

ENEA

IDROGENO ENERGIA DEL FUTURO

23

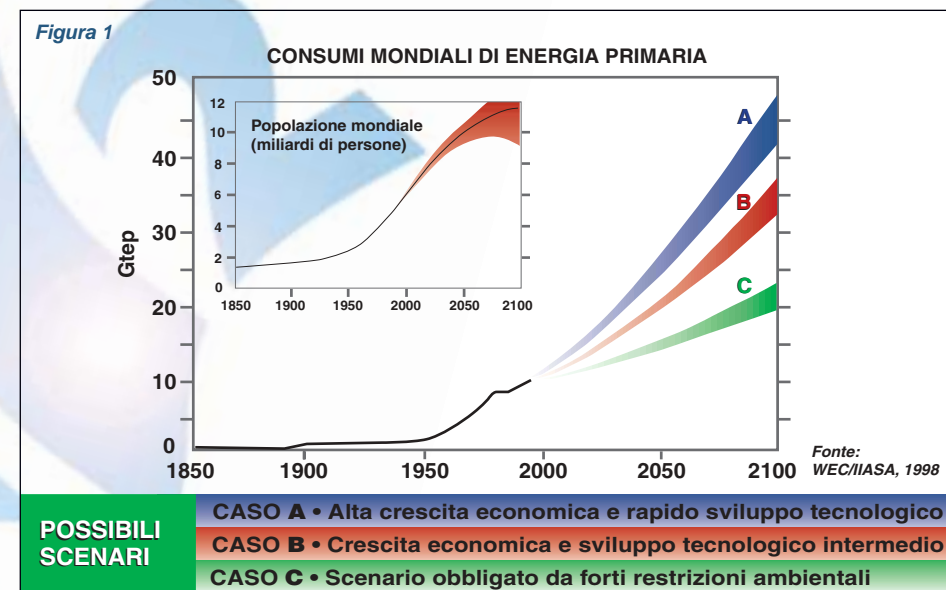


sommario

La sfida del 21° secolo	3
i Il problema delle emissioni di gas serra	4
Perché l'idrogeno	5
Cos'è e come si produce	6
Produzione da fonti fossili	7
Produzione da fonti rinnovabili	8
Stoccaggio e distribuzione	10
i Idrogeno: produzione, distribuzione e trasporto, stoccaggio, utilizzo, confinamento della CO ₂	11
Compressione	13
Liquefazione	13
Accumulo chimico	13
Distribuzione	14
Utilizzo	15
La cella a combustibile	15
i Come funziona una cella a combustibile	16
i Tipi di celle e loro caratteristiche	18
La questione sicurezza	19
Ricerca e sviluppo	20
All'estero	20
In Italia	20
i Sistemi di celle	21
I veicoli a idrogeno	22
L'utilizzo delle celle a combustibile nella trazione	22
i Veicoli con motori a celle a combustibile	22
i Celle a elettrolita polimerico	23
Quando il veicolo a idrogeno?	24

LA SFIDA DEL 21° SECOLO

La continua crescita della popolazione mondiale e la naturale aspirazione dei paesi in via di sviluppo a raggiungere standard economici e di qualità della vita vicini a quelli dei paesi industrializzati sono le principali cause della crescita inarrestabile della domanda di energia (figura 1) e del contemporaneo aumento delle emissioni di gas serra, prima fra tutte l'anidride carbonica. Soddisfare tale domanda, mantenendo questi gas a livelli non pericolosi per l'ambiente (v. riquadro p. 4) e riducendo così il rischio di cambiamenti climatici nel medio termine (oltre che, naturalmente, garantire l'approvvigionamento energetico) rappresenta la sfida tecnologica del nuovo secolo.



Una sfida che può essere vinta solo con l'aumento dell'efficienza dei sistemi e la contemporanea riduzione del consumo di idrocarburi; con l'espansione dell'impiego di fonti a basso o nullo contenuto di carbonio quali gas naturale, rinnovabili, nucleare; con la separazione della CO₂, prodotta nella trasformazione dei combustibili fossili e il confinamento della stessa; con l'aumento, infine, del potenziale di assorbimento della stessa CO₂ da parte dell'ecosistema.

Un tale scenario dovrebbe idealmente essere basato su un vettore⁽¹⁾ energetico con le seguenti caratteristiche:

- di impatto ambientale, sia globale che locale, quasi nullo;
- producibile da più fonti energetiche primarie, tra loro intercambiabili e disponibili su larga scala, anche in futuro;
- distribuibile preferenzialmente attraverso una rete.

(1) Vettore energetico: tutto ciò da cui si può ricavare energia utile mediante conversione di fonti energetiche primarie (es.: carbone, elettricità, benzina, ecc.)



Il problema delle emissioni di gas serra

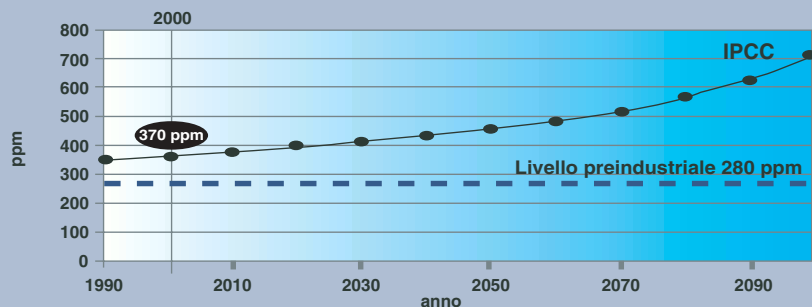
Il principale responsabile dell'effetto serra è l'**anidride carbonica**, prodotto finale dell'uso dei combustibili fossili nella generazione di energia termica, meccanica ed elettrica.

All'inizio del secolo scorso la concentrazione della CO_2 nell'aria era pari a 300 parti per milione (ppm). Ora è circa 380 ppm.

La **combustione** è il maggior responsabile delle emissioni di gas serra (quasi l'80% in Italia). A livello globale circa il 30% delle emissioni di CO_2 in atmosfera è causato dai trasporti.

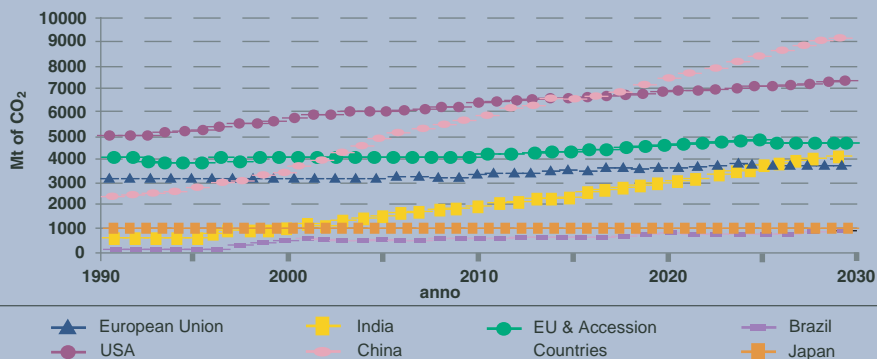
Le previsioni dei consumi di energia per il prossimo secolo fanno prevedere un **continuo aumento delle emissioni di CO_2** e della sua concentrazione in atmosfera, a meno di sostanziali cambiamenti del sistema energetico; l'andamento sotto riportato è stato stimato dall'IPCC in uno scenario senza particolari correttivi e con pieno sviluppo tecnologico ed economico. Tuttavia, in particolare per i trasporti, oltre a ridurre drasticamente l'uso dell'automobile, si può cercare di intervenire sull'efficienza dei veicoli o introducendo combustibili più puliti.

LA CONCENTRAZIONE DI CO_2 IN ATMOSFERA - TREND DI CRESCITA



L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ha valutato la possibile evoluzione della concentrazione di CO_2 senza interventi specifici

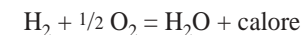
EMISSIONI CO_2 - STIME AL 2030



PERCHÉ L'IDROGENO

L'idrogeno è un vettore in grado di soddisfare i requisiti precedentemente indicati (figura 2); infatti:

- è un gas che brucia nell'aria secondo la semplice reazione: idrogeno più ossigeno uguale acqua e calore



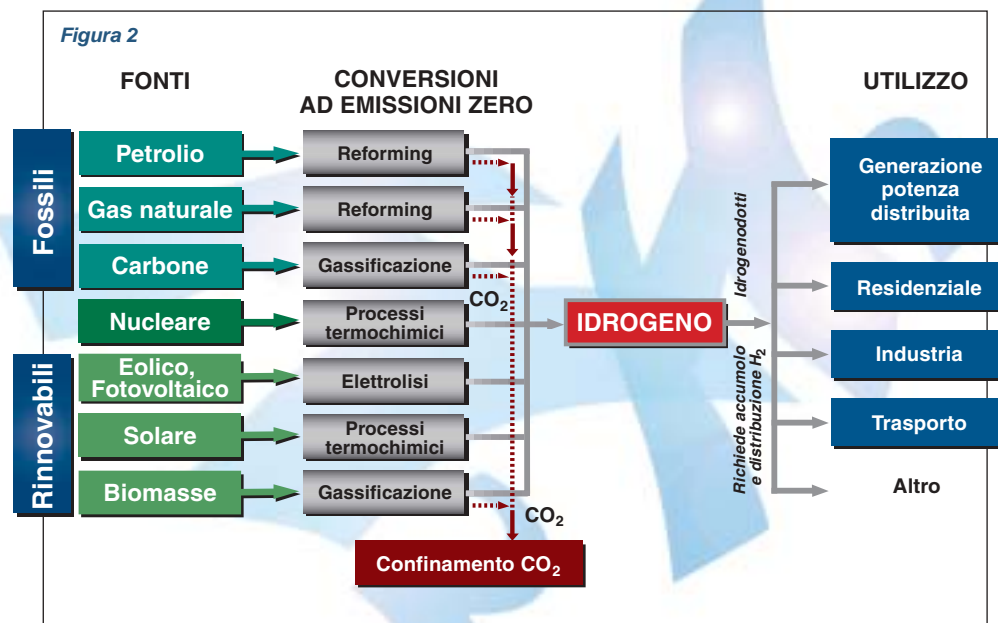
dando quindi come unico prodotto di reazione acqua pura;

- può essere prodotto sia da fonti fossili, sia da fonti rinnovabili, sia da fonte nucleare;
- può essere distribuito in rete abbastanza agevolmente compatibilmente con gli usi finali e con lo sviluppo delle tecnologie di trasporto e di stoccaggio;
- può essere impiegato in diverse applicazioni (produzione di energia elettrica centralizzata o distribuita, generazione di calore, trazione) con un impatto locale nullo o estremamente ridotto.

Come vedremo meglio in seguito, sono indubbi i vantaggi energetici e soprattutto ambientali che conseguirebbero dall'uso esteso dell'idrogeno in particolari sistemi elettrochimici denominati "celle a combustibile" (v. riquadro p. 16) che permettono la trasformazione diretta dell'energia chimica contenuta nel gas in energia elettrica, senza altre emissioni dannose.

Si può dire, quindi, che l'idrogeno rappresenta in prospettiva un componente ideale di un futuro sistema energetico sostenibile, costituendo un incentivo verso l'impiego diffuso delle fonti rinnovabili (e di un "nuovo nucleare"), ma già nel breve-medio termine può rendere i combustibili fossili compatibili con le esigenze ambientali.

Figura 2



Lo sviluppo come vettore energetico richiede però la predisposizione anche di una vasta gamma di infrastrutture integrate, se non altro per rendere l'impiego economico e affidabile in tutte le varie fasi della catena tecnologica (produzione, confinamento dell'anidride carbonica generata nel processo, trasporto, accumulo, usi finali). Ad esempio, si pensi solo che nell'applicazione all'autotrazione occorre sviluppare non solo le celle a combustibile più adatte, ma anche serbatoi per equipaggiare i veicoli, sistemi di trasporto e reti di distribuzione paragonabili a quelli dei carburanti tradizionali.

Tutto ciò, ovviamente, costituisce una grossa sfida per i prossimi anni che tuttavia non potrà non avere benefiche ricadute - in termini economici e occupazionali - immediatamente nel comparto della ricerca e sviluppo e a seguire sull'intera industria manifatturiera di ogni Paese.

COS'È E COME SI PRODUCE

L'idrogeno, l'elemento più leggero e abbondante dell'universo, è assai raro sulla Terra allo stato elementare a causa della sua estrema volatilità - si trova, ad esempio, nelle emanazioni vulcaniche, nelle sorgenti petrolifere, nelle fumarole - ma viceversa è molto diffuso sotto forma di composti (acqua, idrocarburi, sostanze minerali, organismi animali e vegetali) e può quindi essere prodotto a partire da diverse fonti. L'interesse per il suo impiego come combustibile, sia per applicazioni stazionarie che per la trazione, deriva dal fatto che l'inquinamento prodotto è quasi nullo; infatti, come già accennato, se usato in sistemi a combustione produce vapor d'acqua e tracce di ossidi di azoto, oppure solo vapor d'acqua se utilizzato con sistemi elettrochimici con celle a combustibile.

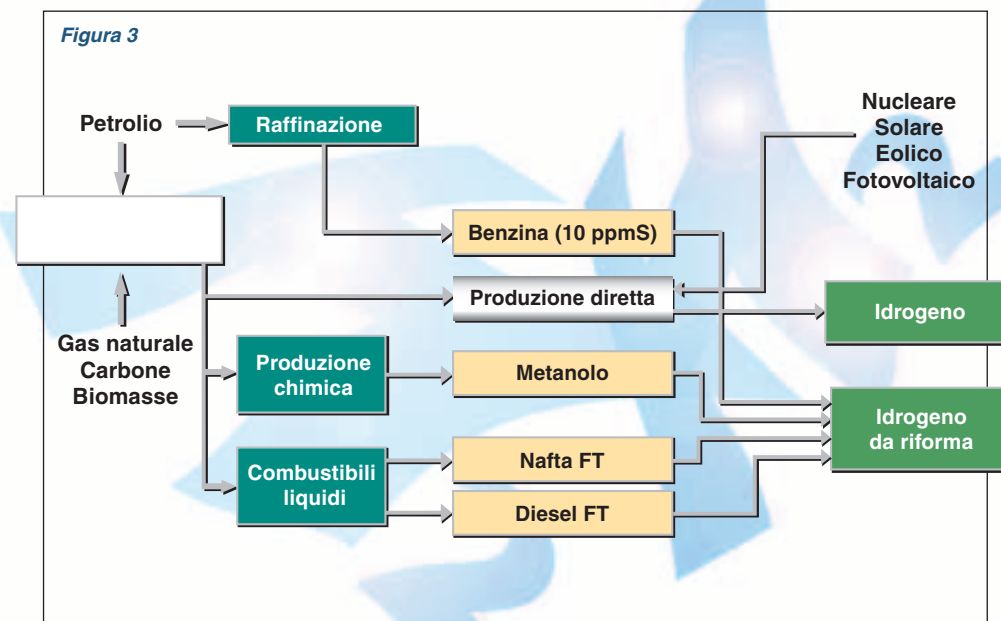
Rispetto agli altri combustibili, l'idrogeno è un gas incolore, inodore, non velenoso, estremamente volatile e leggero: presenta quindi un ridotto contenuto energetico per unità di volume, mentre ha il più alto contenuto di energia per unità di massa. Per fare un confronto con un altro combustibile, ad esempio il gasolio, possiamo dire che un litro di gasolio, come contenuto energetico, equivale a:

- 3,12 m³ di idrogeno gassoso (in condizioni normali);
- 4,13 litri di idrogeno liquido

dove però la combustione dell'idrogeno può essere realizzata con un'efficienza più alta.

A fronte di queste qualità energetiche e soprattutto ambientali, tuttavia l'introduzione dell'idrogeno come combustibile - e più in generale come vettore energetico - richiede che siano messe a punto le tecnologie necessarie per agevolare la produzione, il trasporto, l'accumulo e l'utilizzo. A titolo di esempio, solo per la liquefazione a -253 °C occorrono particolari tecnologie oltre che la predisposizione di speciali container per il trasporto.

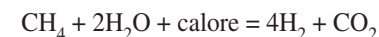
Per quanto riguarda la produzione, ricordiamo che le fonti primarie di partenza possono essere sia fossili che rinnovabili in modo da contribuire alla diversificazione ed all'integrazione tra i diversi tipi di energia. In *figura 3* sono schematizzati alcuni metodi di produzione dell'idrogeno.



PRODUZIONE DA FONTI FOSSILI

Le tecnologie di produzione dell'idrogeno a partire dai combustibili fossili sono mature e ampiamente utilizzate, anche se vanno ottimizzate da un punto di vista economico, energetico e di impatto ambientale. Dei circa 500 miliardi di Nm³ di idrogeno prodotti annualmente a livello mondiale, circa 190 miliardi rappresentano un sottoprodotto dell'industria chimica (ad es. dagli impianti cloro-soda), mentre la maggior frazione deriva da combustibili fossili, gas naturale ed olio pesante, attraverso processi di reforming e di ossidazione parziale.

Tali processi prevedono la produzione del gas attraverso successivi stadi di raffinazione e di frazionamento delle molecole degli idrocarburi fino alla completa eliminazione del carbonio. Con questa linea oggi viene prodotta una grandissima quantità di idrogeno, tutta quella consumata sul mercato della chimica dei fertilizzanti di sintesi e nella metallurgia dell'acciaio. Il processo più diffuso, "steam reforming", reazione a caldo del metano con vapore a 800 °C in modo da ossidare il carbonio e liberare idrogeno dalla molecola con emissione di anidride carbonica secondo la reazione



è tecnicamente molto ben sperimentato e viene realizzato industrialmente con reattori di grosse capacità dell'ordine, di 100.000 Nm³/h. Unità molto più piccole, realizzate specificamente per l'uso sui veicoli o per impianti di generazione distribuita di piccola taglia, sono attualmente in via di sviluppo soprattutto per l'utilizzo in sistemi con celle a combustibile.

La produzione da fonti fossili, però, ha l'inconveniente di dar luogo - come prodotto di scarto - alla emissione di grandi quantità di CO₂, cosicché l'idrogeno - pur utilizzabile in modo pulito - non è comunque incolpevole a causa dell'inquinamento prodotto nel ciclo di lavorazione.

Per ovviare a ciò occorrerebbe raccogliere e confinare⁽²⁾ la CO₂ prodotta nei grossi impianti, sfruttando l'esperienza in materia delle compagnie petrolifere. Per queste si può anche ipotizzare una parziale riconversione che consenta di produrre idrogeno dagli idrocarburi, idrogeno che verrebbe poi utilizzato negli autoveicoli (conservando ovviamente il profitto per le compagnie).

Dal punto di vista ambientale, questa soluzione ha il vantaggio di evitare le emissioni di CO₂ di una miriade di veicoli sparsi sul territorio, concentrandole negli impianti petrolchimici da dove però potrebbero essere catturate con opportuni filtri, trasformate in forma liquida o solida e poi immagazzinate in giacimenti geologici profondi e di caratteristiche adeguate che ne dovrebbero impedire la reimmissione in atmosfera. Nel nostro Paese, come in altri, le opzioni principali sono due:

- pompaggio nei giacimenti esauriti di gas e petrolio;
- immissione nei cosiddetti acquiferi salini⁽³⁾, formazioni stabili sotterranee non altrimenti utilizzabili, e in fondali oceanici situati a grande profondità (oltre 1.000 m sotto il livello del mare) dove la CO₂ si manterrebbe allo stato liquido indefinitamente a causa dell'enorme pressione ivi esistente.

Dal punto di vista tecnico, queste proposte - il cui sviluppo già costituisce di per sé un programma di ampie dimensioni - sono già oggi realizzabili con qualche aggiustamento e modifica di tecnologie esistenti in modo da consentire uno sviluppo graduale delle infrastrutture del settore energetico e quindi una riduzione degli inquinanti nel breve-medio termine. È tuttavia da tener presente che la produzione di idrogeno da combustibili fossili deve essere considerata come una sorta di "ponte tecnologico" verso la produzione da fonti rinnovabili - soluzione più promettente nel lungo termine - in quanto lascerebbe irrisolti in particolare i problemi economici a causa dell'inevitabile progressivo esaurimento delle riserve di combustibili fossili e del costo aggiuntivo del confinamento della CO₂.

PRODUZIONE DA FONTI RINNOVABILI

Per quanto riguarda la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili - modo sostanzialmente pulito e per questo ben più interessante - i processi possono essere sommariamente distinti in:

- produzione da biomasse;
- produzione dall'acqua.

Nella produzione di idrogeno a partire da biomasse nessuno dei processi proposti ha ancora raggiunto la maturità industriale. Le diverse alternative (gassificazione; pirolisi e successivo reforming della frazione liquida prodotta; produzione di etanolo e reforming dello stesso; produzione biologica attraverso processi basati su fenomeni di fotosintesi o di fermentazione) richiedono tutte un impegno notevole di ricerca, sviluppo e dimostrazione, anche se a livelli diversi. Le premesse sono comunque buone, tenuto anche conto dei diversi materiali utilizzabili.

(2) Immagazzinare in giacimenti geologici per impedire la reimmissione in atmosfera.

(3) Ammassi di rocce sedimentarie porose permeabili e saturate di acqua.

L'idrogeno può anche essere prodotto dall'acqua scindendo la stessa nei suoi componenti (idrogeno e ossigeno) attraverso diversi processi, tra i quali quello più consolidato è l'elettrolisi. Schematicamente questa è rappresentata dalla seguente reazione: acqua più energia elettrica uguale idrogeno più ossigeno:



Si può notare subito che la reazione di elettrolisi risulta esattamente inversa a quella che avviene nelle celle a combustibile. Pertanto, l'intero processo di produzione e consumo è ambientalmente sostenibile purché sia disponibile una corrispondente quantità di energia elettrica pulita in grado di alimentare il processo di elettrolisi. È immediato pensare al sole come sorgente di questa energia, sfruttabile attraverso l'utilizzo di impianti di conversione fotovoltaica, la cui tecnologia già oggi può essere considerata tecnicamente affidabile e adeguata, anche se non ancora competitiva.

Infatti, mediante l'uso di energia solare fotovoltaica si può produrre idrogeno elettrolitico e ossigeno che poi possono essere fatti ricombinare nelle celle a combustibile per produrre l'energia elettrica di cui abbiamo bisogno. Come prodotto finale di scarto si genera una quantità di acqua pura pressappoco uguale a quella di partenza, chiudendo in tal modo il ciclo senza emissioni inquinanti. Infine, è evidente che le grandi distese oceaniche altro non sono che enormi riserve di idrogeno: ogni kg di acqua pura contiene 111 g di idrogeno che, una volta bruciato, potrebbe produrre 3.200 chilocalorie di energia termica. Pertanto dall'acqua, in linea di principio, sarebbe possibile estrarre tutto l'idrogeno necessario a soddisfare in modo pulito le esigenze energetiche dell'umanità.

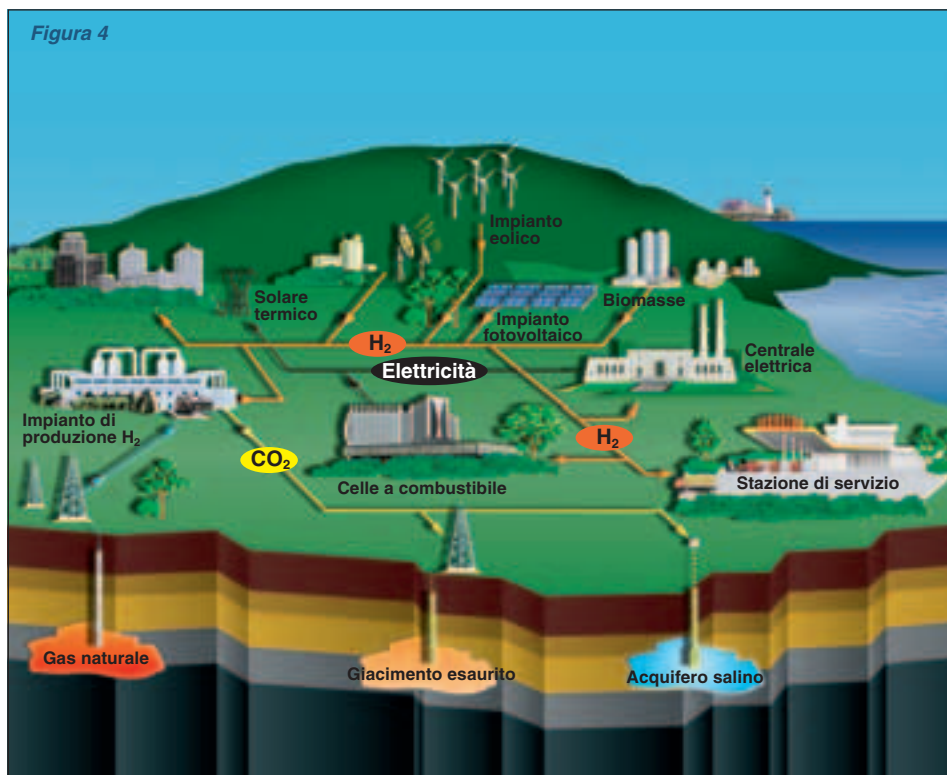
Il problema attualmente è il costo. Con l'elettrolisi dell'acqua, infatti, è vero che si può ottenere idrogeno praticamente puro, ma solo a un prezzo che può diventare economicamente accettabile in una prospettiva ancora lontana, allorché le innovazioni tecnologiche potrebbero consentire un costo estremamente basso dell'energia elettrica, prodotta da fonti rinnovabili (o da nucleare). Pertanto tale scelta non appare, allo stato attuale delle conoscenze, economicamente ed energeticamente perseguibile, se non per applicazioni particolari (ad esempio aree remote).

La dissociazione dell'acqua può essere effettuata anche facendo uso di processi termochimici che utilizzano calore ad alta temperatura (800-1000 °C) ottenuto da fonti diverse (prima fra tutte l'energia solare termica); sono in corso, anche in Italia, attività di ricerca e sviluppo tese a dimostrare la fattibilità industriale di tali processi ed il potenziale nel lungo termine sembra essere molto interessante.

Altri processi, ancora allo stato di laboratorio, sono la fotoconversione che scinde l'acqua usando organismi biologici o materiali sintetici, e i processi fotoelettrochimici, che usano per lo stesso scopo una corrente elettrica generata da semiconduttori.

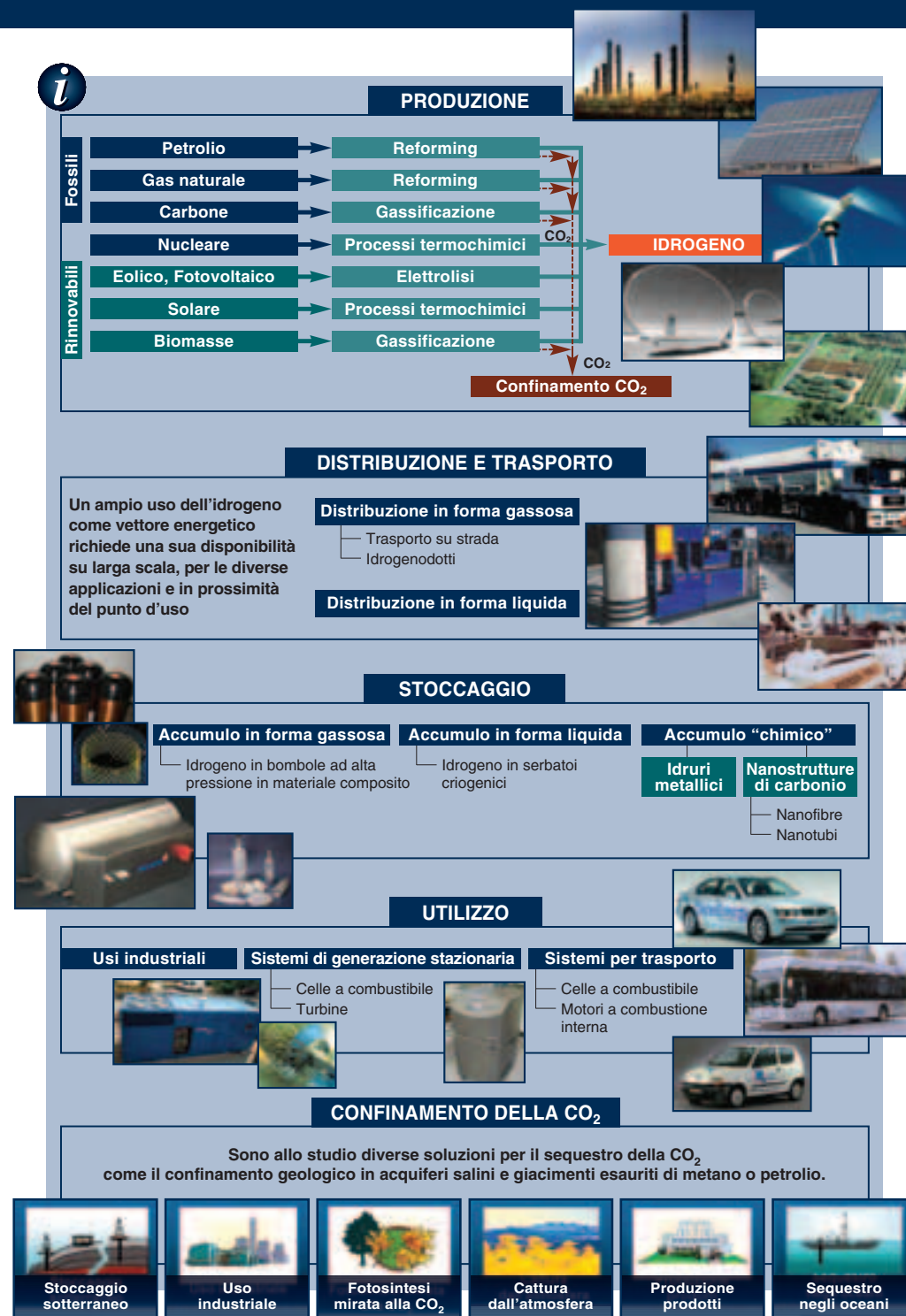
STOCCAGGIO E DISTRIBUZIONE

Nella figura 4 è riportato uno schema dei possibili metodi di produzione e di utilizzazione dell'idrogeno. A sinistra, notiamo un impianto di produzione tradizionale tipo "steam reforming" alimentato da gas naturale trasportato da un metanodotto. La CO₂ coprodotta (linea gialla) viene separata e confinata in giacimenti esauriti di idrocarburi o in acquiferi salini a grande profondità (come si vede in basso).



Nella parte superiore sono indicate le altre tecnologie di produzione da fonti rinnovabili (linea arancione): solare termico, impianti eolici, fotovoltaici, biomasse. L'idrogeno prodotto sarà poi utilizzato in centrali termoelettriche tradizionali, in impianti a celle a combustibile o nei trasporti, sfruttando veicoli a combustione interna o a celle (parte destra della figura). L'energia elettrica così prodotta potrà essere dedicata all'alimentazione delle utenze diffuse (linea nera).

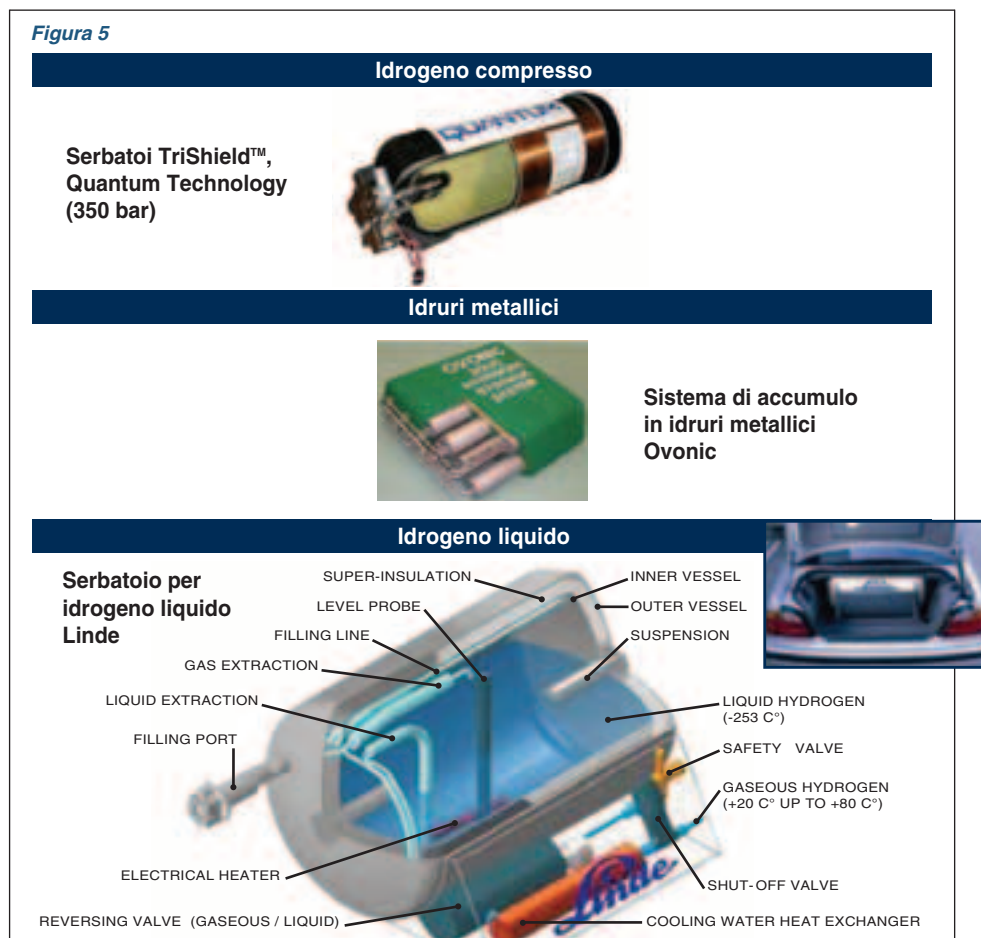
L'idrogeno può essere trasportato e accumulato in forma gassosa, liquida oppure adsorbito su materiali speciali (v. riquadro p. 11); ogni forma presenta aspetti favorevoli e svantaggi e tutte, se pur in gran parte già utilizzate, richiedono significativi sforzi di ricerca e sviluppo per un impiego su larga scala affidabile e economicamente competitivo, come nel caso di una rete adeguata per il rifornimento degli autoveicoli.



Per il trasporto dell'idrogeno gassoso si può pensare a idrogenodotti ed esistono esperienze significative in tal senso ma vanno migliorate le tecnologie per i materiali da impiegare e per la compressione del gas (minore potere calorifico e quindi maggiori portate per la stessa quantità di energia). Il trasporto in forma liquida in bombole utilizzando autocarri presenta problematiche ancora più complesse e sembra, in prospettiva, conveniente solo per quantità limitate e percorrenze elevate.

I metodi di stoccaggio dipendono dalle applicazioni considerate e sono critici soprattutto per l'impiego a bordo di veicoli, richiedendo una elevata densità di energia. Esistono diverse tecnologie di accumulo dell'idrogeno, le quali comunque devono rispondere a requisiti di efficienza, praticità ed economicità. Nessuna di queste è ad oggi pienamente soddisfacente; tuttavia nel seguito vengono descritte brevemente quelle più promettenti, facendo riferimento - per semplicità - all'uso come combustibile per automobili, certamente una delle applicazioni più appetibili. Qui le soluzioni possibili prevedono la compressione del gas, la sua liquefazione e infine l'accumulazione su idruri metallici (figura 5).

Figura 5



COMPRESSIONE

Il modo più semplice ed economico per accumulare idrogeno è di utilizzarlo sotto forma di gas compresso a pressione di 200-250 bar (ed oltre). La tecnologia risulta tuttavia non facilmente proponibile per l'uso a bordo di auto tradizionali, a causa del peso ed ingombro dei serbatoi attualmente utilizzati, che rappresentano un limite all'autonomia e capacità di carico del veicolo.

Di recente, notevoli progressi sono stati fatti con l'introduzione di serbatoi con struttura metallica o termoplastica rinforzata con fibre di carbonio, di vetro ed aramidiche⁽⁴⁾, che presentano un peso 3-4 volte inferiore a quello dei comuni serbatoi e che consentono di superare in parte gli inconvenienti dell'uso delle bombole tradizionali. Questi serbatoi sono in grado di operare a pressioni fino a 350 bar (potenzialmente fino a 700 bar) e consentono quindi di ottenere densità di accumulo di idrogeno adeguate all'uso a bordo di veicoli. Le caratteristiche di sicurezza sono solitamente molto elevate, grazie alla robustezza dei serbatoi ed all'introduzione di fusibili antisceppio in caso di incendio, e di valvole di interruzione del circuito in caso di urto.

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

LIQUEFAZIONE

L'idrogeno può essere immagazzinato anche in forma liquida ad una temperatura di -253 °C. Per mantenere queste temperature sono stati messi a punto serbatoi criogenici a doppia parete, con un'intercapedine, dove viene fatto il vuoto (serbatoi tipo "dewar"). Questa tecnologia è ormai consolidata in Germania, dove la BMW la utilizza da oltre 15 anni su auto ad idrogeno alimentate con motori a combustione interna.

L'accumulo in forma liquida è forse la tecnologia che oggi meglio soddisfa, da un punto di vista teorico, le esigenze specifiche dell'autotrazione; tuttavia anch'essa presenta dei limiti. A sfavore dell'idrogeno liquido giocano la maggiore complessità del sistema, non solo a bordo del veicolo ma anche a terra, per la distribuzione ed il rifornimento, ed i maggiori costi ad esso associati. Anche il costo energetico della liquefazione è considerevole, corrispondendo a circa il 30% del contenuto energetico del combustibile, contro un valore compresso tra il 4% ed il 7% per l'idrogeno compresso.

ACCUMULO CHIMICO

L'idrogeno può legarsi chimicamente con diversi metalli e leghe metalliche formando idruri, composti in grado di intrappolare idrogeno a pressioni relativamente basse. Il gas penetra all'interno del reticolo cristallino del metallo, andando ad occupare i siti interstiziali. Tale tecnologia permette di raggiungere densità energetiche potenzialmente maggiori dell'idrogeno compresso e paragonabili con quelle dell'idrogeno liquido. Il volume di stoccaggio si potrebbe ridurre di 3-4 volte, rendendo possibile l'uso nelle autovetture, mentre l'energia specifica dipende dal peso specifico del metallo di base. Le percentuali in peso dell'idrogeno sul peso del metallo variano dall'1 al 12,7% (idruri di litio) mentre per le comuni bombole tale percentuale è di poco superiore all'1%.

A fronte di tali caratteristiche positive, esistono ancora numerosi problemi da superare per la realizzazione di sistemi di accumulo veramente competitivi. Ad esempio, occorre lavorare ancora per migliorare la stabilità strutturale e termica del materiale, per depurarlo dalle impurità presenti nell'idrogeno, per rendere compatibili temperatura e pressione con le applicazioni previste, ecc.

(4) A base di ammidi aromatiche.

Comunque, allo stato attuale, i materiali disponibili portano a sistemi di accumulo troppo pesanti: a parità di peso, il veicolo presenta un'autonomia tre volte inferiore a quella ottenibile con idrogeno liquido o compresso con serbatoi di tipo avanzato. Sono invece indubbi i vantaggi in termini di convenienza, compattezza, stabilità dello stoccaggio, sicurezza.

Una tecnologia recentissima e ancora sperimentale riguarda l'utilizzo di nanostrutture di carbonio (nanotubi e nanofibre di carbonio), scoperte all'inizio degli anni 90, che stanno dimostrando buone capacità di adsorbimento dell'idrogeno, con risultati in alcuni casi sorprendenti. Su questi materiali sono in corso ricerche da parte di numerosi gruppi di lavoro, ma i risultati ottenuti, spesso in contrasto tra di loro, sono per il momento difficilmente confrontabili in quanto le esperienze sono state effettuate su campioni di materiali di diverso tipo, provati in condizioni di pressione e temperatura molto diverse tra loro. Il campo di variazione della pressione va da pochi bar ad alcune centinaia di bar, la temperatura da 80 °K a 800 °K, le percentuali di adsorbimento in peso variano da valori inferiori all'1% ad un incredibile 60%.

DISTRIBUZIONE

A seconda delle quantità interessate, l'idrogeno può essere trasportato per mezzo di autocisterne o con idrogenodotti. Fra le due opzioni, entrambe praticabili con le tecnologie attuali, esistono grosse differenze di costo e quindi solo specifiche analisi tecnico-economiche per le singole applicazioni possono determinare quale sia di volta in volta la soluzione migliore.

Tubazioni di grosse dimensioni in acciaio standard (e quindi senza requisiti specifici) hanno trasportato idrogeno in Germania, nel distretto della Ruhr, dai produttori ai consumatori sin dal 1938, senza particolari problemi di sicurezza (le tubazioni erano provviste di sensori per possibili fughe ed erano previste periodiche ispezioni di controllo).

D'altra parte è utile ricordare come anche in Italia, per più di 70 anni, si è distribuito nelle città senza problemi particolari il cosiddetto "gas di città", costituito da miscele di idrogeno (50%) e monossido di carbonio (50%), dove l'elemento di maggiore pericolosità era il monossido di carbonio, in quanto altamente tossico. Attualmente anche città a densità di popolazione estremamente elevate, come Pechino, sono servite da reti di distribuzione di questo tipo di gas. Idrogenodotti di dimensioni significative sono attualmente presenti in diverse nazioni: esiste una rete di circa 170 km nella Francia del Nord, per un totale nell'intera Europa di più di 1.500 km. Il Nord America, poi, possiede più di 700 km di condutture per il trasporto dell'idrogeno.

L'esperienza accumulata nel settore della distribuzione gas può quindi essere utilizzata in maniera molto diretta anche per la realizzazione e l'esercizio di reti di distribuzione dell'idrogeno, grosso modo simili alle attuali reti per il gas naturale; le maggiori differenze potrebbero risiedere nei materiali utilizzati (alcuni acciai, tipo quelli al cromo e al molibdeno, hanno migliore compatibilità con l'idrogeno) e nei criteri di progetto delle stazioni di pompaggio. In particolare, sebbene abbia una densità energetica volumetrica minore di quella del gas naturale, l'idrogeno è meno viscoso, per cui, con un'adatta progettazione, l'energia necessaria per il suo pompaggio diventa paragonabile a quella richiesta per la stessa quantità di energia trasportata con il gas naturale.

Reti di distribuzione per idrogeno liquido, risultando particolarmente costose e di difficile gestione, sono state realizzate solo per applicazioni particolarmente specializzate, come il rifornimento di veicoli spaziali.

UTILIZZO

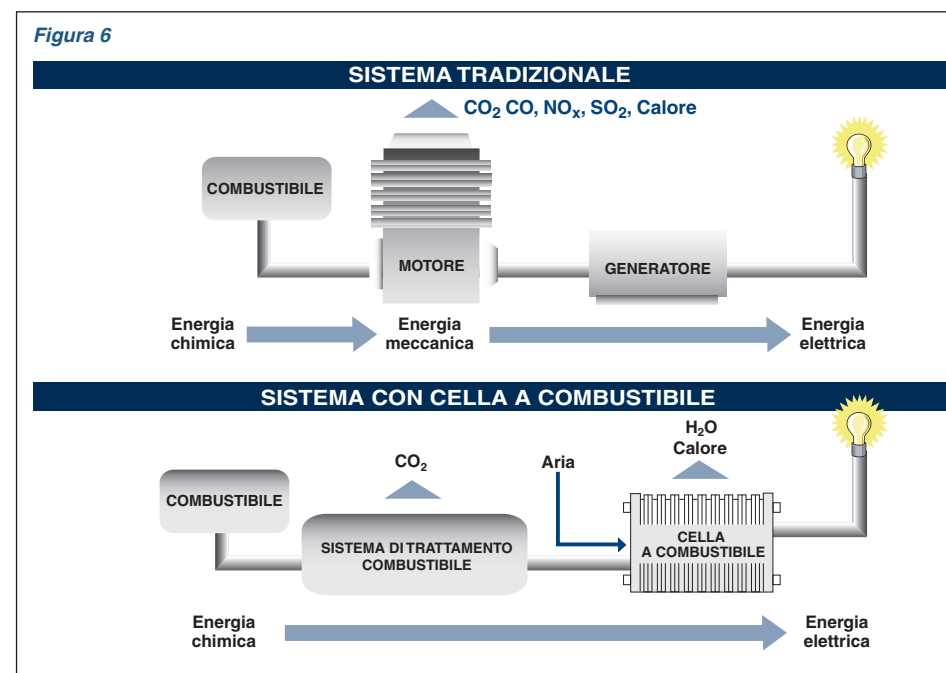
Le due principali utilizzazioni previste in futuro per l'idrogeno e per cui si sta lavorando attualmente nei laboratori di ricerca applicata riguardano l'impiego come combustibile per la generazione di energia elettrica e per il trasporto. Impianti per la produzione centralizzata di energia elettrica e motori a combustione interna alimentati a idrogeno sono già fattibili sulla base delle tecnologie esistenti e anche con emissioni sensibilmente ridotte rispetto a quelle degli impianti convenzionali. Deve tuttavia essere ulteriormente migliorato il rendimento e abbassati i costi; per questo sono in corso di sperimentazione materiali e soluzioni innovative che dovrebbero arrivare a maturazione nel giro di alcuni anni.

Ma lo strumento principale il cui sviluppo condiziona pesantemente la reale affermazione dell'idrogeno come vettore energetico pulito è senza dubbio la cella a combustibile. Diamo qui un cenno sul suo funzionamento e alcune indicazioni sullo sviluppo della tecnologia.

LA CELLA A COMBUSTIBILE

Una cella a combustibile è un dispositivo elettrochimico che converte direttamente l'energia di un combustibile in elettricità e calore senza passare attraverso cicli termici e quindi senza risentire delle limitazioni imposte a questi ultimi dalla termodinamica (figura 6). In sostanza funziona in modo analogo ad una batteria, in quanto produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico; a differenza di quest'ultima, tuttavia, consuma sostanze provenienti dall'esterno ed è quindi in grado di funzionare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile ed ossidante.

Figura 6





Come funziona una cella a combustibile

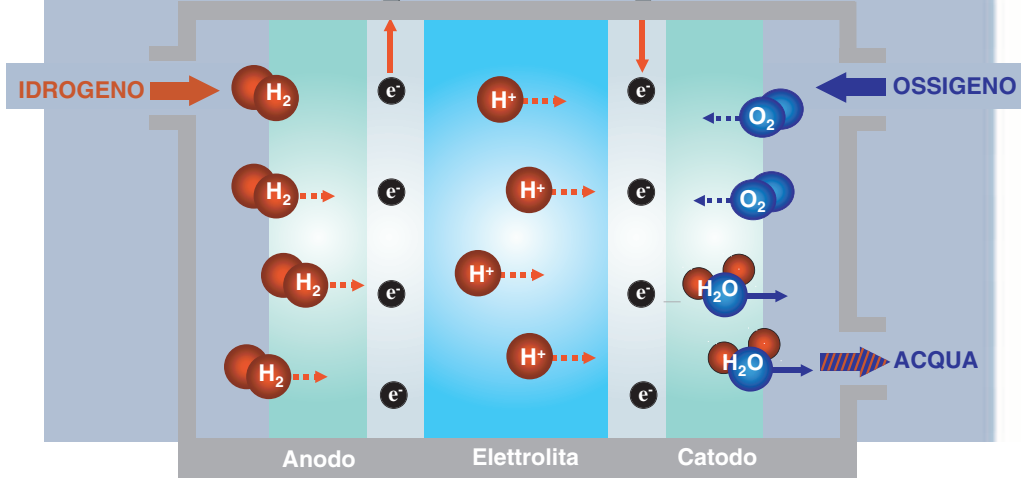
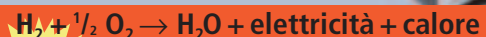
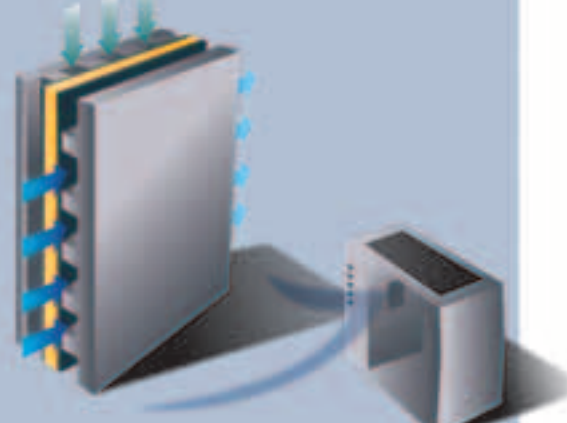
Una cella a combustibile è un dispositivo elettrochimico che converte direttamente l'energia di un combustibile in elettricità e calore, senza passare attraverso cicli termici.

Una cella è composta da due elettrodi 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.

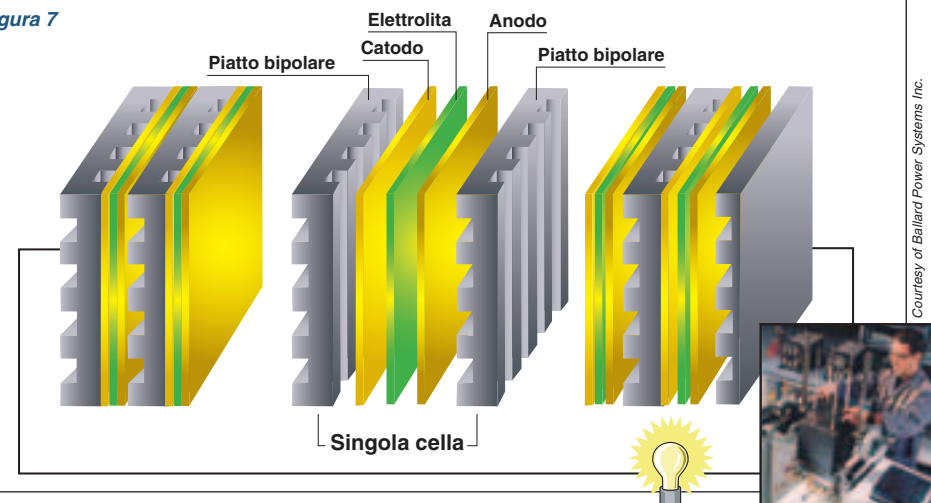
L'elettrolita, che ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiude il circuito elettrico all'interno della cella.

La trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore.



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

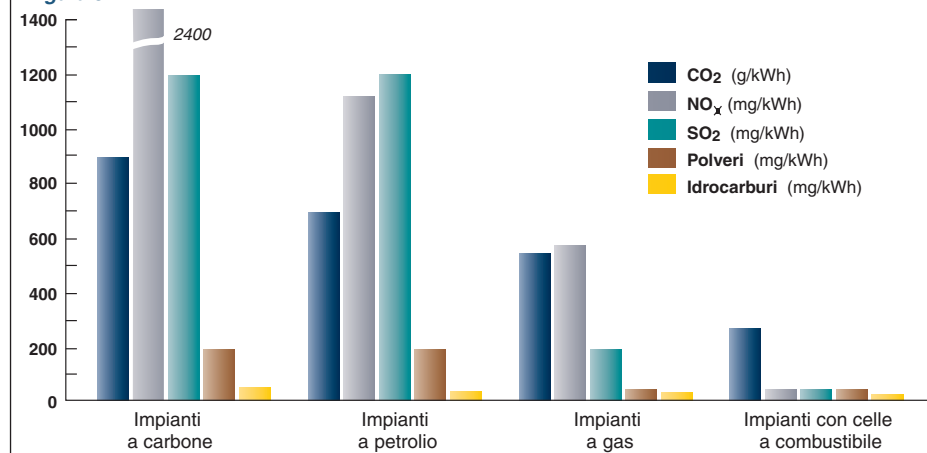
Figura 7



Costruttivamente le celle sono disposte in serie (figura 7), 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. 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 (figura 8) con emissioni trascurabili e bassa rumorosità.

Comunque, nonostante i notevoli progressi compiuti a livello mondiale per affinare la tecnologia e le caratteristiche delle celle (v. riquadro p. 18), 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.

Figura 8





Tipi di celle e loro caratteristiche

Tipi di celle	Temperatura	Elettrolita	Stato della tecnologia	Applicazioni
Celle alcaline	60-120 °C	Idrossido di potassio	Sistemi 5-80 kW	<ul style="list-style-type: none"> • Applicazioni spaziali • Generatori portatili • Trasporto
Celle ad elettrolita polimerico	70-100 °C	Membrana polimerica	Sistemi 1-250 kW	<ul style="list-style-type: none"> • Generazione portatile • Usi residenziali • Trasporto
Celle ad acido fosforico	160-220 °C	Acido fosforico	Impianti dimostrativi fino a 11 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Cogenerazione • Potenza distribuita
Celle a carbonati fusi	600-650 °C	Carbonato di litio e potassio	Impianti dimostrativi fino a 2 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Cogenerazione industriale • Potenza distribuita
Celle ad ossidi solidi	800-1000 °C	Ossido di zirconio drogato	Stack 25 kW Impianto 220 kW	<ul style="list-style-type: none"> • Cogenerazione industriale • Potenza distribuita



Sistema da 1 kW a idrogeno Nuvera Fuel Cells



Impianto UTC Fuel Cells da 1 MW ad acido fosforico



Stack a carbonati fusi Ansaldo Fuel Cells Co per impianto 100 kW



Schema di impianto a carbonati fusi Ansaldo Fuel Cells Co serie 500

LA QUESTIONE SICUREZZA

Esistono ancora molte perplessità per agli aspetti di sicurezza a causa della poca familiarità con questo vettore, il che porta ad applicare condizioni particolarmente restrittive per la sua utilizzazione. Tuttavia, al di là della soggettiva “percezione di rischio”, un’analisi attenta ridimensiona il concetto di pericolosità dell’idrogeno.

Questo gas è meno infiammabile della benzina. Infatti la sua temperatura di autoaccensione è di circa 550 °C, contro i 230-500 °C (a seconda dei tipi) della benzina.

L’idrogeno è il più leggero degli elementi (quindici volte meno dell’aria), e perciò si diluisce molto rapidamente in spazi aperti.

È praticamente impossibile farlo detonare, se non in spazi confinati. Per individuare concentrazioni potenzialmente pericolose (> 4% in aria) si utilizzano sensori che possono facilmente comandare adeguati sistemi di sicurezza.

I veicoli prototipo della BMW, ad esempio, hanno vetri e tettuccio che, in caso di presenza del gas, si aprono automaticamente.

Quando brucia, l’idrogeno si consuma molto rapidamente, sempre con fiamme dirette verso l’alto e caratterizzate da una radiazione termica a lunghezza d’onda molto bassa, quindi facilmente assorbibile dall’atmosfera.

Per contro materiali come la benzina, il gasolio, il GPL od il gas naturale sono più pesanti dell’aria e, non disperdendosi, rimangono una fonte di pericolo per tempi molto più lunghi. È stato calcolato, facendo uso di dati sperimentali, che l’incendio di un veicolo a benzina si protrae per 20-30 minuti, mentre per un veicolo ad idrogeno non dura più di 1-2 minuti (figura 9).

La bassa radiazione termica, propria delle fiamme da idrogeno, fa sì che esistano poche possibilità (al di là dell’esposizione diretta alla fiamma) che materiali vicini possano essere a loro volta incendiati, riducendo così, oltre alla durata dell’incendio, anche il pericolo di emissioni tossiche.

L’idrogeno, al contrario dei combustibili fossili, non è tossico, né corrosivo ed eventuali perdite dai serbatoi non causano problemi di inquinamento del terreno o di falde idriche sotterranee.

Figura 9

Tempo: 0 minuti 3 secondi

Tempo: 1 minuto 0 secondi



Auto a idrogeno

Auto a benzina

Auto a idrogeno

Auto a benzina

RICERCA E SVILUPPO

ALL'ESTERO

I principali Paesi industrializzati nel mondo, in particolare Stati Uniti, Giappone, Unione Europea hanno tutti programmi di ricerca e sviluppo in corso, sia a breve che a medio termine, finalizzati a perfezionare la tecnologia delle celle e ad introdurre lo sfruttamento dell'idrogeno nella produzione di energia nel giro di alcuni anni.

A livello europeo, nell'ottobre 2002, è stato costituito un gruppo di esperti composto da rappresentanti di grandi industrie del settore automobilistico ed energetico, dei servizi pubblici, di istituti di ricerca, con il compito di definire un programma e le priorità per promuovere la diffusione e l'utilizzo dell'idrogeno.

Nel giugno 2003 a Bruxelles è stato da questi presentato un documento sulla "Visione Europea" che, di pari passo con lo sviluppo delle celle a combustibile e delle tecnologie correlate, prevede che intorno al 2050 l'idrogeno prodotto da fonti rinnovabili rivestirà un ruolo importante nella produzione di energia.

IN ITALIA

In Italia, da un punto di vista energetico, la disponibilità di un vettore flessibile e pulito prodotto a partire da fonti diversificate, sia fossili che rinnovabili, è di estremo interesse per il nostro Paese, vista la sua dipendenza dalle importazioni di gas e di petrolio e l'estrema vulnerabilità del sistema elettrico in caso di aumento dei consumi o di difficoltà di importazione dell'energia.

Analogo interesse rivestono i risvolti ambientali connessi con tale scelta che potranno favorire il conseguimento degli obiettivi previsti dal Protocollo di Kyoto⁽⁵⁾ e dare un contributo significativo alla riduzione dell'inquinamento locale.

In particolare l'impiego dell'idrogeno nei trasporti contribuirebbe a migliorare la qualità dell'aria nei centri urbani che, nonostante i grandi progressi realizzati e attesi nei veicoli convenzionali e nei relativi sistemi di abbattimento, ancora presenta delle criticità (smog fotochimico, particolato, poliaromatici, ecc.).

Infine, per ultimo ma non ultimo, tutti questi benefici si combinano anche con gli interessi dell'industria nazionale: l'essere presenti nel mercato che si aprirà di qui a pochi anni è indispensabile per aspirare a una posizione competitiva in questo business.

D'altra parte, gli ingenti investimenti necessari richiedono il coinvolgimento attivo e convinto dei principali attori nazionali interessati (governo, società energetiche, industrie, utenti, strutture di ricerca); inoltre le numerose competenze necessarie e i diversi interessi coinvolti devono essere gestite in un quadro organico e unitario, che persegua in maniera coordinata obiettivi di interesse strategico per il Paese, avvalendosi anche di collaborazioni internazionali.

L'ENEA, per il suo ruolo e le sue competenze, intende contribuire allo sviluppo di tale programma in collaborazione con tutti i soggetti nazionali interessati.

Nel (v. riquadro p. 21) sono illustrati, a titolo di esempio, alcuni sistemi di celle a elettrolita polimerico a cui sta lavorando attualmente l'Ente.

(5) Il Protocollo di Kyoto del 1998 prevede che tutti i Paesi industrializzati si impegnino a ridurre, per il periodo 2008-2012, il totale delle emissioni di gas ad effetto serra almeno del 5% rispetto ai livelli del 1990. L'Italia si è impegnata per il 6,5%.



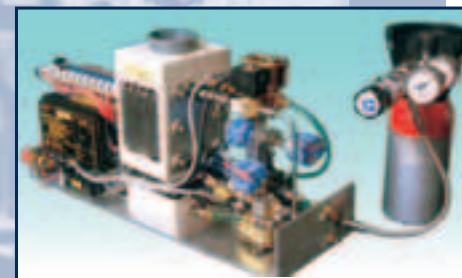
Sistemi di celle

*Sistema da 15kWe a gas naturale (1999-2003)
MIUR L. 95/95*

Partner: CNR-IT AE, Nuvera Fuel Cells Europe, Politecnico di Milano, Università di Roma, Genova e Torino.



*Realizzazione e sperimentazione di un sistema di propulsione a idrogeno da 30 kW di tipo ibrido con celle a combustibile (PEFC 5 kW) per trazione.**



*Prototipi di diversa taglia (portatile da 150 W, unità da 300 W per bicicletta elettrica).**



* Stack **NUVERA**

Riassumendo, le attività previste in Italia per il breve-medio termine riguarderanno:

1 per la produzione:

- la generazione di idrogeno pulito a partire da combustibili fossili;
- la valutazione e la fattibilità delle opzioni disponibili per il confinamento della CO₂;
- la produzione da fonti rinnovabili, in particolare dall'energia solare;
- la messa a punto di sistemi di trasporto e distribuzione; la creazione di una rete di infrastrutture e di stoccaggio;

2 per l'utilizzazione:

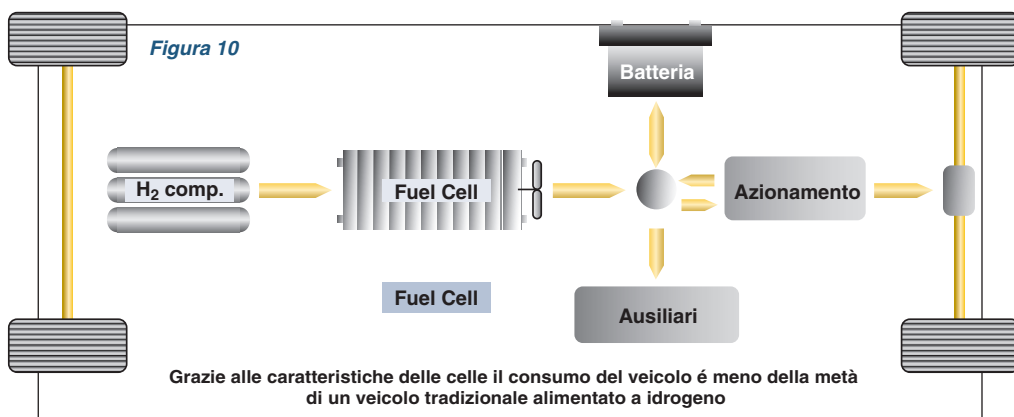
- la generazione di energia elettrica stazionaria, sia centralizzata in impianti di taglia industriale, sia distribuita in sistemi portatili e per utenze familiari;
- lo sviluppo di autoveicoli funzionanti a idrogeno.

I VEICOLI A IDROGENO

Come si è visto nel riquadro a pagina 4, a livello globale circa il 30% delle emissioni di CO₂ in atmosfera è causato dai trasporti, del resto responsabili anche per altri tipi di inquinamento. Oltre ad agire sull'efficienza dei veicoli tradizionali e a cercare di utilizzare combustibili più puliti, per cercare di limitare l'effetto serra appare opportuno sviluppare la tecnologia del veicolo elettrico e, fra le varie soluzioni, quella più promettente a medio-lungo termine è basata sull'uso dell'idrogeno in veicoli equipaggiati con celle a combustibile. È per questi motivi che si dedicherà un po' di attenzione all'approfondimento di questa opportunità.

L'UTILIZZO DELLE CELLE A COMBUSTIBILE NELLA TRAZIONE

L'intervento in questo settore è orientato allo sviluppo sia di motori a combustione interna, sia di motori con celle a combustibile (fig. 10), questi ultimi essenziali per un sistema di trasporto a minimo impatto ambientale. L'uso delle celle a combustibile per la trazione presenta infatti numerosi vantaggi ma comporta un grosso cambiamento rispetto alla filosofia attuale dei veicoli.



I veicoli con motori a celle a combustibile hanno tutte le caratteristiche (v. riquadro sotto) di un veicolo elettrico, in quanto il sistema di generazione produce corrente continua. Su questi si troveranno quindi tutti i sistemi di regolazione e controllo della trazione propri dei veicoli a batteria. Inoltre la presenza di un motore elettrico e di un sistema di accumulo consente il "recupero in frenata", opzione che, soprattutto in cicli caratterizzati da molte accelerazioni e frenate, come quelli urbani, può portare a notevoli risparmi di combustibile.

i Veicoli con motori a celle a combustibile

Pro

- Emissioni zero
- Alta efficienza
- Buone prestazioni (autonomia, accelerazione)
- Bassi costi di manutenzione (confrontati ai motori a combustione interna)

Contro

- Stoccaggio a bordo dell'idrogeno
- Infrastrutture
- Sicurezza e normativa

Le prestazioni sono paragonabili a quelle dei veicoli tradizionali e l'autonomia dipende ancora una volta dalla tecnologia utilizzata per lo stoccaggio dell'idrogeno ma la maggior efficienza delle celle a combustibile (circa il doppio dell'equivalente motore convenzionale su cicli urbani, in quanto le celle non sono penalizzate nel funzionamento a potenza ridotta) semplifica un poco questo problema.

La guidabilità è quella dei veicoli elettrici che, come detto, ben si presta soprattutto a cicli urbani caratterizzati da accelerazioni a bassa velocità.

L'impatto ambientale di un veicolo a celle alimentato ad idrogeno è praticamente nullo, con i gas di scarico che contengono solamente aria e vapor d'acqua. Le caratteristiche delle celle (modularità, rendimenti elevati anche per dimensioni medio-piccole e per carichi parziali) permettono inoltre la realizzazione di veicoli con taglie anche molto diverse (dalla bici all'auto, all'autobus, alle motrici ferroviarie) con la stessa tecnologia e con caratteristiche di prestazioni, consumi ed impatto ambientale equivalenti.

Nel campo della trazione, dopo i primi prototipi realizzati con tecnologie diverse, il tipo di cella su cui si sono concentrati tutti i costruttori di veicoli è quello ad elettrolita polimerico, che meglio soddisfa i requisiti specifici dell'uso sui veicoli stradali (v. riquadro sotto). Anche il grado di maturità tecnologica sta crescendo, avendo le maggiori case automobilistiche già realizzato i primi prototipi marcianti, sia di autovetture che di autobus, anche se resta ancora molta strada da fare per iniziare una produzione di serie.

i Celle a elettrolita polimerico

Rappresentano la tecnologia su cui sono focalizzate le attività di sviluppo dei principali costruttori automobilistici.

Vantaggi

- Funzionamento a bassa temperatura
- Elevata densità di potenza dello stack (~ 1,7 kW/l, ~ 1,3 kW/kg)
- Assenza di problemi di corrosione tipici di altri tipi di celle con elettrolita liquido
- Relativa semplicità costruttiva
- Rapidità di partenza a freddo (circa un minuto)
- Con idrogeno come combustibile il veicolo è a "zero emissioni"

Il fattore chiave su cui occorre focalizzare l'attenzione è rappresentato dalla riduzione dei costi. Il target per un sistema con celle a combustibile, fissato dai costruttori di veicoli, è dello stesso ordine di grandezza di quello degli odierni motori (50-100 \$/kW) ma attualmente il costo di questi ultimi è di gran lunga inferiore a quello degli attuali prototipi di sistemi con celle (5.000-10.000 \$/kW).

Data la semplicità costruttiva di queste è facile ipotizzare che, in presenza di produzioni di massa, tali costi potranno essere drasticamente ridotti, almeno per quanto riguarda la manodopera e le lavorazioni meccaniche, ma attualmente il costo dei materiali (particolarmente catalizzatore, elettrodi e membrana) è ancora troppo alto per raggiungere gli obiettivi prefissati. Comunque tutti i principali costruttori automobilistici hanno in corso ricerche per tentare di abbattere i costi di questi componenti (figura 11).

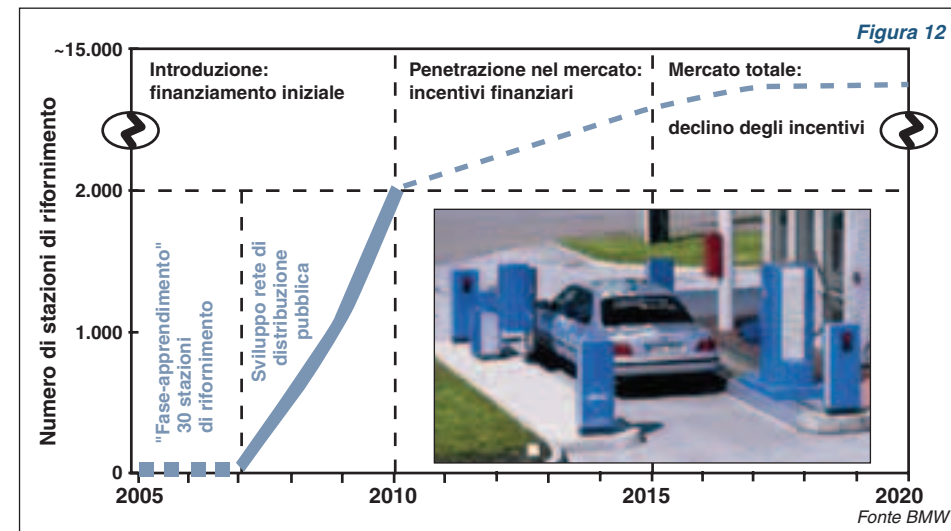


QUANDO IL VEICOLO A IDROGENO?

Vi sono diversi impedimenti che si oppongono alla penetrazione del veicolo a idrogeno e che richiedono uno sforzo notevole per la loro rimozione da parte di tutti i soggetti coinvolti (ed in particolare da parte delle autorità pubbliche) per far sì che la tecnologia si affermi definitivamente su larga scala nel giro di qualche decennio. Le principali barriere sono tecnologiche, strutturali, economiche, normative, di accettazione sociale.

Tra i problemi tecnologici, il sistema d'accumulo dell'idrogeno a bordo è uno dei più critici in quanto condiziona pesantemente l'autonomia del veicolo rispetto ai concorrenti convenzionali a causa dell'eccessivo peso e ingombro dei serbatoi attuali. Vanno pertanto intensificati gli sforzi in ricerca, sviluppo e dimostrazione sulle opzioni di stoccaggio praticabili, con l'obiettivo di aumentare la densità energetica sia in volume sia in peso. Inoltre, il costo di una cella ad elettrolita polimerico, in un sistema di produzione ottimizzato di scala industriale, risulterà molto influenzato dal contenuto di metalli preziosi nel catalizzatore. È pertanto necessario operare una riduzione del contenuto di platino nei catalizzatori e, in prospettiva, l'utilizzo di nuovi materiali sostitutivi di costo inferiore.

Fra gli ostacoli strutturali si può includere la mancanza di una rete di stazioni di rifornimento: l'avvio della realizzazione delle infrastrutture di distribuzione è un'operazione complessa da attuarsi con i produttori di autoveicoli, sia per l'incertezza sulla redditività dell'investimento, in mancanza di una domanda ben quantificabile, sia per quanto riguarda la scelta delle tecnologie di produzione dell'idrogeno, la fonte da usare, la modalità d'approvvigionamento, la scelta dei siti. Dovranno essere previste almeno due fasi: una prima, sperimentale, durante la quale l'idrogeno potrà essere fornito da strutture ad hoc predisposte presso i gestori delle flotte ed aperte all'utenza esterna; una seconda, accompagnata necessariamente da incentivi pubblici per coprire le perdite iniziali, in cui la commercializzazione dovrà essere accompagnata, se non preceduta, dal-



la realizzazione di un numero adeguato di strutture di rifornimento distribuite sul territorio, in modo da non pregiudicare il successo (figura 12).

I costi di un veicolo a idrogeno rappresentano un altro handicap con cui confrontarsi. Dopo la fase prototipale in cui tali mezzi sono comunque fuori mercato, le valutazioni, dopo circa 15 anni dall'avvio della fase di commercializzazione e una volta che siano subentrate economie di scala, oscillano intorno al prezzo di 20.000 US\$ per autovettura, superiore di circa 2.000 US\$ rispetto alla stima del prezzo di un'autovettura convenzionale equivalente.

Si rendono poi necessari interventi tempestivi mirati all'adeguamento della normativa, strutturata ora sulla tecnologia dei mezzi convenzionali di trasporto, così come sarebbero utili norme incentivanti, che privilegino la circolazione degli autoveicoli a idrogeno nei centri urbani, in quanto a basso impatto ambientale, o che sopperiscano ad alcune difficoltà di ordine pratico dovute, per esempio, all'incertezza di poter disporre di un conveniente mercato dell'usato per il veicolo, alla difficoltà in alcuni casi di assicurarlo e/o di avere premi di assicurazione confrontabili a quelli dei veicoli convenzionali, ecc.

Infine, a livello psicologico, i cittadini tendono mediamente a privilegiare l'uso delle tecnologie consolidate perché più familiari e quindi percepite più sicure e più vantaggiose. La penetrazione di una nuova tecnologia quindi dovrà essere accompagnata da una campagna di informazione tendente a ridurre la barriera di accettabilità sociale, attraverso una evidenziazione dei vantaggi connessi alla tecnologia e delle modalità per superare i possibili inconvenienti.

Dovrà rendersi noto, pertanto, che sia la sicurezza sia le prestazioni degli impianti e della tecnologia dell'idrogeno non hanno niente da invidiare rispetto a quelli tradizionali; in particolare anzi, i vantaggi ambientali si presentano indubbiamente superiori. L'utente, quindi, dovrà sviluppare una sensibilità ecologica più spinta e considerarsi sempre più protagonista nella realizzazione di una società compatibile con la salvaguardia dell'ambiente. Solo in questo caso l'idrogeno ci potrà realmente dare una mano a mantenere l'aria più pulita e a migliorare la vivibilità del pianeta.

L'ENEA pubblica altri opuscoli sulle scelte più convenienti che tutti noi possiamo adottare per risparmiare energia e proteggere l'ambiente.

Potete richiedere gratuitamente gli opuscoli che vi interessano a:

ENEA-Unità RES RELPROM

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 000196 Roma - Fax 0636272288



ENEA

Ricerca e Innovazione per lo Sviluppo Sostenibile del Paese

L'ENEA è un ente di diritto pubblico operante nei campi della ricerca e dell'innovazione per lo sviluppo sostenibile, finalizzata a promuovere insieme gli obiettivi di sviluppo, competitività e occupazione e quello della salvaguardia ambientale. Svolge altresì funzioni di agenzia per le pubbliche amministrazioni mediante la prestazione di servizi avanzati nei settori dell'energia, dell'ambiente e dell'innovazione tecnologica.

In particolare l'Ente:

- svolge, sviluppa, valorizza e promuove la ricerca in tema di energia, ambiente e innovazione tecnologica nel quadro dei programmi di ricerca nazionali, dell'Unione Europea e di altre organizzazioni internazionali;
- sostiene e favorisce i processi di innovazione e di trasferimento tecnologico al sistema produttivo e alle pubbliche amministrazioni;
- fornisce supporto tecnico specialistico ed organizzativo alle amministrazioni, alle regioni e agli enti locali, nell'ambito di accordi di programma con i Ministeri dell'Industria, dell'Ambiente e dell'Università e della Ricerca Scientifica e con altre amministrazioni pubbliche.

L'Ente ha circa **3.600 dipendenti** che operano in Centri di Ricerca distribuiti su tutto il territorio nazionale. Nelle diverse regioni sono anche presenti **13 Centri di Consulenza Energetica Integrata** per la promozione e la diffusione degli usi efficienti dell'energia nei settori industriale, civile e dei trasporti.

C.C.E.I. Centri di Consulenza Energetica Integrata

Veneto - C.C.E.I. ENEA - Calle delle Ostreghe, 2434 - C.P. 703 - 30124 VENEZIA - Tel. 0415226887 - Fax 0415209100 - **Liguria** - C.C.E.I. ENEA - Via Serra, 6 - 16122 GENOVA - Tel. 010567141 - Fax 010567148 **Toscana** - C.C.E.I. ENEA - Via Ponte alle Mosse, 61 - 50144 FIRENZE Tel. 0553241227 - Fax 055350491 - **Marche** - C.C.E.I. ENEA - V.le della Vittoria, 52 - 60123 ANCONA - Tel. 07132773 - Fax 07133264 - **Umbria** - C.C.E.I. ENEA - Via Angeloni, 49 - 06100 PERUGIA - Tel. 0755000043 Fax 0755006389 - **Lazio** - C.R. Casaccia - Via Anguillarese, 301 - 00060 ROMA - Tel. 0630483245 - Fax 0630483930 **Abruzzo** - C.C.E.I. ENEA - Via N. Fabrizi, 215/15 - 65122 PESCARA - Tel. 0854216332 - Fax 0854216362 - **Molise** - C.C.E.I. ENEA - Via Mazzini, 84 - 86100 CAMPOBASSO - Tel. 0874481072 - Fax 087464607 - **Campania** - C.C.E.I. ENEA - Via della Costituzione Isola A/3 - 80143 NAPOLI - Tel. 081691111 - Fax 0815625232 - **Puglia** - C.C.E.I. ENEA - Via Roberto da Bari, 119 - 70122 BARI - Tel. 0805248213 - Fax 0805213898 - **Basilicata** - C.C.E.I. ENEA - C/o SEREA - Via D. Di Giura, s.n.c. - 85100 POTENZA - Tel. 097146088 - Fax 097146090 - **Calabria** - C.C.E.I. ENEA - Via Argine Destra Annunziata, 87 - 89100 REGGIO CALABRIA - Tel. 096545028 - Fax 096545104 - **Sicilia** - C.C.E.I. ENEA - Via Catania, 2 - 90143 PALERMO Tel. 0917824120 - Fax 091300703

ENEA