



OSSERVATORIO  
PER L'ENERGIA  
«MARIO SILVESTRI»

di Gian Paolo Beretta\* ed Ernesto Pedrocchi\*\*

## CONFRONTO TRA I VETTORI ELETTRICITÀ E IDROGENO

*Hydrogen is often presented as an ideal solution to all environmental energy problems. The potential role of hydrogen is confused with that of fuel cells and of CO<sub>2</sub> segregation, which is feasible also while producing electricity. In this context, the paper proposes a critical analysis of the role that hydrogen might have in the future of environmental energy problems, with reference to currently available and mature technologies for its management.*

*Sempre più frequentemente l'idrogeno viene presentato come la soluzione integrale a tutti i problemi energetico-ambientali. Si confondono le potenzialità dell'idrogeno con quelle delle celle a combustibile e con il sequestro e il confinamento della CO<sub>2</sub>, alternativa praticabile anche con la produzione di energia elettrica. In questo contesto si propone un'analisi tecnico-scientifica sul ruolo che l'idrogeno potrà avere nel futuro dei problemi energetico-ambientali, con riferimento alle tecnologie mature e non futuribili per la sua gestione.*

**I**n questi tempi si sente frequentemente parlare dell'idrogeno come «la soluzione» ai problemi energetici ambientali: la panacea di tutti i mali. Si arriva a parlare di «civiltà dell'idrogeno» contrapposta a quella del petrolio (Ogden 1999, Williams 2001, Bauen 2003, Gretz 2002 e 2003) e prospettata da certi futurologi come la soluzione definitiva per il futuro dell'energia. La pubblica opinione è frastornata da messaggi demagogici, fuorvianti e scientificamente non chiari. I mass media, che per vocazione non sono mai su posizioni prudenti, amplificano ed ali-

mentano le speranze sull'idrogeno «salva mondo». Si rischia così di far crescere un consenso sociale, prevalentemente emotivo, difficilmente riconducibile entro un'impostazione scientificamente corretta, con il risultato di convincere i politici ad apportare gravi tagli ai fondi per la ricerca e l'innovazione su altri temi promettenti, per dirottare ingenti finanziamenti sul tema dell'idrogeno.

La prospettiva dell'idrogeno fa comodo a molti. I politici sia a livello locale che centrale sono propensi, salvo rare eccezioni, ad elargire finanziamenti alle ricerche sull'idrogeno; è questa una scelta comoda proiettata in un futuro lontano pertanto poco impegnativa, ma pagante nell'immediato in termini di consenso. Gli ambientalisti, che puntano sempre al futuribile utopico, vedono di buon occhio l'idrogeno, l'ennesima chimera che garantisce immobilità e mancanza di concretezza e non analizzano criticamente se è davvero positiva per l'ambiente. Non pochi ricercatori, pur con posizioni sfumate e differenti, vedono nelle ricerche sull'idrogeno l'occasione buona per acquisire facili finanziamenti e ne fruiscono alimentando però la disinformazione e fornendo un avallo scientifico non sempre meritato. Chi assume nei confronti dell'idrogeno una

\* Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Brescia  
E-mail: beretta@unibs.it

\*\* Dipartimento di Energetica, Politecnico di Milano  
E-mail: ernesto.pedrocchi@polimi.it

posizione critica o comunque scettica è additato spesso come «negazionista», oscurantista e osteggiatore del progresso e vincolato al mantenimento dello *status quo* da non ben definiti interessi economici. Ma gli scettici sono tanti specialmente nel mondo scientifico (Nellis et al. 2004, Turner 2004, Georgia 2003, Keith 2003, Bessel 2003, Shinnar 2003, Zorzoli 2004, Kennedy 2004).

In questo contesto ci pare opportuna un'analisi critica semplice, ma ancorata a basi sperimentali e scientifiche, sul ruolo, comunque marginale, che l'idrogeno potrà avere nel futuro dei problemi energetico-ambientali e sulle opzioni alternative.

Produrre idrogeno, accumularlo, trasportarlo e consumarlo nell'uso finale (ad esempio la propulsione di un veicolo), comporta una catena di processi che dissipa molta dell'energia primaria utilizzata (le leggi della termodinamica sono inviolabili) e richiede una serie di infrastrutture molto sofisticate e costose. Il vettore elettricità è meno energivoro e le infrastrutture (la rete elettrica) sono ben sperimentate e sicure.

### 1. I POSSIBILI RUOLI DELL'IDROGENO

L'idrogeno è un ottimo combustibile, produce alte temperature di fiamma ed è leggero, ideale per la propulsione di razzi. La combustione con aria dell'idrogeno produce quasi solo vapore acqueo: non produce né monossido di carbonio, né incombusti, né ossidi di zolfo, né polveri sottili, ma solo un po' di ossidi di azoto in quantitativi comparabili o leggermente superiori a quanto prodotto dalla combustione del metano. L'idrogeno può essere in via teorica usato

per la trazione, per il riscaldamento, per gli usi domestici e per la generazione elettrica. L'idrogeno è anche il combustibile per eccellenza, ma non l'unico, per le celle a combustibile dove il suo utilizzo non produce (direttamente) alcun inquinante. Ma è fondamentale evitare di confondere le *chances* dell'idrogeno con quelle delle celle a combustibile, due opportunità distinte e con prospettive di sviluppo indipendenti e molto differenti.

L'idrogeno libero in natura non c'è, lo si deve produrre e questo processo richiede energia. L'idrogeno si ottiene:

(1) decomponendo l'acqua (elettrolisi o termoscissione, si tratta del processo inverso della combustione essendo l'acqua il prodotto fisiologico della sua ossidazione);

(2) ricavandolo dagli idrocarburi fossili staccandolo dal carbonio con processi termochimici di steam reforming o di ossidazione parziale.

Nel primo caso è necessario fornire energia, in genere pregiata, in quantità superiore, al minimo del 20%, a quella che l'idrogeno saprà poi restituire come suo potere calorifico; nel secondo caso il potere calorifico che si ritrova nell'idrogeno prodotto è nettamente inferiore a quello del combustibile di partenza, indicativamente si va da un 80% partendo da gas naturale al 60% usando il carbone. Bisogna inoltre ricordare che l'idrogeno a causa delle sue intrinseche proprietà (a pari pressione e temperatura è il gas più leggero) presenta gravi difficoltà sia per il trasporto che per l'immagazzinamento; anche compresso a 800 bar o liquefatto a  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , entrambe condizioni di severa sollecitazione per i materiali di contenimento, l'idrogeno ha un contenuto energetico a pari volume circa 3 volte inferiore a quello di benzina e gasolio.

La catena delle infrastrutture per un uso diffuso dell'idrogeno comporta difficili soluzioni tecniche e risulta energeticamente costosa.

Un problema cruciale per la diffusione dell'idrogeno è quello della sicurezza (NASA 2003). Il confronto più significativo è con il gas naturale (assimilato per semplicità al metano) e con la benzina che vengono comunemente accettati come carburanti abbastanza sicuri. Studi affidabili e completi di confronto tra questi tre possibili carburanti ai fini della sicurezza non ci sono e sono oggettivamente molto difficili da realizzare, tenuto conto della complessità dei fenomeni e dei tanti aspetti da considerare. L'idrogeno ha limiti di infiammabilità più ampi ma con il limite inferiore circa eguale a quello del metano ed energia di ignizione molto più bassa; ha però il vantaggio di diffondersi molto più velocemente ed essendo più leggero tende a galleggiare più rapidamente nell'aria riducendo, in spazi aperti, la probabilità di raggiungere le concentrazioni di infiammabilità. I sostenitori dell'idrogeno affermano che può essere maneggiato con sicurezza a condizione di rispettare tutta una serie di precauzioni dovute alla sua natura, che sono però certamente più restrittive e meno conosciute di quelle applicate al metano, alla benzina e al gasolio.

Nonostante queste peculiarità, il vettore idrogeno viene prospettato come possibile alternativa al vettore elettricità, che invece è utilizzato diffusamente dall'uomo nei Paesi sviluppati da più di cent'anni, con reti di distribuzione capillari. L'elettricità risulta facilmente trasportabile (perdite del 5% per 1.000 km), è facilmente accumulabile anche in grandi quantità con i sistemi di ri-pompaggio a doppio bacino

idraulico, è sicuro e facilmente regolabile ed è spesso il vettore energetico prodotto direttamente da tante fonti rinnovabili, dal nucleare e dall'uso energetico del carbone.

Verranno analizzati i ruoli che l'idrogeno potrebbe avere e che sono riconducibili, in pura via teorica, alle seguenti opzioni:

(1) utilizzo dell'idrogeno per la propulsione di veicoli nelle aree cittadine fortemente inquinate, al fine di ridurre il carico di inquinanti locali e migliorare la qualità dell'aria;

(2) produzione di idrogeno con fonti energetiche rinnovabili, specialmente quelle soggette ad aleatorietà ed intermittenza (solare ed eolica) per la loro valorizzazione. Il passaggio attraverso l'accumulo disaccoppia la fase di produzione dell'energia, possibile solo quando la fonte è disponibile, da quella d'utilizzo, superando il vincolo della non contemporaneità;

(3) produzione di idrogeno con l'energia nucleare e/o con il carbone in impianti con sequestro e confinamento della CO<sub>2</sub> al fine di ridurre la produzione globale di gas serra.

Tutte queste opzioni sono percorribili anche con l'uso del vettore elettrico e si confronteranno le *chances* dei due vettori. Le ultime due opzioni permetterebbero anche di far penetrare l'uso di alcune fonti rinnovabili, del carbone e del nucleare in settori dai quali

sono attualmente quasi preclusi (in particolare i trasporti).

Queste opzioni possono ovviamente coesistere, ma è più razionale analizzarne le opportunità distintamente, e poi facile la sovrapposizione degli effetti.

### 1.1. Riduzione dell'inquinamento urbano dovuto ad autotrazione, riscaldamento e altri usi domestici

L'utilizzo che viene prospettato per l'idrogeno nelle città riguarda *in primis* gli autoveicoli, poi gli impianti di riscaldamento e gli usi domestici. Da quando il contenuto di zolfo nei combustibili è stato fortemente ridotto, il settore che dà il maggior contributo al carico inquinante nei centri urbani è quello degli autoveicoli come risulta da tante rilevazioni (Comune di Milano 2003, Demirdoven e Deutch 2004), inoltre esso è anche quello in cui la sostituzione della fonte energetica è di più difficile realizzazione. Si svilupperà quindi la seguente analisi con riferimento a tale settore, ma le considerazioni generali svolte sono valide anche per gli altri due settori.

Dai dati rilevati nella città di Milano, ma estensibili a tantissime città dei paesi industrializzati, si evidenzia che dal 1990 al 2000 le emissioni di quasi tutti gli inquinanti del parco autoveicoli sono all'in-

circa dimezzate (solo gli NO<sub>x</sub> sono diminuiti un po' meno) (Comune di Milano 2003). Questo è avvenuto a seguito del normale ricambio con motori più efficienti e meno inquinanti nonostante l'aumento del numero di veicoli. La qualità dell'aria è significativamente migliorata, salvo per alcuni inquinanti non direttamente legati alle emissioni (ozono e polveri sottili PM10) per i quali il contributo dovuto alle emissioni dagli autoveicoli non è il fattore principale. Considerato che per le polveri sottili la componente principale non deriva dalle emissioni degli autoveicoli, nel complesso si può rilevare che il contenimento dell'inquinamento locale dovuto alle emissioni dai veicoli è già abbastanza ben controllato con le tecnologie ora applicate e in ulteriore fase di miglioramento con l'introduzione di veicoli sempre meno inquinanti e di controlli più rigorosi.

Ma per ridurre a zero le emissioni nelle aree fortemente inquinate (centri urbani) la soluzione migliore è la trazione elettrica non solo applicata ai mezzi pubblici, ma anche a quelli privati. In particolare, la soluzione più promettente a breve è costituita dai veicoli ibridi, che affiancano al motore a combustione interna un motore/generatore elettrico collegato a batterie elettriche e che consentono una limitata autonomia di «solo elettrico» nei centri urbani. Le auto ibride, ormai già in circolazione nelle nostre città in particolare in Giappone e negli Stati Uniti, usano i tradizionali carburanti e costano poco più delle auto tradizionali da cui derivano. Per i veicoli che circolano solo in città la soluzione più opportuna è invece l'auto elettrica a batterie. Lo sviluppo di batterie di accumulo di elettricità per applicazioni elet-





troniche, ad esempio a ioni di litio più leggere delle tradizionali batterie al piombo (con capacità di accumulo di 150 Wh/kg contro 50 Wh/kg), ha consentito di migliorare radicalmente le prestazioni di questi veicoli.

Nei centri urbani fortemente inquinati l'uso dell'idrogeno per alimentare i motori a combustione interna non comporta un grande guadagno sul fronte dell'inquinamento locale perché non elimina gli inquinanti di difficile contenimento, gli  $\text{NO}_x$ . L'uso di auto a idrogeno con celle a combustibile a bassa temperatura, per ora commercialmente non disponibili, porterebbe invece gli stessi vantaggi locali ottenibili con l'auto elettrica a batterie. In effetti l'auto ad idrogeno con celle a combustibile è pur sempre un'auto elettrica e la cella a combustibile è un generatore di elettricità non inquinante.

Né l'auto elettrica a batteria né quella a idrogeno con celle a combustibile consentono livelli di prestazioni «sportive» e di rapporto potenza/peso comparabili con quelli dei motori a combustione interna. Le vetture ibride consentono invece un ragionevole compromesso.

In ogni caso rispetto ai problemi delle emissioni globali di gas serra e dell'efficienza complessiva negli usi delle fonti energetiche, entrambe le soluzioni ad idrogeno comportano un aggravio di consumo di combustibili fossili e maggiori emissioni di  $\text{CO}_2$ , rispetto all'auto elettrica a batteria. Supponendo di partire da gas naturale, nel caso dell'auto a idrogeno la catena di processi è la seguente:

- produzione di gas naturale, produzione di idrogeno, sistema di distribuzione dell'idrogeno, accumulo dello stesso a bordo del veicolo: resa energetica ~50%;

- conversione elettrochimica in celle a combustibile, conversione elettromeccanica: resa energetica ~50%;

- da cui risulta una resa globale di circa il 25%.

Nel caso dell'auto elettrica gli stadi sono invece i seguenti:

- produzione dell'energia elettrica, distribuzione: resa energetica ~45%;

- accumulo nelle batterie a bordo del veicolo, conversione elettromeccanica: resa energetica ~70%;

- da cui risulta una resa globale di circa il 30%. I valori assunti per l'auto elettrica sono dati reali a differenza di quelli assunti ottimisticamente per l'auto a idrogeno.

Il confronto peggiora in termini di consumo di energia primaria a sfavore del veicolo a celle a combustibile volendo ipotizzare l'improbabile e futuribile scenario «tutto rinnovabile» che viene talvolta evocato come contesto ideale dello sviluppo dell'idrogeno come vettore energetico. Infatti partendo da energia elettrica, nel caso dell'auto a idrogeno i processi sono i seguenti:

- produzione per elettrolisi dell'idrogeno, sistema di distribuzione dell'idrogeno, accumulo dello stesso a bordo del veicolo: resa energetica ~50%;

- conversione elettrochimica in celle a combustibile, conversione elettromeccanica: resa energetica ~50%;

- da cui risulta una resa globale di circa il 25%.

Mentre nel caso dell'auto elettrica gli stadi sono i seguenti:

- distribuzione dell'energia elettrica: resa energetica ~90%;

- accumulo nelle batterie a bordo del veicolo, conversione elettromeccanica: resa energetica ~70%;

- da cui risulta una resa globale di circa il 60%.

In tale caso, il veicolo a celle a combustibile comportereb-

be a pari prestazioni consumi complessivi più che doppi rispetto al veicolo elettrico (Eaves 2004).

Certo, anche lo sviluppo dei veicoli elettrici richiede investimenti per il potenziamento della rete di distribuzione dell'elettricità e lo sviluppo di infrastrutture di ricarica e di sostituzione veloce dell'intero blocco delle batterie esaurite, ma una buona parte della catena tecnologica è ben nota e consolidata, inoltre basandosi sulla rete elettrica già esistente, la diffusione di questi veicoli per percorrenze limitate nei centri urbani, dove i benefici ambientali giustificano i maggiori costi, può avvenire da subito e in modo graduale. La ricarica delle batterie potrebbe avvenire prevalentemente nelle ore «vuote» con conseguente positivo spianamento del diagramma di carico. Secondo questa prospettiva è certamente opportuno prevedere una graduale maggiore penetrazione dell'energia elettrica nel sistema energetico.

L'aumento dei prezzi dei carburanti tradizionali derivati dal petrolio con la progressiva internalizzazione dei costi ambientali, sociali e geopolitici dovuti al loro approvvigionamento potrebbe ulteriormente avvantaggiare le auto alimentate con energia elettrica prodotta non da idrocarburi (Demirdoven e Deutch 2004, Douaud 2002, Weiss et al. 2000 e 2003, Keith e Farrell 2003, Shinnar 2003, Eaves 2004).

## 1.2. Valorizzazione di energia da fonti rinnovabili aleatorie

Per la valorizzazione di alcune forme di energie rinnovabili soggette ad aleatorietà ed intermittenza, come l'energia solare, l'eolica e, solo in parte, l'idrica ad acqua fluente, è essenziale la possibilità di accumulo dell'energia prodotta nei

periodi (imprevedibili) di disponibilità della fonte. L'accumulo consente di disaccoppiare il momento della disponibilità da quello dell'utilizzo, consentendo di sfruttare maggiormente la potenzialità di queste fonti rinnovabili che incontrano poche difficoltà a penetrare nel mercato. La modalità concreta per questo utilizzo è la produzione di energia elettrica, che può essere accumulata virtualmente dall'elasticità ed effettiva capacità del complesso sistema formato dalla rete elettrica e dalle centrali di produzione e, quando ciò non fosse sufficiente, può essere accumulata effettivamente mediante ripompaggio in bacini idroelettrici. Come ben noto, un maggior uso delle fonti rinnovabili avrebbe due vantaggi nella strategia energetica generale:

- ridurre i consumi di fonti fossili, e quindi le importazioni se il Paese non ne dispone,
- ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>.

Il passaggio attraverso la produzione di idrogeno potrebbe essere giustificato solo nei rari casi in cui risulti antieconomico raggiungere il sito con la rete elettrica, ma la resa energetica complessiva della catena di conversione sarebbe molto bassa e i costi elevati. Infatti i vantaggi citati sono conseguibili con il vettore elettrico con resa energetica decisamente migliore e con tecnologie note e consolidate. La rete di distribuzione nei Paesi sviluppati già esiste e può essere rinforzata, inoltre sono disponibili sulle reti sistemi di accumulo a pompaggio di grosse quantità di energia collaudati da più di trent'anni con rendimenti di circa il 75%.

Anche gli utilizzi termici sono realizzabili in modo più efficiente con l'elettrotermia che, malgrado l'apparente incongruenza termodinamica, permette - a causa della facilità

di controllo temporale e spaziale della fornitura di energia termica - di ottenere buoni rendimenti complessivi nel riscaldamento ambientale e migliore qualità di prodotto nelle applicazioni industriali. L'elettrotermia è molto diffusa nei Paesi ad elevata penetrazione elettrica (Giappone, Francia e Svezia).

Ovviamente la potenzialità di questo tipo di fonti rinnovabili, pur migliorando, rimarrebbe sempre bassa e marginale rispetto al fabbisogno complessivo, specialmente per i Paesi sviluppati.

Dunque, salvo rari casi particolari in cui la rete elettrica risulti inaccessibile o antieconomica o non dotata di sistemi di accumulo, l'elettricità costituisce il vettore ideale anche per valorizzare le energie rinnovabili soggette ad aleatorietà ed intermittenza (Zorzoli 2004).

#### 1.3. Produzione di idrogeno con l'energia nucleare

Si può certamente produrre idrogeno con l'energia nucleare, sia mediante la nota elettrolisi fatta con l'energia elettrica prodotta in reattori a fissione di tipo tradizionale sia mediante processi, finora poco sperimentati, di termoscissione dell'acqua in reattori particolari ad alta temperatura (Ryskamp 2003). Attualmente l'energia nucleare, che copre circa il 17% del fabbisogno di energia elettrica, ha grande potenzialità di espansione in questo settore con l'utilizzo di tecnologie consolidate; questo comporterebbe una significativa riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Ha poco senso proporre di utilizzare l'energia nucleare per produrre idrogeno, ciò potrebbe solo servire a far penetrare questa fonte nel settore dei trasporti sulle lunghe distanze perché nei centri ur-

bani, come già detto, l'auto ibrida e l'auto elettrica risultano migliori di quelle ad idrogeno. Inoltre non pare ragionevole aggiungere a tutte le difficoltà di accettazione sociale che il nucleare già incontra in molte parti del mondo anche le perplessità e le difficoltà legate alla produzione di idrogeno.

#### 1.4. Produzione di idrogeno con il carbone con sequestro e confinamento dell'anidride carbonica prodotta

Si può produrre idrogeno con impianti a carbone mediante vari processi termochimici di gassificazione e di shift. Con tali processi si può sequestrare la CO<sub>2</sub> prodotta per poi pensare a un confinamento per contenere la produzione di gas ad effetto serra. Ma la percorribilità tecnica del processo di confinamento è ancora molto incerta. Inoltre il costo della catena sequestro-confinamento della CO<sub>2</sub> è stimato dell'ordine di 40 euro/tonn. CO<sub>2</sub>, con riferimento a un prezzo del carbone di circa 70 euro/tonn. si avrebbe un costo aggiuntivo per ogni tonnellata di carbone di 100 euro/tonn., il prezzo del carbone risulterebbe moltiplicato per 2,5.

Se il confinamento della CO<sub>2</sub> fosse un'opzione percorribile si potrebbe certamente fare anche producendo energia elettrica. Per far penetrare il carbone nel settore dei trasporti su grandi distanze la strada più ragionevole è quella di produrre dal carbone e/o dal gas naturale carburanti sintetici (tipo Fischer-Tropsch), dimetilere e metanolo.

## 2. CONCLUSIONI

L'utilizzo dell'idrogeno come combustibile localmente non inquinante per aree pro-

tette di piccola estensione (centri urbani), a fronte di grandi difficoltà per le infrastrutture, darebbe solo un modesto miglioramento rispetto a quanto già si può ottenere con le innovazioni in corso sui propulsori tradizionali. Inoltre per i veicoli a impatto ambientale locale quasi nullo per usi di nicchia risulta certamente molto più facile da realizzare l'auto ibrida o l'auto elettrica commercialmente già esistenti.

L'uso dell'idrogeno prodotto con elettrolisi per rivalorizzare alcune fonti energetiche rinnovabili ha come competitore imbattibile il vettore elettrico.

L'utilizzo del nucleare per la produzione di idrogeno è una strada poco proponibile tenuto conto della grande espansione che questa fonte può ancora avere nella produzione di energia elettrica con efficace riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

La produzione di idrogeno da carbone ha senso solo se associata al sequestro e confinamento della CO<sub>2</sub> quando il processo fosse affidabile, ma

ciò comporta un grave aumento dei costi. Per far penetrare l'uso del carbone nel settore trasporti pare più ragionevole puntare sui carburanti sintetici e sul metanolo. In sostanza sembra opportuno riservare l'uso dei derivati dal petrolio e di questi carburanti sintetici al settore dei trasporti e puntare a ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> con la produzione elettrica da nucleare, da fonti rinnovabili, per quanto possibile, e dal carbone qualora il sequestro-confinamento della CO<sub>2</sub> fosse sicuro. Un maggior utilizzo del nucleare e del carbone potrebbe anche calmierare i problemi geopolitici e strategici di approvvigionamento e di dipendenza dalle importazioni di petrolio e gas naturale.

Concentrare tutte le ricerche del settore energia solo sui problemi dell'idrogeno pare insensato e rischia di alimentare una continua corsa a prospettare soluzioni sempre più avveniristiche, senza base tecnico-sperimentale (Grant 2003, Tromp et al. 2003). L'energia è usata molto spesso malamente e ci sono tante opportunità per migliorarne la

gestione. L'innovazione delle macchine e degli impianti esistenti a livello di produzione e di utilizzo, il miglioramento dei sistemi di pompaggio per l'accumulo indiretto dell'energia elettrica e lo studio della produzione di biocarburanti e di carburanti sintetici liquidi da carbone e idrocarburi pesanti sono argomenti di grande interesse. Nel settore dei trasporti a inquinamento locale minimo lo sviluppo dell'auto elettrica e dell'auto ibrida con miglioramento delle prestazioni delle batterie elettriche e dei sistemi di recupero dell'energia di frenata sono argomenti da sostenere e incentivare.

L'economia dell'idrogeno è un miraggio, un favola da futurologi che ammalia e ha ammaliato politici e opinione pubblica in un vortice di disinformazione e strumentalizzazione propagandata in innumerevoli convegni di promozione, un lusso che non possiamo permetterci e che rischia di dissipare le preziose e scarse risorse economiche per la ricerca nel settore energetico.

Milano, Maggio 2005

## BIBLIOGRAFIA

- OGDEN J.M. (1999), *Prospects for building a hydrogen energy infrastructure*, Princeton University.
- WILLIAMS R.H. (2001), *Toward zero emission for transportation using fossil fuel*, Princeton University.
- BAUEN A. (2003), *Renewable Hydrogen and Its Role in a Hydrogen Infrastructure for Vehicle refuelling*, Convegno «Idrogeno, il nostro futuro», nov. 2003 Milano Energia.
- GRETZ J. (2002), *Non ci sono più dubbi: l'idrogeno è il simbolo della speranza*, in «Il Giornale dell'Ingegnere», novembre.
- GRETZ J. (2003), *Idrogeno: lo stoccaggio, il trasporto e la sicurezza*, in «Il Giornale dell'Ingegnere», febbraio.
- NEELIS M.L., VAN DER KOOIJ H.J., GEERLINGS J.J.C. (2004), *Exergetic life-cycle analysis of hydrogen production and storage for automotive applications*, in «International Journal of Hydrogen Energy», vol. 29, 537.
- NASA (2003), *Glenn Safety Manual, Chapter 6 «Hydrogen»*.
- TURNER J.A. (2004), *Sustainable hydrogen production*, in «Science», vol. 305, 972.
- GEORGIA P. (2003), *The False Promise of Hydrogen*, in «National Review», January.

- ELIASSON B., BOSSEL U., TAYLOR G. (2003), *The future of hydrogen economy: brighter or bleaker?*, Final Report, in «EV World», January.
- International Energy Agency (2003), *Moving to a hydrogen economy: dreams and realities*, SLT Report.
- SERVICE R.F. (2004), *The hydrogen backlash*, in «Science», vol. 305, 958.
- Comune di Milano (2003), *Report on the State of the Environment in Milan*.
- DEMIRDOVEN N., DEUTCH J. (2004), *Hybrid cars now, fuel cell cars later*, in «Science», vol. 305, 974, August.
- EAVES S., EAVES J. (2004), *A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles*, in «Journal of Power Sources», vol. 130, 208.
- DOUAUD A.M. (2002), *Potential of alternative fuel options*, Surface Transport Technologies for Sustainable Development, Valencia.
- WEISS M.A., HEYWOOD J.B., SCAFER A., NATARAJAN V.K. (2003), *Comparative assessment of fuel cell cars*, MIT Report LFEE 001 RP.
- SHINNAR R. (2003), *The hydrogen economy, fuel cells and electric cars*, in «Technology in Society», vol. 25, 455.
- KREITH F., WEST R.E. (2002), *Gauging efficiency, well to wheel*, in «Mechanical Engineering Power, June 2003; Transportation Quarterly, Vol.56, 51 (2002).
- WEISS M.A., HEYWOOD J.B., DRAKE E.M., SCAFER A., AUYEUNG F. (2000), *On the road in 2020. A life cycle analysis of the new automobile technologies*, MIT Report EL 00-003.
- General Motors (2002), *GM well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicles systems - A european study*, www.lbst.de/gm-wtw.
- MACLEAN H.L., LAVE L.B. (2003), *Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies*, in «Progress in Energy and Combustion Science», vol. 29, 1.
- KEITH D.W., FARRELL A.E. (2003), *Rethinking hydrogen cars*, in «Science», vol. 301, 315.
- BOSSEL U. (2004), *The hydrogen 'illusion': why electrons are a better energy carrier*, in «Cogeneration and On-Site Power Production», p. 55, March-April.
- GRANT P.M. (2003), *Hydrogen lifts off - with a heavy load*, in «Nature», vol. 474, 129.
- TROMP T.K., SHIA R.L., ALLEN M., EILER J.M., YUNG Y.L. (2003), *Potential environmental impact of a hydrogen economy on the stratosphere*, in «Science», vol. 300, 1740.
- ZORZOLI G.B. (2004), *La promessa idrogeno*, in «Energia», vol. 25, 50.
- KENNEDY D. (2004), *The hydrogen solution*, in «Science», vol. 305, 917, August.
- MACCHI E. (2003), *Dall'economia del petrolio a quella dell'idrogeno*, Rapporto 2003.
- RYSKAMP J.M. (2003), *Hydrogen Production from Nuclear Energy*, IEEE Power Engineering Society Meeting.