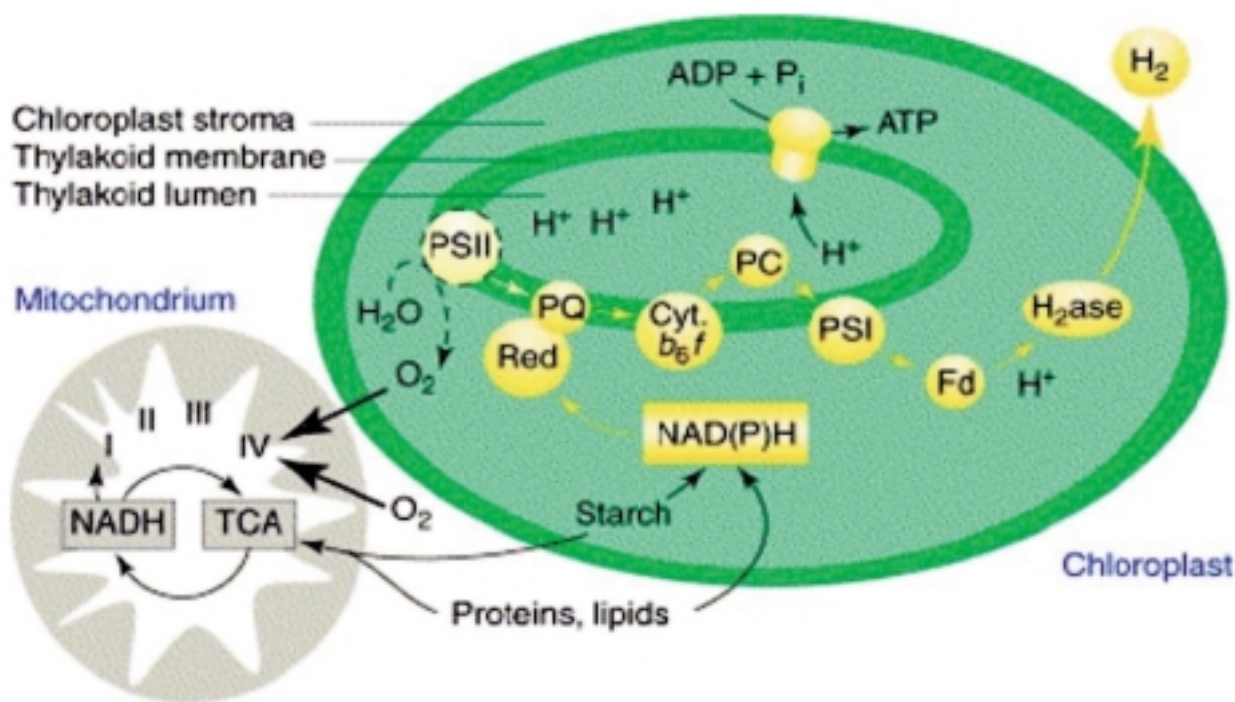


Figura 3 - Schema semplificato delle vie metaboliche coinvolte nella produzione di idrogeno da *C. reinhardtii*.

logiche per la produzione di idrogeno gassoso.

Le alghe verdi unicellulari, in particolare *Clamydomonas reinhardtii*, coltivate in carenza di zolfo, sviluppano idrogeno stabilmente ed in quantità notevole (Figura 3). Recenti dati sperimentali (11) mostrano che 10 litri di coltura algale possono produrre 1-2 litri di  $H_2$ /giorno sostanzialmente puro. La velocità di evoluzione di  $H_2$  aumenta di dieci volte se alla coltura si aggiunge un donatore di elettroni artificiale come il metilviologeno ridotto. Ciò dimostra la potenzialità di questo sistema algale. Tuttavia, al fine di ottenere una produzione di idrogeno significativa dal punto di vista applicativo è necessario affrontare diversi ordini di problemi che possono essere riassunti nei punti che seguono.

## a) Inibizione dell'idrogenasi da parte dell'ossigeno

Gli organismi fotosintetici eucarioti, nel corso della normale attività fotosintetica, trasferiscono elettroni dall'acqua al NADP mediante l'azione successiva dei due fotosistemi PSII e PSI.

Il PSII, ossida l'acqua con evoluzione di ossigeno gassoso. La catena di trasporto degli elettroni liberati nell'ossidazione, alimentata dalla luce, termina con la riduzione della ferredossina da parte del PSI. La ferredossina ridotta è il substrato di due enzimi alternativi:

- i) la ferredossina-NADP riduttasi che, in condizioni normali, trasferisce gli elettroni al NADP che sarà utilizzato nella biosintesi dei carboidrati operata dal ciclo di Calvin;
- ii) la Fe-idrogenasi che trasferisce gli elettroni ai protoni del solvente generando  $H_2$  gassoso.

L'attività di quest'ultimo enzima è fortemente inibita dall'ossigeno assicurando all'organismo il corretto rifornimento di equivalenti di riduzione, in forma di NADPH, per le riduzioni biosintetiche. Per questo motivo l'evoluzione di  $H_2$  gassoso si osserva, in condizioni normali, soltanto per un breve periodo dopo un adeguato adattamento al buio di una coltura non esposta all'ossigeno atmosferico (condizioni di anaerobiosi indotte dalla respirazione cellulare). L'evoluzione di idrogeno cessa non appena l'attività del PSII produce una quantità di ossigeno sufficiente a inibire l'idrogenasi.

Un buon successo nell'evitare l'inibizione da parte dell'ossigeno è stato ottenuto separando temporalmente l'evoluzione di ossigeno (fase aerobica) dall'evoluzione di idrogeno (fase anaerobica) della coltura. Il metodo utilizzato dal gruppo di Berkeley è quello della deprivazione di zolfo. In assenza di questo fattore essenziale nel mezzo di coltura, la cellula non è in grado di riparare continuamente il PSII come necessario, quando esposta alla luce, per contrastare il fenomeno della fotoinibizione. In queste condizioni si ha una rapida perdita di attività di questo fotosistema, mentre l'ossigeno viene consumato dalla respirazione mitocondriale, realizzando le con-

dizioni di anaerobiosi che permettono l'evoluzione di idrogeno. Nel seguito esporremo la proposta di un metodo alternativo alla deprivazione di zolfo che dovrebbe permettere di migliorare la resa nella produzione di idrogeno gassoso di un fattore, non prevedibile al momento, ma sicuramente importante.

Un secondo approccio che contribuirà al superamento del problema della sensibilità dell'idrogenasi all'ossigeno è quello di modificare l'enzima mediante metodi di ingegneria genetica per produrre ceppi cellulari più tolleranti all'ossigeno. Tale approccio prevede uno studio approfondito delle proprietà strutturali e funzionali dell'enzima che deve essere affrontato attraverso tutte le metodiche chimico-fisiche oggi disponibili.

## b) Scarsa penetrazione della luce all'interno di una coltura concentrata di microalghe

L'antenna fotosintetica, ossia il corredo di proteine leganti clorofille e carotenoidi associato a ciascun fotosistema, si è evoluta negli organismi ossigenici per catturare l'energia luminosa e trasmetterla ai rispettivi centri di reazione con la massima efficienza. Vi sono, nei ceppi *wild type*, oltre 400 clorofille e 90 carotenoidi per coppia di fotosistemi costituendo una sezione d'urto per l'assorbimento dei fotoni incidenti molto elevata che garantisce il rifornimento di eccitazione ai centri di reazione anche in condizioni di luce molto bassa. Ciò costituisce una severa limitazione alla possibilità di illuminare le cellule all'interno di una coltura concentrata che pertanto risulteranno fotosinteticamente inattive. Questo problema sarà affrontato con l'intento di ridurre l'efficienza dell'antenna fotosintetica attraverso manipolazioni genetiche dell'organismo.

## c) Concentrazione cellulare dell'idrogenasi

L'espressione dell'enzima idrogenasi nello stroma del cloroplasto viene promossa da condizioni di anaerobiosi. È chiaro che la concentrazione dell'enzima è un fattore importante nel determinare la velocità di evoluzione di idrogeno a parità di altre condizioni. Un altro obiettivo del progetto è pertanto quello di realizzare una sovraespressione dell'enzima che amplifichi il processo nelle condizioni di anaerobiosi senza interferire nel trasporto di elettroni fotosintetico durante la fase aerobica.

La strategia per affrontare i problemi su esposti è quella di applicare le metodiche di ingegneria genetica e biologia molecolare per ottenere mutanti geneticamente modificati in grado di superare le limitazioni insite nei fattori citati. Tra questi il più importante è quello che riguarda l'inibizione della attività idrogenasica da parte dell'ossigeno.

L'ingegnerizzazione di un ceppo di *Clamydomonas reinhardtii* che esprima alte concentrazioni di una idrogenasi resistente all'ossigeno e dotata di un complesso antenna ridotto permetterebbe di ottenere una

produzione di idrogeno sensibilmente più elevata rispetto a quella ottenuta dai ceppi *wild type* e molto più prossima al limite teorico per la trasduzione fotosintetica dell'energia luminosa.

## Linea 3

### Sviluppo di fotobioreattori ad alta efficienza per la produzione d' idrogeno

Lo scopo di questa linea di ricerca è quello di ottimizzare l'efficienza di trasformazione della luce in colture massive, all'aperto, di microalghe e batteri fotosintetici non sulfurei candidati per la produzione d'idrogeno. A tale scopo devono essere sperimentati nuovi disegni di fotobioreattori in cui sia possibile incrementare l'efficienza di trasformazione dell'energia luminosa. Infine, si prevede di disegnare, costruire e sperimentare un fotobioreattore pilota ad elevata prestazione per la produzione biologica d'idrogeno.

Un notevole numero di esperimenti effettuati all'aperto con vari ceppi di cianobatteri e microalghe ha dimostrato che, per rendere economicamente conveniente il processo di produzione di microalghe per varie applicazioni industriali, inclusa la produzione d'idrogeno, è necessario colmare in modo sostanziale il gap esistente fra l'efficienza fotosintetica attualmente raggiungibile, che in colture di microalghe in bacini aperti è circa il 2-3%, e l'efficienza teorica ritenuta essere del 20%. Un notevole incremento di efficienza è stato ottenuto, in anni recenti, con l'adozione del sistema chiuso basato sull'impiego di fotobioreattori generalmente tubolari in cui è stato possibile ottimizzare il processo di produzione di microalghe secondo il principio delle fermentazioni industriali. I pionieri in questo campo è stato il Centro di Studio dei Microorganismi Autotrofi del CNR di Firenze con lo sviluppo negli anni '80 di un fotobioreattore per la coltura massiva di *Spirulina* (13). Con l'adozione di questo sistema di coltura è stato possibile ottenere un migliore controllo dei parametri colturali (es. temperatura, pH, circolazione della coltura). Con l'impiego di fotobioreattori tubolari l'efficienza di trasformazione della luce in colture di microalghe all'aperto è stata innalzata a circa 6-7%.

Un notevole numero di studi condotti in differenti laboratori indicano che l'attuale gap ancora esistente fra resa attuale e resa teorica è dovuto principalmente ai limiti imposti alla crescita dal cosiddetto "effetto di saturazione della fotosintesi". È infatti ben noto che il tasso di crescita degli organismi fotosintetici, esposti a crescenti intensità luminose, incrementa prima linearmente (parte in cui la crescita è fotolimitata), e successivamente, dopo una fase di transizione più o meno brusca, viene raggiunto il livello di saturazione della crescita. A questo punto corrisponde il minimo tempo di raddoppiamento e il massimo tasso di crescita della coltura. Un ulteriore incremento della quantità di luce non determina alcun incremento di crescita e l'eccesso di energia luminosa è dissipata sotto forma di calore e in parte sotto forma di fluorescenza. Comunque, se la capacità di dissipazione è superata si creano condizioni di "fotoinibizione" risultante in una riduzione di crescita. Un notevole numero di

osservazioni ha indicato che la crescita della maggior parte delle microalghe è saturata a circa 1/10 dell'intensità luminosa massima misurata all'aperto in pieno giorno che è di circa 2000 mmol fotoni  $m^{-2}s^{-1}$ . Ne consegue che nelle ore centrali del giorno, fino al 90% della luce fotosinteticamente attiva può essere dissipata. Misure di fluorescenza della clorofilla effettuate su colture *in situ* confermano queste osservazioni. Inoltre le condizioni di forte illuminazione possono creare le condizioni di fotoinibizione della fotosintesi. L'incidenza negativa della fotoinibizione sulla crescita della coltura incrementa notevolmente quanto le condizioni colturali sono lontane dall'ottimale. Per esempio la coincidenza di bassa temperatura ed elevata illuminazione nelle prime ore del mattino molto spesso determinano le condizioni ideali per l'insorgenza della fotoinibizione con conseguenti riflessi negativi durante il resto del giorno (14).

La consapevolezza dei limiti imposti alla crescita dall'effetto di saturazione e dalla fotoinibizione ha spinto gli esperti del settore a studiare alcune soluzioni per eliminare o almeno ridurre l'effetto in colture all'aperto. Fondamentalmente sono state proposte le seguenti soluzioni:

- a) forte aumento della concentrazione cellulare e del grado di turbolenza delle colture (15);
- b) uso di speciali disegni di fotobioreattori in cui è possibile migliorare l'esposizione delle cellule alla luce (15,16);
- c) uso di ceppi con ridotte dimensioni dell'antenna fotosintetica (17, 18).

I primi risultati indicano che con le soluzioni a) e b) è possibile ottenere incrementi di resa, tuttavia il maggior costo dei fotobioreattori o della richiesta energetica necessaria per agitare vigorosamente le colture rendono meno attraente queste soluzioni dal punto di vista economico. Il punto c), cioè riduzione delle dimensioni dell'antenna proposto nella linea 2 di questo progetto, appare molto promettente e i primi dati riportati in letteratura sono incoraggianti.

In questo progetto saranno sperimentati nuovi disegni di fotobioreattori in cui sarà possibile realizzare un notevole incremento di resa in produzione di idrogeno per unità di superficie. Prevediamo inoltre di sperimentare un disegno di fotobioreattore concepito in modo innovativo rispetto a quelli finora sperimentati.

L'innovazione consiste nella progettazione separata della parte di cattura della luce da quella di coltura. Finora infatti, il fotobioreattore ha funzionato sia come superficie captante della luce solare che come recipiente di crescita. Prevediamo di raccogliere e concentrare l'energia luminosa con pannelli solari e successivamente canalizzarla alla coltura distribuendola con intensità ottimale, cioè inferiore alla saturazione, in modo da ottenere un innalzamento dell'efficienza di trasduzione della luce. La separazione dei due processi permetterà di installare i pannelli di raccolta della luce in terreni scoscesi o aridi, comunque difficili per l'agricoltura tradizionale e di collocare il fotobioreattore all'interno di un fabbricato dove è possibile controllare in modo agevole il processo di produzione d'idrogeno. Preliminari studi indicano che è possibile incrementare l'efficienza fotosintetica a circa il 15% cioè tre volte superiore rispetto al valore attualmente ottenuto.



L'adozione di questa tecnologia nel campo della coltura delle microalghe dovrebbe facilitare lo *scale-up* del fotobioreattore risolvendo uno dei colli di bottiglia che ha limitato il loro sviluppo su scala industriale per la produzione di biomasse microalgali anche per altri scopi (19) (Figura 4).

## Conclusione

Lo scrivente e tutti i ricercatori coinvolti nel progetto, qui sommariamente delineato, sono perfettamente consapevoli delle notevoli difficoltà a livello di elaborazione teorica e implementazione tecnologica insite in questo ambizioso programma, ma confidano che, alla fine del triennio previsto, i risultati conseguiti possano almeno parzialmente colmare il ritardo che la ricerca italiana ha accumulato in questo campo rispetto agli altri paesi tecnologicamente avanzati.



Figura 4 - Coltivazioni di microalghe, cianobatteri e batteri rossi alle Hawaii.

## Bibliografia

1. Das (2001) *Int. J. of Hydrogen Energy* 26, 13-28; Boichenko (2002) In *Photoconversion of Solar Energy: Molecular to Global Photosynthesis* (M.D. Archer and J. Barber, Eds.) Vol.2. Imperial College Press, London
2. Melis (2002) *International Journal of Hydrogen Energy*. 27, 1217-1228
3. Vignais (2001) *FEMS Microbiology Reviews* 25, 455-501
4. Miyake (1990) In: "Hydrogen energy progress; Proceedings 8th WHEC, Hawaii" (Veziroglu ed. ), Pergamon Press, New York
5. Singh (1994) *Int J Hydrogen Energy* 19:437-40
6. Henze (2000) *Wastewater treatment: Biological and chemical processes* Springer-Verlag, Berlin
7. Rittmann (2001) *Environmental Biotechnology: Principles and applications* McGraw-Hill, New York
8. Vincenzini (1981) *Experientia* 37, 710-711
9. Sasikala (1995) *Adv. in Appl. Microbiol.* 41, 227-278
10. Happe (2002) *Trends in Plant Sci.* 7, 246-250
11. Melis (2001) *Plant Physiol.* 127, 740-748
12. Giacometti (2002) *Spectroscopic Techniques in Biophysics*, IOS Press, Amsterdam
13. Torzillo (1986) *Biomass*, 11, 61-74; Tredici (1999). In: *Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis and Bioseparation Vol.1* (Flickinger and Drew Eds), Wiley, New York, pp. 395-419
14. Vonshak (2001) *Plant Cell and Environment*, 24, 1113-1118
15. Carozzi (1996) *Applied Microbiol. Biotechnol.* 45, 18-23
16. Muller-Feuga (2002) In: *9th International Conference on Applied Algology*, Aquadulce de Mar, Almeria (Spain), 26-30 May
17. Nakajima (2000) *J. Appl. Phycol.*, 12, 285-290
18. Neidhardt (1998) *Photosynth. Res.*, 56, 175-184
19. Torzillo (2003) In: *Recent Advances in Marine Biotechnology* (Fingerman & Nagabhushanam Eds.), Science Publishers of Enfield, New Haven

## Note

<sup>(1)</sup> J.Rifkin, *The Hydrogen Economy*, Penguin Putnam Inc., New York 2002.

<sup>(2)</sup> D. Huberts, (alto dirigente di ShellHydrogen), audizione alla U.S. House Science Committee, marzo 2004. □

# Piattaforma tecnologica europea per l'idrogeno e le celle a combustibile

## Presentazione della visione strategica di HFP

### **Idrogeno e celle a combustibile: l'energia del futuro**

Nel gennaio 2004, a seguito delle raccomandazioni dell'*High Level Group*, la Commissione europea ha stabilito la *European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform* – HFP (Piattaforma tecnologica europea per l'idrogeno e le celle a combustibile), una partnership con oltre 300 attori. Lo scopo è di preparare e dirigere un piano strategico che faccia da ponte tra l'idrogeno e le celle a combustibile e il mercato, per lo sfruttamento del loro notevole potenziale ambientale ed economico.

Un Consiglio esecutivo formato da 35 rappresentanti provenienti dall'industria, dalla Commissione europea, dall'autorità pubblica, dall'università e da organizzazioni non governative è stato posto alla guida di questa attività, con l'ausilio di altri enti. A due comitati direttivi è stato affidato il compito di pianificare rispettivamente una *Strategic Research Agenda* - SRA (Agenda strategica di ricerca) e una *Deployment Strategy* – DS (Strategia di realizzazione) al fine di condurre la transizione.

Questo rapporto fornisce una visione d'insieme strategica dei "lavori in corso". Ulteriori dettagli sono forniti negli *Executive Summaries* dei documenti della Fondazione della *Strategic Research Agenda* e della *Deployment Strategy* (entrambi i documenti della Fondazione sono stati approvati dal Consiglio nel dicembre 2004).

### **Il caso delle tecnologie dell'idrogeno e delle celle a combustibile**

Il risparmio energetico prodotto dall'uso dell'idrogeno e delle celle a combustibile non è mai stato così convincente: prezzi del petrolio oscillanti, surriscaldamento della crosta terrestre e allarmante crescita della domanda di petrolio sottolineano la vastità e l'urgenza di una sfida energetica a livello mondiale.

L'idrogeno è ora largamente conosciuto come vettore di energia versatile e pulito che non solo può ridurre sostanzialmente le emissioni di gas serra (GHG) e migliorare la qualità dell'aria locale, ma anche aumentare la sicurezza e la fornitura di energia, con significativi benefici, in particolare, per il settore dei trasporti.

Inoltre esso sarà di aiuto alla stabilizzazione dei prezzi e alla creazione di enormi opportunità per la crescita economica attraverso nuovi affari ed industrie per le apparecchiature. Ciò significa notevoli opportunità per il trasferimento tecnologico in altri paesi industrializzati, al fine di far fronte al notevole aumento di domanda di energia, a cui solitamente non corrisponde un aumento adeguato di emissioni.

La tecnologia dell'idrogeno e delle celle a combustibile, quindi, è perfettamente adatta alla strategia europea del raggiungimento di un'economia energetica sostenibile attraverso risorse energetiche interne (rinnovabili) e locali. In tutto ciò l'idrogeno fa da complemento all'energia elettrica con l'aumento dell'immagazzinamento e la facilitazione dell'integrazione di energia elettrica non distribuibile nel mercato dell'energia.

La produzione di idrogeno per uso industriale è assai diffusa, ma le celle a combustibile sono la tecnologia d'applicazione primaria per nuove opportunità. Altamente efficienti e virtualmente silenziosi, questi convertitori di energia pulita possono adattarsi ad una vasta gamma di applicazioni di consumo energetico, inclusi piccoli dispositivi portatili, piccoli e grandi sistemi a ciclo combinato energia-calore (CHP) e trigenerazione, così come applicazioni nel trasporto stradale, ferroviario e aereo.

### **Punti cruciali**

- Come vettore di energia secondario, l'idrogeno può essere prodotto da una grande varietà di fonti energetiche primarie, accrescendo così la sicurezza energetica attraverso una crescente diversificazione. Idrogeno ed elettricità sono vettori energetici complementari.



- L'idrogeno è adatto ad una vasta gamma di applicazioni di massa, inclusi trasporto ed energia elettrica, sia residenziali che industriali.
- La visione a lungo termine è dovuta alla significativa penetrazione entro il 2030-2050 dei percorsi della produzione dell'idrogeno senza anidride carbonica/neutro, massimizzando così la riduzione di gas serra e altre sostanze inquinanti.
- Le future catene dei prezzi dell'idrogeno e delle celle a combustibile saranno commercialmente attuabili una volta che le richieste di prestazione, durabilità e costi - sia delle celle a combustibile che della produzione di idrogeno e della catena distribuzione - saranno state soddisfatte.

## Scopo della strategia di ricerca e di intervento

L'energia è strettamente legata ai bisogni primari della società moderna. Essa deve essere largamente disponibile, a buon mercato e pulita per giustificare il suo uso di massa e fondamentale. Una strategia di ricerca e di intervento, quindi, ha bisogno non solo di tutti questi requisiti ma anche di un potenziale tecnico ed economico - e limitazioni - delle tecnologie in oggetto.

La sfida chiave sarà un uso più efficiente dal punto di vista economico delle fonti energetiche primarie disponibili in Europa - combinato con idrogeno e celle a combustibile - al fine di realizzare il prima possibile un impatto sul cambiamento climatico e una sicurezza energetica, mentre si promuovono la competitività industriale e la crescita economica.

La strategia della Piattaforma è stata programmata per:

- rappresentare una piattaforma globale, realistica e stimolante per la ricerca, dimostrazione e realizzazione che mobiliterà gli attori e affermerà che le competenze europee sono all'avanguardia nel settore della scienza e tecnologia a livello mondiale;
- incoraggiare le associazioni pubblico-private e stimolare l'investimento nell'innovazione tecnologica e nel futuro del mercato;
- fornire orientamento e guida sulla politica.

Viene presa in considerazione anche l'imminente uscita del 7° Programma Quadro di ricerca della Commissione europea e successivi programmi, oltre al bisogno di coordinare l'attività di ricerca e sviluppo e dimostrazione, intervento e finanziamento. A questo scopo sono necessarie:

- un'esperienza fondamentale di 10 anni sui programmi di ricerca e dimostrazione, i cui obiettivi siano schierati dalla parte della strategia di intervento;
- una strategia di intervento che indichi le pietre miliari e gli obiettivi di penetrazione del mercato - "Snapshots 2020";
- una previsione a medio termine entro il 2030 e una strategica a lungo termine entro il 2050.

Vengono definite, inoltre, le priorità di investimento nella ricerca, sviluppo, dimostrazione e attuazione tenendo conto dei punti di forza e debolezza dell'Europa, e più tardi nello sfruttamento industriale.

## Raggiungere il traguardo del 2050

Ci si aspetta che entro il 2050 la competitività del costo dell'idrogeno sia largamente disponibile nei paesi industrializzati. L'idrogeno non servirà solo come maggiore carburante per il trasporto, ma sarà complementare all'energia elettrica derivata da fonti di energia rinnovabili, allo scopo di soddisfare la richiesta di energia con un'adeguata produzione di energia.

L'idrogeno come carburante avrà sempre più importanza nel settore delle applicazioni stazionarie - generazione di energia centralizzata e distribuita - mentre una rete estesa di condutture collegherà nuovi siti di produzione su larga scala. Si prevede che il trasporto su strada di idrogeno liquido o gassoso e la produzione complementare di idrogeno sul posto prevarranno in certi segmenti di mercato.

Entro quella data, i sistemi di celle a combustibile per trasporti, e le applicazioni stazionarie e portatili dovrebbero diventare tecnologie mature e competitive. Sebbene probabilmente essi consumeranno prevalentemente idrogeno, poco probabilmente dipenderanno da un solo carburante. Le celle alimentate da combustibili vari sono un'importante innovazione che ci si aspetta essere largamente disponibile in combinazione con i sistemi per la trasformazione per certe applicazioni al settore del trasporto.

La storia ci insegna che i vari avvicendamenti di carburanti - dal legno, al carbone, al petrolio, al gas - hanno richiesto 40-50 anni; eppure sono già sorpassati. Esistono ragioni economiche, ambientali e geopolitiche convincenti per credere che presto l'idrogeno prenderà il posto dei vecchi carburanti.

Per prima cosa l'Europa ha bisogno di migliorare le tecnologie e stabilire la catena di fornitura - componente chiave dell'*Europa della conoscenza* da sviluppare sotto il 7° Programma Quadro di Ricerca (7PQ).

## "Snapshots 2020"

La *Deployment Strategy* riconosce gli "Snapshots 2020" come pietre miliari chiave e livelli illustrativi di penetrazione del mercato per applicazioni portatili, stazionarie e del settore del trasporto per l'idrogeno e le celle a combustibile entro il 2020.

Gli "Snapshots 2020" corrispondono anche alle raccomandazioni della *Strategic Research Agenda* che propone un piano di sviluppo tecnologico prioritario e di riferimento per il periodo 2005-2015. Ciò è stato pianificato allo scopo di lanciare tecnologie sperimentate, lasciando

tempo per lo sviluppo del prodotto e le fasi di produzione necessarie ai livelli di penetrazione del mercato previsti negli "Snapshots 2020", essenziali per la distribuzione di prodotti sicuri, di alta qualità ed affidabili.

Ci si aspetta che la penetrazione del mercato sia dominata inizialmente – ma non esclusivamente – dal settore di piccoli dispositivi portatili con la funzionalità aggiunta (se paragonata alle batterie ricaricabili) di stoccaggio di energia ad alta densità convenientemente rifornibile. Ciò fornirà la conoscenza e la base industriale per sistemi portatili più grandi e applicazioni stazionarie più piccole. Questo aprirà i primi mercati entro il 2010 per la cogenerazione, sistema combinato energia-calore, studiata per abitazioni singole e piccoli ambienti commerciali.

Grandi sistemi stazionari di celle a combustibile combinati energia-calore, resi ibridi con l'installazione di turbine a gas per aumentarne l'efficienza, entreranno probabilmente nel mercato tardi, tra il 2010 e il 2015. L'ingresso di massa nel mercato del trasporto su strada alimentato a idrogeno è previsto per il 2015-2020. La **tabella 1** indica lo stato di realizzazione delle applicazioni entro il 2020 espresse in numeri di unità vendute all'anno e le proiezioni di vendite cumulative.

## Acquire la leadership tecnologica

Dieci anni di programmi di ricerca, sviluppo, dimostrazione e attuazione ben mirati sono necessari per colmare il divario tra la tecnologia e la commercializzazione:

- ridurre i costi delle celle a combustibile ad un fattore che va da 10 a 100 (dipende dall'applicazione) e accrescere le prestazioni e la durabilità degli impianti di celle a combustibile ad un fattore di 2 o più. I miglioramenti dei materiali sono la chiave di svolta per ottenere costi e prestazioni prestabiliti per molte applicazioni
- sviluppare le tecnologie per la produzione di massa di stack e sistemi di celle a combustibile
- ridurre la produzione di idrogeno e i costi di distribuzione ad un livello comparabile ai combustibili fossili, che implicano una riduzione fino al fattore 3

o più. Ciò prevede lo sviluppo di tecnologie che fanno da ponte con i combustibili fossili, fondamentale per l'ingresso nel mercato e per certe applicazioni anche a lungo termine. Le tecnologie per la trasformazione dei combustibili fossili aprono così la strada ai futuri combustibili rinnovabili e al biogas. Questo dovrebbe essere legato alla ricerca sulla captazione e immagazzinamento dell'anidride carbonica derivante dalla produzione di idrogeno dai combustibili fossili. I costi e la fattibilità di opzioni di infrastrutture per la distribuzione hanno bisogno di essere ben capiti, condutture comprese.

- iniziare l'attività di ricerca per una futura produzione di idrogeno su larga scala da fonti rinnovabili di energia e senza anidride carbonica
- ricercare materiali e criteri innovativi per l'immagazzinamento dell'idrogeno allo scopo di ottenere quantità sufficienti per la gamma dei veicoli in circolazione e le esigenze di assemblaggio. I criteri di sviluppo sono le densità di immagazzinamento e i costi, più l'efficienza del percorso energetico.

## Joint Technology Initiative (Iniziativa tecnologica congiunta)

Il 7° Programma Quadro propone il concetto di *Joint Technology Initiative* (Iniziativa Tecnologica Congiunta) o JTI per indirizzare queste sfide di ricerca e sviluppo e quelle che stanno nascendo dall'integrazione dei materiali, componenti, sistemi, processi di produzione e riciclo. La JTI dovrebbe includere inoltre:

- attività integrate di ricerca e dimostrazione, con opportunità per implementare i "Lighthouse Projects";
- misure di incoraggiamento per le PMI innovative e la formazione di ricercatori.

Il fine della JTI è di garantire un impegno da parte dell'industria, generare una massa critica di ricercatori e dare fiducia alla comunità finanziaria. Fondata su una struttura di pubblico-privata, dovrebbe fungere da catalizzatore per lo sviluppo di tecnologie insieme all'emergente industria delle apparecchiature e la catena di fornitura energetica. Una struttura chiara, dal governo

Tabella 1 - Ipotesi chiave sulle applicazioni di idrogeno e celle a combustibile per lo scenario del 2020

	Celle a combustibile portatili, per dispositivi elettronici a mano	Generatori portatili e primi mercati	Celle a combustibile stazionarie, ciclo combinato energia-calore (CHP)	Trasporto su strada
UE H2/FC Proiezione 2020 unità vendute all'anno	~ 250 milioni	~ 100.000 (~ 1GW <sub>e</sub> )	da 100.000 a 200.000 (2-4 GW <sub>e</sub> )	da 0,4 milioni a 1,8 milioni
UE Proiezioni cumulative di vendita fino al 2020	?	~ 600.000 (~ 6 GW <sub>e</sub> )	da 400.000 a 800.000 (8-16 GW <sub>e</sub> )	1-5 milioni
UE Stato del mercato atteso per il 2020	stabile	stabile	in crescita	ingresso di massa nel mercato
Energia media in sistemi di celle a combustibile	15 W	10 kW	<100 kW (micro CHP); >100 kW (CHP industriale)	
Costo previsto di sistemi di celle a combustibile	1-2 € / W	500 € / kW	2.000 € / kW (Micro CHP); 1.000-1.500 € / kW (CHP industriale)	<100 € / kW (per 150.000 unità all'anno)

efficiente dovrebbe dirigere le operazioni della JTI verso progetti mirati ad uno scopo ben preciso. La JTI dovrebbe accrescere le opportunità per una collaborazione internazionale – agendo come interfaccia europea per la *International Partnership for a Hydrogen Economy* IPHE (Partnership internazionale per una economia dell'idrogeno) (vedere riquadro e figure).

## *I Lighthouse Projects colmano il divario*

La JTI include lo sviluppo di *Lighthouse Projects*. Questi progetti integrati di ricerca e dimostrazione giocheranno un ruolo cruciale nel colmare il divario tra i progetti di ricerca e dimostrazione e la commercializzazione, e nel preparare il quadro pubblico necessario (inclusi regolamenti, codici e norme, e criteri di sostenibilità).

I *Lighthouse Projects* dovrebbero essere coerenti con la futura pianificazione di integrazione dell'idrogeno prodotto dalle fonti energetiche legate all'anidride carbonica e fornire opportunità per la sperimentazione delle tecnologie delle celle a combustibile nelle applicazioni sui trasporti stradali, marittimi e aerei, così come nelle applicazioni a sistemi stazionari piccoli o grandi a ciclo combinato energia-calore.

Proiezioni dettagliate dell'industria automobilistica e fornitori di carburante sull'aumento di produzione di veicoli e infrastrutture di idrogeno dovrebbero essere usate per guidare la grandezza e la durata dei *Lighthouse Projects* come componenti essenziali della *Deployment Strategy*.

In questo modo, tutte le tecnologie chiave di un'economia dell'idrogeno possono essere sviluppate per un mercato maturo contemporaneamente con la creazione di primi mercati, così che si possano prendere decisioni sulla produzione di massa.

Le raccomandazioni suggeriscono di:

- concentrarsi su un numero limitato di progetti su vasta scala, principalmente rivolti alle applicazioni sui trasporti e altre rilevanti applicazioni per il massimo della sinergia;
- selezionare "le comunità dell'idrogeno" con i primi mercati e le applicazioni stazionarie di celle a combustibili come motore principale;
- svolgere attività di *networking* e di coordinamento nelle diverse regioni e cluster al fine di dimostrare e definire in modo logico "il comportamento del mondo reale";
- selezionare appropriati siti dimostrativi esistenti che supportino gli obiettivi sopracitati e permettano un rapido inizio ed espansione;
- incoraggiare la crescita progressiva e l'espansione verso altre regioni;
- progettare meccanismi finanziari appropriati e strumenti per facilitare questo sviluppo chiave;
- costruire una cooperazione con iniziative complementari, come la *International Partnership for the Hydrogen Economy* (IPHE).

## *Impegno politico e ricerca socio-economica*

L'impegno politico sarà uno dei fattori chiave per incoraggiare lo sviluppo tecnico così come la gestione della consapevolezza e consenso pubblici. Infatti, l'inattività del governo avrebbe un effetto negativo, non neutrale.

Ciò necessita il supporto di una ricerca socio-economica, progettata per analizzare l'impatto economico e ambientale prodotto dalla penetrazione dell'idrogeno e delle celle a combustibile. Questo fornirà a coloro che prendono le decisioni politiche un orientamento strategico sull'efficienza economica delle diverse produzioni di idrogeno e un percorso per la massimizzazione delle riduzioni dei gas serra e per la sicurezza energetica.

## *Spesa cumulativa per ricerca e dimostrazione*

Al fine di misurarsi con la competizione, è cruciale che la spesa cumulativa per ricerca e dimostrazione mirata all'idrogeno e celle a combustibile, si misuri almeno con i livelli attuali di finanziamento di ricerca e sviluppo dei maggiori competitori globali, che è pari a 250 milioni di €/anno, il doppio dello sforzo attuale.

La JTI sarebbe un'opportunità per coordinare/influenzare i finanziamenti da varie fonti, inclusi i finanziamenti strutturati della Banca Europea per gli Investimenti (es. per alcune specifiche dimostrazioni legate ai primi mercati di nicchia).

## *Finanziamenti*

La questione di come finanziare lo sviluppo e la realizzazione dell'idrogeno e delle celle a combustibile è cruciale. Poiché queste tecnologie sono potenzialmente dirompenti, strategie pulite, coerenti con gli incentivi proporzionati ai benefici, sono essenziali per convincere sia l'industria che la comunità finanziaria all'investimento.

Se aspettiamo che siano le forze di mercato a venire al dunque, si dovrà attendere più a lungo per ottenere questo risultato. Così come regimi di supporto finanziari attuali, anche strumenti finanziari più flessibili, dinamici e innovativi sono richiesti.

La storia ci insegna che quando si giunge a tecnologie disgregative, alcune delle strategie chiave e delle conquiste tecnologiche sono realizzate da società startup e altre piccole medie aziende. Inoltre, piccole aziende migreranno verso regioni dove gli incentivi sono disponibili e dove il clima per gli investimenti è più favorevole. Dovrebbero essere sviluppati anche gli strumenti finanziari, che danno loro accesso ad un equo finanziamento.

Oltre al significativo rafforzamento del budget per i programmi di ricerca e sviluppo tecnologico, altri



## Adesioni e associazioni alla Joint Technology Initiative (JTI)

Nel gennaio 2006, la Commissione Europea e la segreteria di HFP hanno ricevuto 123 manifestazioni di interesse a divenire membri del JTI (56), o ad associarsi allo stesso (67).

L'analisi delle manifestazioni di interesse conduce ad affermare il largo interesse, soprattutto delle aziende ad entrare nell'economia dell'idrogeno attraverso JTI.

La stessa Piattaforma HFP conta 300 partecipanti per un portafoglio progettuale di circa 600 milioni di €, provenienti sia dal pubblico che dal privato.

Nelle figure 1 - 3 l'analisi delle manifestazioni di interesse.

La Germania e l'Italia sono gli Stati dai quali arriva il maggior numero di manifestazioni di interesse per le attività del JTI.

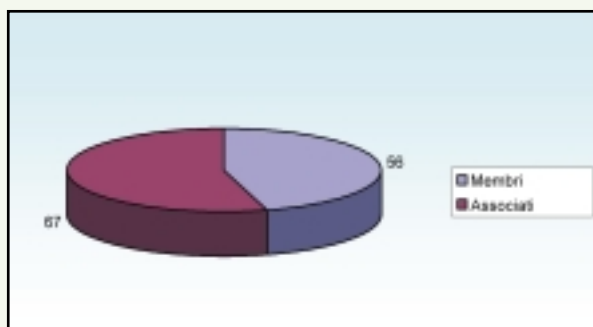


Figura 1 - Analisi delle manifestazioni di interesse per divenire membri o associati al JTI

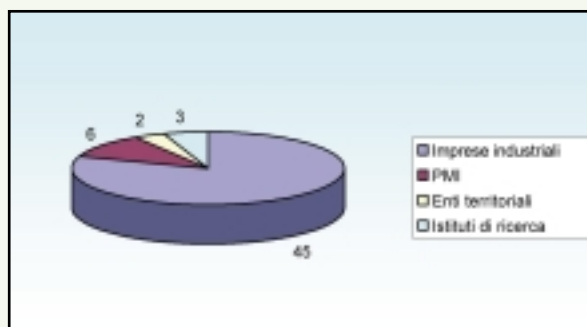


Figura 2 - Analisi degli interessati a divenire membri del JTI per tipologia

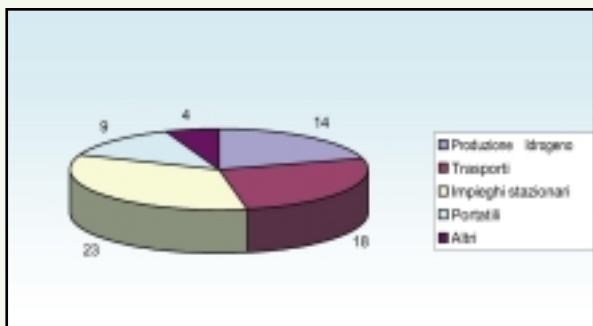


Figura 3 - Analisi degli interessati a divenire membri del JTI per settore

Manifestazioni di interesse a divenire membri del JTI provenienti dall'Italia

Nome dell'organizzazione	Tipologia	Settore
Ansaldo (Finnmeccanica)	Industria	Trasporti/Stazionario
Ferrovie dello Stato	Industria	Trasporti
FIAT	Industria	Trasporti
Hydro-Gen	PMI	Idrogeno
Nuvera	Industria	Portatili/Stazionario
Regione Lombardia	Ente pubblico	-
Ricerca	PMI	Idrogeno
SAPIO	Industria	Idrogeno n
SOL	Industria	Idrogeno

Manifestazioni di interesse a divenire associati al JTI provenienti dall'Italia

Nome dell'organizzazione	Tipologia	Settore
Agemont	Ente pubblico	-
Assindustria Trento	Associazione imprenditoriale	-
CESI	Ricerca	Idrogeno
Città di Torino	Ente pubblico	-
CTI	Ente pubblico	-
Electro Power Systems	PMI	Portatili
Enginsoft	PMI	Ingegneria (Software)
ENI Tecnologie	Industria	Idrogeno
Friuli Innovazione, Consorzio di Ricerca	Ente pubblico	-
Hydrogen Park	Industria	Idrogeno
IDEA	Ricerca	-
Pianeta	Industria	Stazionario
Politecnico di Torino	Ente pubblico	-
Provincia Autonoma di Trento	Ente pubblico	-
Provincia di Torino	Ente pubblico	-
Rasfin Sim	PMI	Altro
Regione Piemonte	Ente pubblico	-
Sviluppo Italia Piemonte	Ente pubblico	-
Train	Ricerca	Trasporti
UIT - Unione Industriali Torino	Associazione imprenditoriale	-
Università degli Studi di Genova	Ente pubblico	-
Università di Torino	Ente pubblico	Portatili/Stazionario

I dati sono tutti desunti da "Report on Joint Technology Initiative Member Status & Associate Status Letters" pubblicato il 14 Febbraio 2006 su [www.HFPEurope.org](http://www.HFPEurope.org)

strumenti finanziari raccomandati includono:

- contratti pubblici;
- prestiti della Banca Europea per gli Investimenti per grandi progetti di ricerca e sviluppo e innovazione industriale;
- partecipazione del Fondo Europeo di Investimento nei fondi specifici per l'idrogeno e celle a combustibili nell'Unione europea (principalmente iniziative alle prime fasi);
- piani incentivi in tutta l'Unione europea.

## Il tempo è fondamentale

Costruire da un capo all'altro dell'Europa:

- celle a combustibile, componenti e sistemi di celle a combustibile sicuri e commerciabili in tutto il mondo
- un network per la fornitura e la distribuzione di idrogeno (specialmente per il trasporto su strada), basato su diverse fonti di energia primarie regionali

è una sfida che deve essere lanciata ora, per realizzare il prima possibile un impatto sul cambiamento climatico e sulla sicurezza energetica, e assicurare e mantenere la leadership in questa area altamente competitiva.

La tempestività e il coordinamento di tutti i fattori che regolano il mercato sono cruciali. Le pietre miliari per una distribuzione competitiva e per tecnologie sicure devono essere coordinate con piani di investimento nello sviluppo dei prodotti; impianti industriali per la produzione di celle a combustibile e attrezzature; infrastrutture per la produzione, distribuzione e immagazzinamento dell'idrogeno.

Certamente gli investimenti richiesti sono enormi, molte centinaia di miliardi di euro. Ma sono disponibili, se strategicamente pianificati, dai 20 ai 30 anni a partire da ora con un notevole sforzo di sviluppo tecnologico ben strutturato.

Tutto questo richiede un'azione urgente e concertata all'interno delle politiche europee della ricerca, dell'energia, dei trasporti, dell'impresa e dell'ambiente, in particolare:

- la visione e il consenso dei governi sul bisogno di sviluppo sostenibile e il ruolo chiave dell'industria e del commercio nel raggiungimento di questi obiettivi;
- politiche di pubblico finanziamento, che coprono i relativi bisogni di ricerca e sviluppo e realizzazione su larga scala;
- incentivi fiscali ed altri incentivi economici per dare ai fabbricanti, ai fornitori di infrastrutture e agli acquirenti la fiducia per investire nelle nuove tecnologie e stabilire una catena di approvvigionamento, mentre vengono costruite le economie della produzione su larga scala;
- strumenti finanziari più flessibili, dinamici ed innovativi, inclusi quelli mirati a incoraggiare la crescita industriale;
- regolamenti, codici e norme, e rimozione delle barriere;
- schemi di *Intellectual Property Rights* (Diritti di Proprietà Intellettuale) accessibili e disponibili, cruciali per l'im-

mentazione di nuove tecnologie e la salvaguardia degli investimenti nella ricerca e dimostrazione;

- una partnership pubblico-privata per implementare la SRA e la DS;
- identificazione e promozione delle opportunità dei primi mercati: questo potrebbe portare vantaggi competitivi attirando i primi impianti di produzione industriale di componenti per idrogeno e celle a combustibile e la creazione del mercato del lavoro;
- coordinamento e networking: creazione di un centro per il consolidamento e la disseminazione delle informazioni, come gli *European Virtual Centres of Excellence* (Centri di Eccellenza Virtuali europei) che agiscono come punti focali per la ricerca critica;
- un programma completo per la promozione della consapevolezza e l'educazione pubblica.

## Passi successivi raccomandati e conclusioni

1. La Commissione europea dovrebbe stabilire una Iniziativa Tecnologica Congiunta (JTI) all'interno del 7° Programma Quadro. Con un finanziamento pubblico dedicato di almeno € 250 milioni all'anno prenderebbe forma una partnership con molti attori pubblico-privata, con l'incarico di implementare un programma integrato di ricerca e dimostrazione, come sottolineato da JRA e DS. Ciò dovrebbe comprendere azioni mirate a:
  - costituire un network europeo di fornitura e distribuzione dell'idrogeno basato su un percorso energetico senza carbonio/neutro;
  - portare veicoli alimentati a idrogeno e sistemi di celle a combustibile stazionari/portatili al momento della commercializzazione entro il 2015-2020.
2. La *Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform* (Piattaforma tecnologica per l'idrogeno e celle a combustibile) dovrebbe proseguire i suoi sforzi per elaborare una pianificazione di risorse più specifiche, agire con tempestività e individuare le pietre miliari allo scopo di definire un quadro per un programma integrato di ricerca e dimostrazione, compresi i *Lighthouse Projects*, che possono essere inclusi nella JTI. Dovrebbe inoltre consolidare il suo ruolo di consigliere nei confronti di tutti gli attori, in particolare della Commissione e degli Stati Membri. Questo comprende una revisione della struttura della piattaforma, con l'assicurazione che continui a funzionare in base ai principi del coinvolgimento di tutti gli attori e della trasparenza, e stabilire un processo di monitoraggio per riesaminare il progresso dell'attività, i punti di forza e di debolezza, in collegamento con l'Iniziativa Tecnologica Congiunta.
3. Il *Member State Mirror Group* dovrebbe considerare le raccomandazioni del SRA e DS, in particolare riguardo la necessità di stabilire una tecnologia dell'idrogeno e delle celle a combustibile all'interno di una strategia energetica europea comune. Esso gioca un ruolo

cruciale nell'integrazione dell'Unione europea, degli Stati membri, e della ricerca e sviluppo tecnologico e della realizzazione a livello regionale all'interno dell'Area di Ricerca Europea, facendo leva sugli sforzi dell'Unione europea con iniziative nazionali e regionali.

4. La *Initiative Group on Education and Training* dovrebbe proporre un chiaro piano d'azione di formazione a tutti i livelli, in particolare uno a breve termine per ricercatori, ingegneri ed esperti, incluse iniziative per scuole estive. Questo programma dovrebbe essere riesaminato e portato avanti nel contesto del programma integrato di ricerca e dimostrazione creato dalla JTI.
5. L'*Initiative Group on Finance and Business Development* mette in rilievo il bisogno di identificare i primi mercati di nicchia che possono supportare i prezzi più alti a causa dei vantaggi funzionali dei sistemi a idrogeno e celle a combustibile. Dovrebbe continuare a sviluppare meccanismi finanziari strutturati che potrebbero fornire fondi per i primi mercati di nicchia e per partnership pubblico-private. È raccomandata la promozione di forum per lo sviluppo dell'attività regionale – specialmente attraverso partnership pubblico-private. Stabilire il *Business Observatory* per analizzare i primi mercati di nicchia e creare *Buyers Pools* per un acquisto collettivo, potrebbe aiutare a supportare investimenti iniziali in impianti pilota per la creazione di catene di servizi e fornitori. Un processo per la validazione di questi primi mercati di nicchia potrebbe inoltre formare le basi per costruire meccanismi finanziari strutturati.
6. Regolamenti, codici e norme sono la chiave per attivare i mercati. L'*Initiative Group* su regolamenti, codi-

ci e norme ha prodotto una prima analisi sui divari e un piano d'azione per stabilire norme e un quadro di riferimento per l'operazione di sicurezza dei sistemi ad idrogeno e celle a combustibili. È molto raccomandata la promozione di forum regionali per lo sviluppo del commercio, specialmente attraverso delle partnership pubblico-private. Tutti gli sforzi dovrebbero combaciare con il mandato delle *European Standardisation Bodies* (CEN/CENELEC/ETSI), incluse azioni specifiche per conquistare e strutturare la conoscenza dalle attività di ricerca e dimostrazione pre-normativa. Un sito web dedicato e manuali/codici per il buon uso sono raccomandati per una prima implementazione, mentre la costruzione di cooperazioni internazionali è vitale per assicurare infrastrutture e attrezzature compatibili globali. La creazione di un processo formale/*task force* per accertare l'adeguata accuratezza sull'uso sicuro dell'idrogeno (specialmente nei progetti dimostrativi) è altresì importante.

7. L'*Initiative Group on Public Awareness* dovrebbe elaborare una strategia che sviluppi consapevolezza nelle persone in tutta Europa nei confronti dell'idrogeno e delle celle a combustibile. L'obiettivo globale è quello di informare un'audience ben mirata sui benefici a lungo termine e sulle realtà a breve termine derivanti dai sistemi ad idrogeno e celle a combustibile e relative infrastrutture. Lo scopo globale della consapevolezza pubblica è quello di raggiungere un livello di conoscenza dell'idrogeno e delle celle a combustibile tale che possa facilitare l'approvazione e commercializzazione del mercato di queste tecnologie così come la gestione delle aspettative.

## Membri del consiglio esecutivo della Piattaforma tecnologica europea per l'idrogeno e le celle a combustibile

ANGELO AIRAGHI,  
*Ansaldo Energia, Finmeccanica*

PAOLO ALLI,  
*Regione Lombardia*

ROGER BALLAY,  
*PACo Network*

CARL BATTERSHELL,  
*BP PLC*

JEREMY BENTHAM,  
*Shell Hydrogen*

PIERRE BEUZIT,  
*Renault*

JAVIER BREY,  
*Abengoa-Hynergreen*

ALAIN BUGAT,  
*French Atomic Energy Commission*

JOHN CAROLIN,  
*The BOC Group*

LEOPOLD DEMIDDELEER,  
*Solvay*

MANFRED DIEHL,  
*Umicore AG & Co*

CESAR DOPAZO,  
*University of Zaragoza, LITEC*

AGUSTIN ESCARDINO MALVA,  
*NTDA Energia*

PABLO FERNANDEZ RUIZ,  
*European Commission, DG RT*

ELISABET FJERMESTAD HAGEN,  
*Norsk Hydro*

MARC FLORETTE,  
*Gaz de France*

BERNARD FROIS,  
*French Ministry of Research*

JÜRGEN GANCHE,  
*Centre for Solar Energy & Hydrogen Research*

ALFONSO GONZALEZ FINAT,  
*European Commission, DG TREN*

HERBERT KOHLER,  
*Daimler Chrysler*

ANDRÉ MARTIN,  
*Ballard Power Systems AG*

WOLFGANG MEYER,  
*UITP*

OLIVER RAPP,  
*WWF International*

JENS ROSTRUP-NIELSEN,  
*Haldor-Topsoe*

CARLO RUBBIA,  
*ENEA*

STEVE SAWYER,  
*Greenpeace International*

KLAUS SCHEUERER,  
*BMW AG*

THORSTEINN SIGFUSSON,  
*University of Iceland, Iceland New Energy*

LARS SJUNNESSON,  
*Sydkraft AB*

DETLEF STOLTEN,  
*Jülich Research Centre*

MICHELE TETTAMANTI,  
*Nuvera Fuel Cells Europe Srl*

KAN TÖRRÖNEN,  
*European Commission, DG JRC*

KEES VAN DER KLEIN,  
*Energy Research Centre of the Netherlands*

HUGO VANDENBORRE,  
*Hydrogenics*

NICOLAS VORTMEYER,  
*Siemens AG Power Generation*

JOACHIM WOLF,  
*Linde AG*



## Conclusioni

È chiaro che un'economia energetica europea basata sull'idrogeno e sulle celle a combustibile non è più un ideale, ma si staglia ormai all'orizzonte, nata dalla diffusa consapevolezza dei suoi benefici, dalla velocità dello sviluppo tecnologico e dal crescente impegno dell'industria e del governo. Allo scopo di raggiungere i realistici obiettivi di sfida stabiliti in questo rapporto, è dunque essenziale che il processo di transizione venga iniziato senza ritardo. Affinché ciò accada sono necessari la visione e il consenso dei governi e un programma di dimo-

strazione e sviluppo tecnologico avanzato e ben finanziato che possa essere implementato in una *Joint Technology Initiative*.

Il documento completo è stato pubblicato sul sito [www.hfpeurope.org](http://www.hfpeurope.org) nel giugno 2005. Per ulteriori dettagli vedere gli *Executive Summaries* della *Strategic Research Agenda* (SRA) e della *Deployment Strategy* (DS), o le versioni integrali della Fondazione della SRA e DS che si trovano sul sito della Piattaforma: [www.hfpeurope.org/hfp/keydocs](http://www.hfpeurope.org/hfp/keydocs).

Contatti: HFP Secretariat, e-mail: [estathios.peteves@cec.eu.int](mailto:estathios.peteves@cec.eu.int), [secretariat@hfpeurope.org](mailto:secretariat@hfpeurope.org), tel.: +31 224 565245



## POTENZIALE IDROGENO

### *Produzione da fonti rinnovabili e celle a combustibile*

Venerdì 17 marzo 2006 - ore 14.45 sala 7A PadovaFiere

### Convegno nel quadro di SEP 2006

#### *Programma*

- 14.45 Prima dell'inizio ufficiale dei lavori, esposizione ed illustrazione, da parte dell'ingegner Aldo Menapace (SGS future, Bolzano), di un sistema di produzione di energia da idrogeno
- 15.15 Saluti
  - Francesco Bicciato, *Assessore all'Ambiente Comune di Padova*
  - Roberto Marcato, *Assessore all'Ambiente Provincia di Padova*
- 15.30 Prospettive delle celle a combustibile in Italia e in Europa
  - Ing. Raffaele Vellone, *Direttore del Grande Progetto Idrogeno ENEA*
- 16.00 Produzione di Idrogeno da sistemi biologici
  - Prof. Giorgio Mario Giacometti, *Dipartimento Biologia, Università di Padova*
- 16.30 Impianti dimostrativi a celle a combustibile di Ansaldo Fuel Cells
  - Programma delle attività e primi risultati
  - Ing. Bartolomeo Marcenaro, *Ansaldo Fuel Cells, Genova*
- 17.00 Coffee break
- 17.15 Vettore energetico idrogeno: dalle biomasse alle celle a combustibile
  - Ing. Barbara Bosio, *Ricercatrice presso il Dipartimento di Ingegneria Ambientale dell'Università degli studi di Genova*
- 17.45 L'energia solare per la produzione di idrogeno
  - Professor Giuliano Martinelli, *INFN, Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara*
- 18.15 Idrogeno e celle a combustibile in applicazioni stazionarie
  - Ing. Aldo Menapace, *SGS future, Bolzano*

#### Moderatore

Prof. ing. Maurizio Fauri, *Polo Tecnologico per l'Energia di Trento*

*Organizzatore Centro Studi l'Uomo e l'Ambiente*

# Tecnologia e applicazioni delle celle a combustibile

## La tecnica

### Come funziona una cella a combustibile

Una cella a combustibile è un dispositivo elettrochimico che converte direttamente l'energia di un combustibile (idrogeno, idrocarburi, alcol, ecc.) in elettricità e calore, senza passare attraverso cicli termici.

Una cella è composta da due elettrodi in materiale poroso separati da un elettrolita.

Le reazioni che avvengono agli elettrodi consumano fondamentalmente idrogeno e ossigeno e producono acqua, attivando un passaggio di corrente elettrica nel circuito esterno.

L'elettrolita, che ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiude il circuito elettrico all'interno della cella.

La trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore (Figura 1), che è necessario estrarre per mantenere costante la temperatura di funzionamento della cella.

Costruttivamente le celle sono disposte in serie (Figura 2), 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.

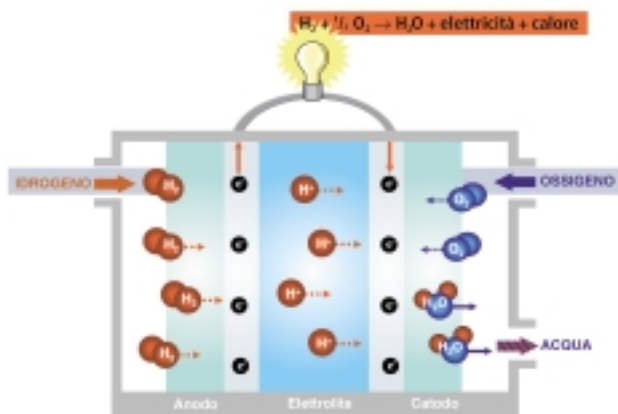


Figura 1 – Schema di funzionamento di una cella a combustibile

Si ottiene in questo modo un dispositivo ad elevata efficienza di conversione energetica, di rendimento quasi indipendente dal carico e dalla taglia dell'impianto, flessibile nell'uso dei combustibili di partenza, di impatto ambientale assai ridotto con emissioni trascurabili e bassa rumorosità.

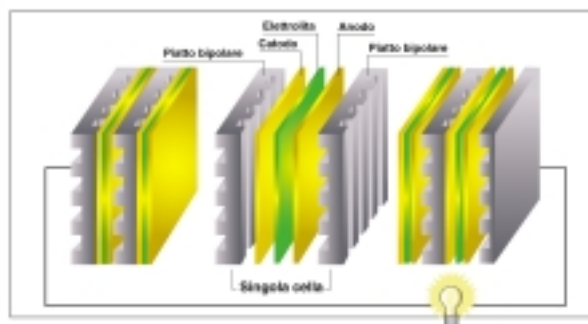


Figura 2 – Disposizione in serie (stack) delle celle separate da un piatto bipolare

Comunque, nonostante i notevoli progressi compiuti a livello mondiale per affinare la tecnologia e le caratteristiche delle celle (Tabella 1), c'è da fare ancora molto lavoro per migliorare le prestazioni dei materiali; per incrementare le prestazioni energetiche e ambientali; per aumentare l'affidabilità e la durata; per semplificare i sistemi e ridurre i costi; per creare una rete di distribuzione del combustibile; e infine per consentire l'emissione di standard e normative.

## Principali caratteristiche dei differenti tipi di celle a combustibile

Le differenti tipologie di celle, anche se basate sullo stesso principio (trasformazione diretta dell'energia chimica in energia elettrica), si distinguono per la natura dell'elettrolita e per la temperatura di funzionamento. Le caratteristiche distintive delle cinque principali tecnolo-

Tabella 1 - *Tipi di celle a combustibile e loro applicazioni*

Tipi di celle	Temperatura	Elettrolita	Stato della tecnologia	Applicazioni
Celle alcaline – AFC	60-120 °C	Iossido di potassio	Sistemi 5-80 kW	Applicazioni spaziali, Generatori portatili, Trasporto
Celle ad elettrolita polimerico – PEMFC	70-100 °C	Membrana polimerica	Sistemi 1-250 kW	Generazione portatile, Usi residenziali, Trasporto
Celle ad acido fosforico – PAFC	160-220 °C	Acido fosforico	Impianti dimostrativi fino a 11 MW	Cogenerazione, Potenza distribuita
Celle a carbonati fusi - MCFC	600-650 °C	Carbonato di litio e potassio	Impianti dimostrativi fino a 2 MW	Cogenerazione industriale, Potenza distribuita
Celle ad ossidi solidi - SOFC	800-1000 °C	Ossido di zirconio drogato	Stack 25 kW impianto 220 kW	Cogenerazione industriale, Potenza distribuita

Fonte: ENEA

Tabella 2 - *Principali caratteristiche dei differenti tipi di celle a combustibile*

Tipo di cella	Temperatura	Natura dell'elettrolita / ioni nell'elettrolita	Vantaggi	Inconvenienti	Applicazioni, Potenza elettrica
AFC	60-90 °C	Elettrolita liquido (potassio) / OH <sup>-</sup>	Catalizzatore non prezioso	Elettrolita sensibile a CO <sub>2</sub> (purificazione del gas)	Spazio, trasporti, 1-100kW
PEMFC	60-80 °C	Elettrolita solido (membrana polimerica perfluorata) / H <sup>+</sup>	Elettrolita solido (un elettrolita solido è più adatto per applicazioni di trasporto)	Costi elevati dei materiali (membrane, catalizzatori), sensibilità a CO (10 ppm max.)	Portatile, trasporti, applicazioni stazionarie, 1W-1MW
PAFC	160-220 °C	Elettrolita liquido (acido fosforico) / H <sup>+</sup>	Tolleranza a CO fino a 100 ppm	Ambiente acido (corrosione)	Applicazioni stazionarie, 200kW-10MW
MCFC	620-680 °C	Elettrolita liquido (sale fuso) / CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Reforming del combustibile	Ambiente molto corrosivo	Applicazioni stazionarie, 500kW-10MW
SOFC	800-1000 °C	Elettrolita solido (ceramica conduttrice di alcuni ioni ad elevata temperatura) / O <sup>2-</sup>	Reforming del combustibile, cogenerazione	Temperatura molto elevata (elevati vincoli sui materiali)	Applicazioni stazionarie, 100kW-10MW

Fonte: ADEME

Le celle adottate per le celle a combustibile sono elencate in **tabella 2**.

Le differenti tipologie si caratterizzano per le applicazioni specifiche e per la natura del combustibile utilizzato, quasi sempre idrogeno. Una sotto-categoria delle PEMFC, chiamate DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*) utilizza direttamente metanolo: l'energia proviene dalla sua ossidazione diretta.

## Approccio energetico e ambientale della tecnica

La cella a combustibile, quale dispositivo di produzione elettrica, presenta caratteristiche interessanti per quanto riguarda:

### - Efficienza energetica

La cella a combustibile presenta rendimenti energetici elevati. Il *rendimento* di conversione in energia elettrica varia con la tipologia di cella ed è generalmente compreso tra 35% e 60% (secondo la purezza dell'idrogeno). L'energia non convertita in energia elettrica viene emessa sotto forma di calore ed allontanata come acqua calda o vapore che, a differenza di quanto accade nelle grandi centrali elettriche, sono valorizzabili, portando il *rendimento globale* a superare l'80%. Il confronto in termini di efficienza energetica, con i sistemi classici di produzione elettrica, dipende dall'applicazione prevista (stazionaria, mobile o portatile).

Lo *stack* di più celle elementari non diminuisce il rendimento del dispositivo.

### - Durata di vita

La cella a combustibile dimostra, già ora, elevata affidabilità, ha manutenzione ridotta, non presenta infatti parti in movimento che possano usurarsi. La manutenzione, invece, è necessaria per il buon funzionamento di accessori importanti come compressori, ventilatori, ecc.

### - Emissioni

Le emissioni delle celle sono direttamente legate alla natura del combustibile. Le celle a combustibile alimentate a idrogeno puro, emettono solo acqua. Se il combustibile contiene carbonio, viene emessa CO<sub>2</sub>.

È, però, necessario, considerare nel bilancio ambientale il metodo di produzione dell'idrogeno.

Le celle a combustibile funzionano a temperature che non superano i 1000 °C, evitando la formazione termica di NO<sub>x</sub>, non producono composti solforati (SO<sub>x</sub>), la cui presenza avvelenerebbe il catalizzatore e neanche idrocarburi e polveri (**Figura 3**).

Le celle a combustibile presentano, dunque, caratteristiche interessanti che devono essere però valutate in ragione dell'applicazione prevista (stazionaria, mobile o portatile).

## Applicazioni industriali

All'inizio le celle a combustibile sono state utilizzate nei programmi spaziali. Oggi, sono previste altre applicazioni.

### - Applicazioni stazionarie

L'evoluzione della produzione elettrica verso il decen-



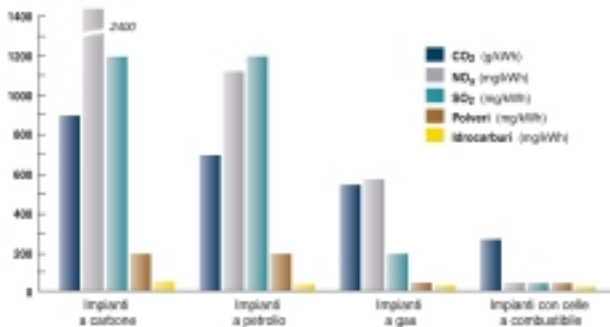


Figura 3 - Confronto delle emissioni inquinanti in atmosfera tra impianti che funzionano con diversi combustibili

tramento porterà benefici immediati agli utilizzatori quali la riduzione delle spese d'investimento per le infrastrutture di trasmissione, la soluzione dei problemi ambientali legati alle grandi centrali e alle linee ad alta tensione, la possibilità di aumentare la produzione in accordo con l'aumento del consumo, l'eliminazione delle perdite sulla rete, la possibilità di realizzare diffusamente la cogenerazione calore-elettricità.

Nell'attuale quadro di mutamenti del mercato dell'energia, la cella a combustibile può essere, quindi, un'opzione tecnologica promettente.

Tra le applicazioni stazionarie, ADEME, in Francia, registra la sperimentazione in una residenza singola (da 1 a 7 kW, 5 celle installate da Gaz de France), la produzione di 200kW a Chelles, a scopo dimostrativo curata da EDF e Gaz de France e di parecchi MW in siti industriali con cogenerazione.

## - Applicazioni mobili

Sempre ADEME cita le applicazioni di trazione relative ad automobili (Honda FCX, NECAR di Daimler-Chrysler, Ford Focus FCH, HYDRO\_GEN di Peugeot Citroen, FEVER di Renault...), e a veicoli pesanti (Ballard Power Systems, Daimler-Chrysler, ecc.).

In questo settore, nel confronto tra veicoli termici e veicoli a celle a combustibile, è necessario considerare sia i rendimenti energetici (non proprio favorevoli all'idrogeno) che le emissioni atmosferiche, senza dimenticare le emissioni dovute al metodo di produzione di idrogeno.

Un'altra applicazione "mobile" della cella è come generatore di elettricità a bordo dei veicoli per l'alimentazione degli impianti ausiliari (riscaldamento, climatizzazione ...).

## - Applicazioni portatili

Ovvero telefonia mobile (Motorola, Manhattan Scientifics, ecc.), e alimentazione di computer portatili (Toshiba, Ballard, ecc).

Assicurando l'alimentazione di combustibile, le celle a combustibile possono funzionare sempre, senza ricarica. Con il carburante ossigeno (aria) il combustibile può essere una piccola cartuccia contenente idrogeno. Il principale vantaggio è una maggiore autonomia.

## Fonti:

Scheda tecnica "La pile a combustibile"

<http://www.ademe.fr/entreprises/energie/demain/pilecomb.asp>

Pubblicazione "Idrogeno, energia del futuro" ENEA

<http://www.enea.it/com/web/pubblicazioni/Op23.pdf>



# METTETEVI IN LUCE

Vuoi davvero comunicare? Ambiente Risorse Salute  
ha i numeri per la tua azienda

