

TRL 9

•Actual system “flight proven” through successful mission operations

TRL 8

•Actual system completed and “flight qualified” through test and demonstration (ground or space)

TRL 7

•System prototype demonstration in a space environment

TRL 6

•System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space)

TRL 5

•Component and/or breadboard validation in relevant environment

TRL 4

•Component and/or breadboard validation in laboratory environment

TRL 3

•Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept

TRL 2

•Technology concept and/or application formulated

TRL 1

•Basic principles observed and reported

UN CONCETTO IMPORTANTE:
il *TRL*
technology readiness level

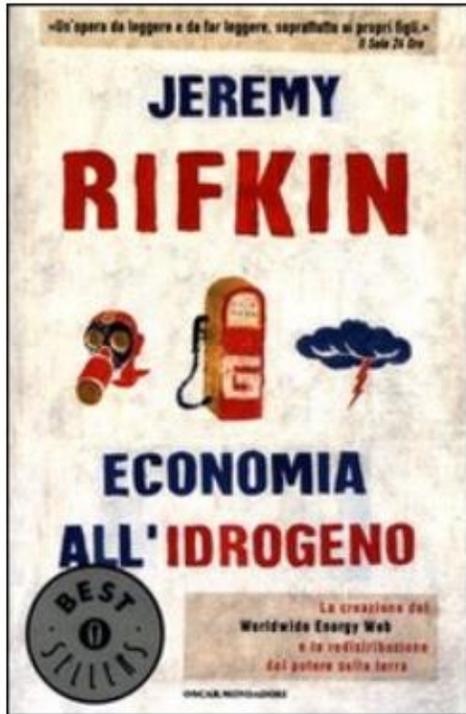
- https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/xt_accordion1.html
- <https://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/support/faqs/faq-2890.html>

G. Technology readiness levels (TRL)

Where a topic description refers to a TRL, the following definitions apply, unless otherwise specified:

- TRL 1 – basic principles observed
- TRL 2 – technology concept formulated
- TRL 3 – experimental proof of concept
- TRL 4 – technology validated in lab
- TRL 5 – technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
- TRL 6 – technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
- TRL 7 – system prototype demonstration in operational environment
- TRL 8 – system complete and qualified
- TRL 9 – actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)

2003



Economia all'idrogeno. La creazione del Worldwide Energy Web e la redistribuzione del potere sulla terra

Jeremy Rifkin

Traduttore: P. Canton

Editore: Mondadori

Collana: Oscar bestsellers

Anno edizione: 2003

Formato: Tascabile

In commercio dal: 23/09/2003

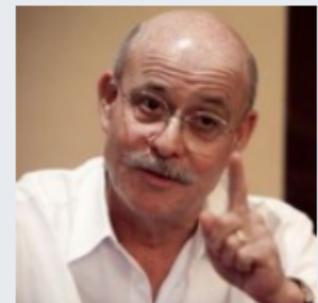
Pagine: 348 p., Brossura

EAN: 9788804521228

Note legali

★★★★★ 7 recensioni

Scrivi una recensione



Jeremy Rifkin, presidente della Foundation on Economic Trends di Washington, insegna alla Wharton School of Finance and Commerce. I suoi corsi all'Executive Education Program vertono sul rapporto fra l'evoluzione della scienza e della tecnologia e lo sviluppo economico, l'ambiente e la cultura.

Attivista del movimento pacifista negli anni '60 e '70, ha fondato nel 1969 la Citizens Commission per denunciare i crimini di guerra americani nella guerra del Vietnam. È il fondatore e presidente della Foundation on Economic Trends (FOET) e presidente della Greenhouse Crisis Foundation.

Fra i suoi libri tradotti in italiano: *La fine del lavoro* (1995) che ha rivoluzionato l'idea di lavoro gettando le basi per molte delle teorie contemporanee, *Il secolo biotech* (1998), *Entropia* (1982), *L'era dell'accesso* (2000), *Ecocidio* (2001), *Economia all'idrogeno* (2002), *Il sogno europeo* (2004), *La civiltà dell'empatia* (2010), *La terza rivoluzione industriale. Come il «potere laterale» sta trasformando l'energia, l'economia e il mondo* (2011), *La società a costo marginale zero. L'internet delle cose, l'ascesa del «commons» collaborativo e l'eclissi del capitalismo* (2014).

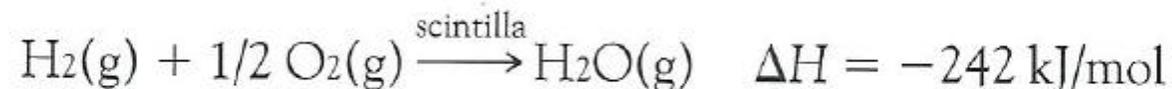
"Credo che l'acqua sarà un giorno impiegata come combustibile, che l'idrogeno e l'ossigeno di cui è costituita, utilizzati isolatamente o simultaneamente, offriranno una sorgente di calore e di luce inesauribili e di un'intensità che il carbon fossile non può dare. L'acqua è il carbone dell'avvenire". Scriveva così **Jules Verne** nel suo romanzo "L'isola misteriosa" nel lontano 1875. **A distanza di 141 anni**, la "visione" di uno dei più grandi scrittori di romanzi scientifici di tutti i tempi potrebbe diventare realtà. Grazie alla scoperta - pubblicata sull'ultimo numero di **Nature Communications** - di **Paolo Fornasiero**, **Maurizio Prato** e **Michele Melchionna** (Università di Trieste) e di **Marcella Bonchio** (Università di Padova), tutti ricercatori afferenti a INSTM.

*"A parità di peso - spiega Maurizio Prato - l'idrogeno contiene quasi tre volte il contenuto energetico del gas naturale e la sua combustione porta semplicemente alla produzione di acqua. Sembra impossibile immaginare a prima vista una fonte energetica più pulita. Ma una così semplice molecola nasconde in realtà **insidie che finora ne hanno rallentato l'utilizzo in campo energetico**".* Infatti in natura **non esistono miniere o riserve di idrogeno**, come per carbone, petrolio o metano. L'idrogeno si trova sempre legato ad altri elementi in molecole semplici, come l'acqua, o più complesse come gli idrocarburi. Ciò significa che esso **deve essere in qualche modo prodotto**.



L'idrogeno: il carburante del futuro?

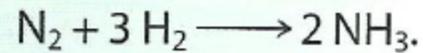
L'idrogeno gassoso può essere usato come combustibile allo stesso modo dei composti contenenti carbonio; alcuni analisti prevedono che il mondo alla fine tenderà a passare a un'economia basata sull'idrogeno. L'idrogeno gassoso si combina con l'ossigeno gassoso per produrre acqua, e in questo processo rilascia una sostanziale quantità di energia.



L'idea che l'idrogeno sarebbe diventato il carburante del futuro risale almeno al 1874, quando venne menzionata da un personaggio del romanzo *l'Isola misteriosa* di Jules Verne. In effetti, l'idrogeno ha già trovato uso in applicazioni per le quali la leggerezza è un fattore importante, principalmente nell'alimentare i razzi Saturn nel viaggio verso la Luna e gli Space Shuttle statunitensi.

L'idrogeno per alcuni aspetti è superiore anche all'elettricità, dato che la sua trasmissione via gasdotti lungo grandi distanze consuma meno energia della trasmissione attraverso i fili di una pari quantità di energia sotto forma di elettricità (e anche perché per l'immagazzinamento locale di energia non sono necessarie batterie).

⇒ Per produrre ammoniaca viene usato il processo Haber:



**L'IDROGENO GASSOSO
NON E'
UNA FONTE DI ENERGIA
BENSÌ
UN VETTORE DI ENERGIA**

Tuttavia, come vedremo di seguito, **i sostanziali problemi tecnici della produzione, immagazzinamento, trasporto e uso dell'idrogeno – oltre alla necessità di creare nuove infrastrutture a esso dedicate – causeranno un ulteriore ritardo nella formazione di un'economia basata sull'idrogeno.** In effetti, la maggior parte dell'idrogeno attualmente prodotto non viene usato come combustibile, ma piuttosto per produrre ammoniaca usata come fertilizzante o per migliorare la qualità di combustibili fossili come quelli delle sabbie bituminose dell'Alberta, oltre che nella gassificazione del carbone e nella produzione di combustibili liquidi sintetici.

È importante capire che l'idrogeno *non* è una *fonte* di energia, dato che esso non è presente come elemento naturale sulla crosta terrestre. L'idrogeno gassoso è solo un **vettore di energia** (o *trasportatore di energia*); esso deve essere prodotto, di solito a partire da acqua e/o metano, *consumando* grandi quantità di energia e/o altri combustibili. L'infrastruttura industriale che sarebbe necessaria per produrre una quantità di idrogeno sufficiente ad alimentare tutti i veicoli circolanti negli USA sarebbe enorme, dato che richiederebbe circa la stessa quantità di energia dell'attuale capacità elettrica complessivamente installata.



⇒ L'importanza relativa delle varie fonti usate per la produzione di idrogeno è: gas naturale > petrolio > carbone.

7.22 Produrre idrogeno a partire da combustibili fossili

Praticamente tutto (>95%) l'idrogeno gassoso attualmente prodotto nel mondo è ottenuto tramite reazioni da combustibili fossili, cioè in modo non sostenibile. **Il gas naturale, il petrolio o il carbone vengono fatti reagire col vapore per formare idrogeno e biossido di carbonio.** Il valore energetico del combustibile viene trasferito dal carbonio agli atomi di idrogeno dell'acqua; chimicamente parlando, lo stato ridotto del carbonio è trasferito all'idrogeno. Le reazioni nette, assumendo che il petrolio abbia formula minima CH_2 e che il carbone sia principalmente grafite, sono



Si noti che in questo modo si produce la stessa quantità di biossido di carbonio che si otterrebbe attraverso la combustione di combustibili fossili in presenza di ossigeno.

Le conversioni vere e proprie si verificano in due fasi:

- In primo luogo il combustibile fossile reagisce col vapore per dare monossido di carbonio e un po' di idrogeno, cioè



Nel caso del gas naturale, il vapore viene preriscaldato a 1000 °C.

- Quindi la miscela di gas di sintesi CO/H₂ e del vapore addizionale viene fatta passare su un idoneo catalizzatore per ottenere altro idrogeno e completare l'ossidazione del carbonio attraverso la reazione di spostamento del gas d'acqua diretta nel senso opposto rispetto a quello mostrato in precedenza, cioè



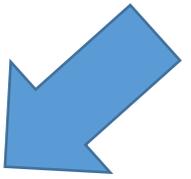
L'idrogeno gassoso potrebbe essere prodotto in modo rinnovabile a partire dalla biomassa fatta crescere allo scopo di alimentare questo ciclo. Inoltre, alcune ricerche indicano che soluzioni acquose sia di glucosio che di glicerina possono essere decomposte a moderate pressioni (27-54 atm) e temperature (225-265 °C) con l'uso di un catalizzatore a base di platino per produrre idrogeno e biossido di carbonio.

⇒ Il vapore necessario per questo processo potrebbe essere generato tramite sistemi di concentrazione dell'energia solare oppure bruciando una parte del metano.

syngas

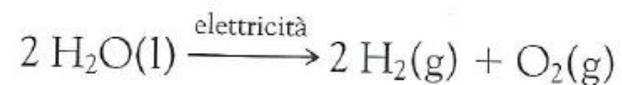
synthetic gas e indica una miscela di gas, essenzialmente monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H₂), con la presenza in quantità variabile anche di metano (CH₄) e anidride carbonica (CO₂).^[1]

A ogni conversione di un combustibile in un altro sono associate perdite di energia, principalmente come calore dissipato. Alcune di queste perdite sono conseguenza dalla seconda legge della termodinamica (che sarà discussa nel Paragrafo 8.16) e non possono quindi essere evitate. Per esempio, l'energia può essere trasferita dal gas naturale all'idrogeno attraverso i processi descritti sopra con un'efficienza di circa il 72%, oppure dal carbone con un'efficienza del 55-60%. Perciò se



7.23 Produzione di idrogeno per elettrolisi

Il sistema commerciale di produzione dell'idrogeno energeticamente più costoso è per elettrolisi dell'acqua, con l'uso di elettricità a corrente continua generata a partire da una fonte di energia:



Sfortunatamente, nel corso di questo processo viene inevitabilmente convertita in calore – e pertanto sprecata – una quantità di energia elettrica pari a un quarto, metà di quella utilizzata complessivamente. Alcuni punti percentuali dell'idrogeno complessivamente prodotto vengono attualmente generati in questo modo, presumibilmente utilizzando energia che altrimenti andrebbe sprecata.

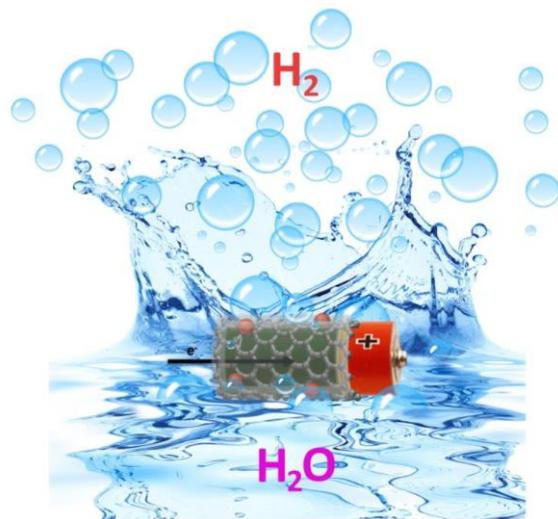
In Arabia Saudita e in Germania esistono dei prototipi di installazioni che si servono dell'elettricità da energia solare per produrre idrogeno, un processo che attualmente ha un'efficienza del 13%. L'energia immagazzinata viene in seguito recuperata facendo reagire l'idrogeno con ossigeno. Per produrre idrogeno per elettrolisi dell'acqua potrebbe anche essere utilizzata l'elettricità prodotta in eccesso da impianti che generano energia idroelettrica, nucleare o eolica – cioè l'energia di uso non immediato – che potrebbe essere recuperata in un secondo momento. Una speranza per il futuro è che i collettori fotovoltaici o l'energia eolica per la raccolta dell'energia solare diventino economicamente efficienti così da generare l'elettricità necessaria a produrre grandi quantità di idrogeno.

⇒ L'acqua viene resa alcalina e capace di condurre l'elettricità per aggiunta di idrossido di potassio, KOH.

Un catalizzatore che si è scoperto essere capace di convertire luce solare in idrogeno tramite l'elettrolisi di acqua è il **biossido di titanio**, TiO_2 . All'elettrodo della cella in azione viene applicato un piccolo potenziale. Il biossido di titanio è stabile alla luce solare (a differenza di molti altri materiali potenzialmente capaci di assorbirla) ed economico, ma da solo assorbe soltanto la luce ultravioletta. Nel momento che all'interno vengono inseriti atomi di carbonio che sostituiscono alcuni degli ioni ossido, l'efficienza di produzione di idrogeno gassoso aumenta di otto volte, fino a oltre l'8% dell'energia fornita dal Sole. L'aggiunta di carbonio estende l'assorbimento fino alla regione visibile dello spettro (a 535 nm), aumentando così di molto l'efficienza della produzione di idrogeno gassoso.

A Trieste si studiano nanotecnologie per la produzione sostenibile di H₂

*“Tralasciando per ora importanti aspetti di stoccaggio, distribuzione e sicurezza dell’idrogeno - **continua Paolo Fornasiero** - il maggiore ostacolo risiede proprio nella sua produzione sostenibile. Al momento esso viene prodotto quasi esclusivamente attraverso un processo chiamato “reazione di reforming”, il quale si basa sulla trasformazione di metano in idrogeno e monossido di carbonio, un **processo di sicuro non sostenibile visto che si basa sull’utilizzo combustibili fossili**”. L’altra strada percorribile è “ottenere una produzione sostenibile di idrogeno partendo da fonti interamente rinnovabili. L’acqua, molecola che ha permesso la vita sulla Terra, può oggi dare vita anche ad una rivoluzione in campo energetico. **L’idrogeno infatti può essere prodotto dall’acqua grazie ad un processo elettrochimico, pulito ed efficiente, noto come elettrolisi**”. Ma per poter essere competitivi è essenziale che i processi di produzione dell’idrogeno siano sempre più efficienti, abbassandone sia i costi sia l’energia impiegata. Ciò richiede necessariamente l’utilizzo di catalizzatori*



Article | [OPEN](#)

Co-axial heterostructures integrating palladium/titanium dioxide with carbon nanotubes for efficient electrocatalytic hydrogen evolution

Giovanni Valenti, Alessandro Boni, Michele Melchionna, Matteo Cargnello, Lucia Nasi, Giovanni Bertoni, Raymond J. Gorte, Massimo Marcaccio, Stefania Rapino, Marcella Bonchio, Paolo Fornasiero ✉, Maurizio Prato ✉ & Francesco Paolucci ✉

Nature Communications **7**,
Article number: 13549 (2016)
doi:10.1038/ncomms13549

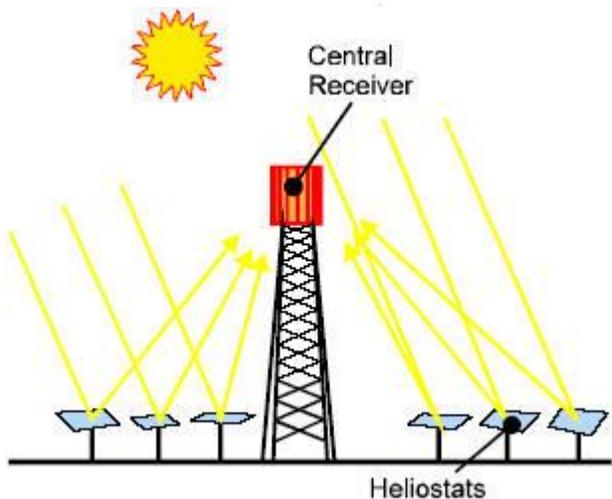
Received: 01 June 2016
Accepted: 13 October 2016
Published: 12 December 2016

7.24 Idrogeno dall'acqua: i cicli termochimici

⇒ Il processo produrrebbe una miscela di ossigeno e idrogeno, che poi dovrebbero essere separati.

In teoria, la conversione termica di luce solare in calore può produrre temperature abbastanza alte da decomporre l'acqua in idrogeno e ossigeno. Una ricerca condotta in Israele con l'uso di una torre solare di specchi (Paragrafo 8.4) per concentrare la luce solare di un fattore di 10 000 e produrre quindi temperature di circa 2200 °C in un reattore, ha avuto successo nello scindere a basse pressioni circa un quarto del vapore acqueo in H₂ e O₂.

Sono stati proposti vari cicli termochimici mediante i quali l'acqua potrebbe essere indirettamente decomposta dal calore in idrogeno e ossigeno. Idealmente, questi cicli devono operare a temperature moderate, essere efficienti nella conversione di calore in idrogeno e non degradare i reagenti, in modo che possano essere riutilizzati.



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319997000591>

 [Download full text in PDF](#) [Export](#) ▾



International Journal of Hydrogen Energy

Volume 23, Issue 4, April 1998, Pages 239-245



Solar “tower reflector” systems: A new approach for high-temperature solar plants

A. Yogev *, A. Kribus *, M. Epstein †, A. Kogan †

 [Show more](#)

[https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00059-1)

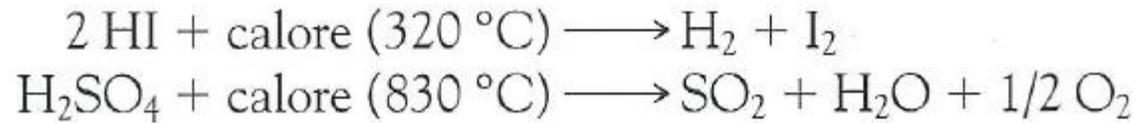
[Get rights and content](#)

Forse fra questi il progetto maggiormente realizzabile in termini pratici è il **ciclo zolfo-iodio**, in cui dello *iodio elementare* viene prima ridotto dal *biossido di zolfo*, SO_2 , a *ioduro di idrogeno*, HI :

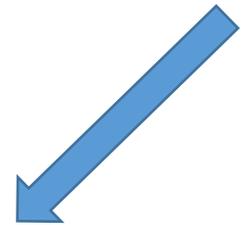


Lo ioduro di idrogeno viene quindi decomposto termicamente generando idrogeno gassoso, col recupero dello iodio elementare, e l'*acido solforico*, H_2SO_4 , viene decom-

posto termicamente liberando ossigeno gassoso e permettendo il recupero del biossido di zolfo:



Dato che i reagenti HI e SO_2 vengono in gran parte recuperati, il ciclo può essere ripetuto molte volte. Il calore prodotto dai reattori nucleari potrebbe alimentare questo ciclo, che ha un'efficienza di conversione di circa il 50%. Tuttavia la progettazione di materiali capaci di sopportare un acido solforico concentrato ad alta temperatura rimane una sfida.



7.25 L'immagazzinamento dell'idrogeno: come liquido o come gas compresso

Nelle applicazioni come combustibile per razzi, l'idrogeno, così come l'ossigeno, viene immagazzinato in forma liquida. Dato che l'idrogeno a 1 atm ha temperatura di ebollizione bassa (20 K, $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$), occorre **spendere molta energia per poter mantenere l'idrogeno liquido molto freddo, dopo che per liquefarlo è stata spesa una quantità considerevole di energia**. Questo svantaggio limita da un punto di vista pratico le applicazioni dell'idrogeno liquido ad alcuni casi particolari in cui la sua "leggerezza" (cioè bassa densità) risulta il fattore più importante. La possibilità di perdite per evaporazione durante i periodi di inattività e al momento del rifornimento impediranno probabilmente l'uso dell'idrogeno liquido nei veicoli commerciali; queste perdite sono ridotte a percentuali minime quando riguardano enormi volumi, cosicché lo stato liquido rimane per il momento la forma migliore di immagazzinamento.

L'idrogeno può essere immagazzinato sotto forma di **gas altamente compresso**, pressappoco nello stesso modo in cui ciò avviene nel caso del metano sotto forma di gas naturale. Tuttavia, rispetto al CH_4 , questo tipo di immagazzinamento presenta uno svantaggio: per rilasciare la stessa quantità di energia si deve immagazzinare una quantità molto maggiore di H_2 gassoso. Infatti, rispetto al metano, la combustione di una mole di idrogeno consuma solo un quarto di ossigeno, e conseguentemente genera soltanto un quarto dell'energia, sebbene entrambi occupino lo stesso volume a parità di pressione (legge dei gas ideali). Perciò la natura "ingombrante" dell'idrogeno gassoso ne limita le applicazioni

Roma, gli autobus a idrogeno faranno il pieno sul Grande raccordo anulare

MOBILITÀ

Pubblicato il 03 GEN 2018



di RUDI BRESSA

Idrogeno compresso

Ciononostante, la maggior parte delle case produttrici di automobili pianifica di utilizzare idrogeno compresso per alimentare i primi modelli di automobili a idrogeno che progetterà, dato che le altre alternative sono ancora meno praticabili per veicoli di piccole dimensioni. Con la tecnologia attuale il serbatoio del combustibile può essere riempito in un tempo variabile da tre a cinque minuti. La maggior parte delle linee di autobus attualmente in prova utilizzano idrogeno compresso sul veicolo stesso, sebbene nei depositi esso possa essere immagazzinato in forma liquida. Probabilmente sarà usata una pressione di circa 700 atm (o 70 MPa) di idrogeno all'interno di serbatoi per veicoli in fibra di carbonio; infatti pressioni ancora maggiori non sono associate al deposito di quantità molto maggiori del gas, dato che in queste condizioni estreme l'idrogeno è molto meno comprimibile di un gas ideale (vedi il Problema 7.12).

È interessante confrontare i volumi di idrogeno necessario per alimentare un'automobile a celle di combustibile a idrogeno (presupponendo un'efficienza del 50%) per 400 km, più o meno l'autonomia di un'automobile efficiente alimentata a benzina fornita di un serbatoio con una capacità di 40-50 L.

idrogeno necessaria è 4 Kg, che occupa:

- 45 000 L, o 45 m^3 , cioè un pallone del diametro di 5 m o un cubo di 3,6 m di lato, come gas alla normale pressione atmosferica, oppure
- 100 L come gas compresso a una pressione di circa 700 atm (attualmente ottenibile), oppure
- 56 L come liquido (o solido) mantenuto alla temperatura di $-252 \text{ }^\circ\text{C}$ (alla pressione di 1 atm), oppure
- 35-75 L se immagazzinato sotto forma di idruro metallico, quando sarà possibile sviluppare dei sistemi efficaci allo scopo, come discusso di seguito.

Nel complesso, il problema di progettare un modo pratico, economico e sicuro di immagazzinare l'idrogeno non è ancora stato risolto, e agli occhi di molti analisti, nonostante l'interesse generale e le attività di ricerca, sembra che "non vi siano svolte in vista". Nella Figura 7.6 sono messe a confronto l'efficacia di diversi sistemi di immagazzinamento dell'idrogeno con quella della benzina e del combustibile per motori diesel. I valori riferiti alla parte liquida e compressa sono comprensivi di quelli, significativi, riferiti ai serbatoi utilizzati per l'immagazzinamento. L'idrogeno liquido è il combustibile più simile a quelli fossili in termini di peso dell'idrogeno per massa totale del sistema.

In questo caso la quantità di

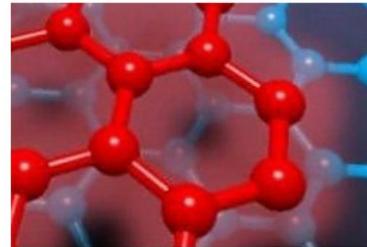
NESSUNA SVOLTA IN VISTA?

http://www.repubblica.it/scienze/2016/05/12/news/igrogeno_grafene_energia-139649208/

R.it | Scienze

Home | Politica | Economia | Sport | Spettacoli | Tecnologia | Motori | Tutte le sezioni

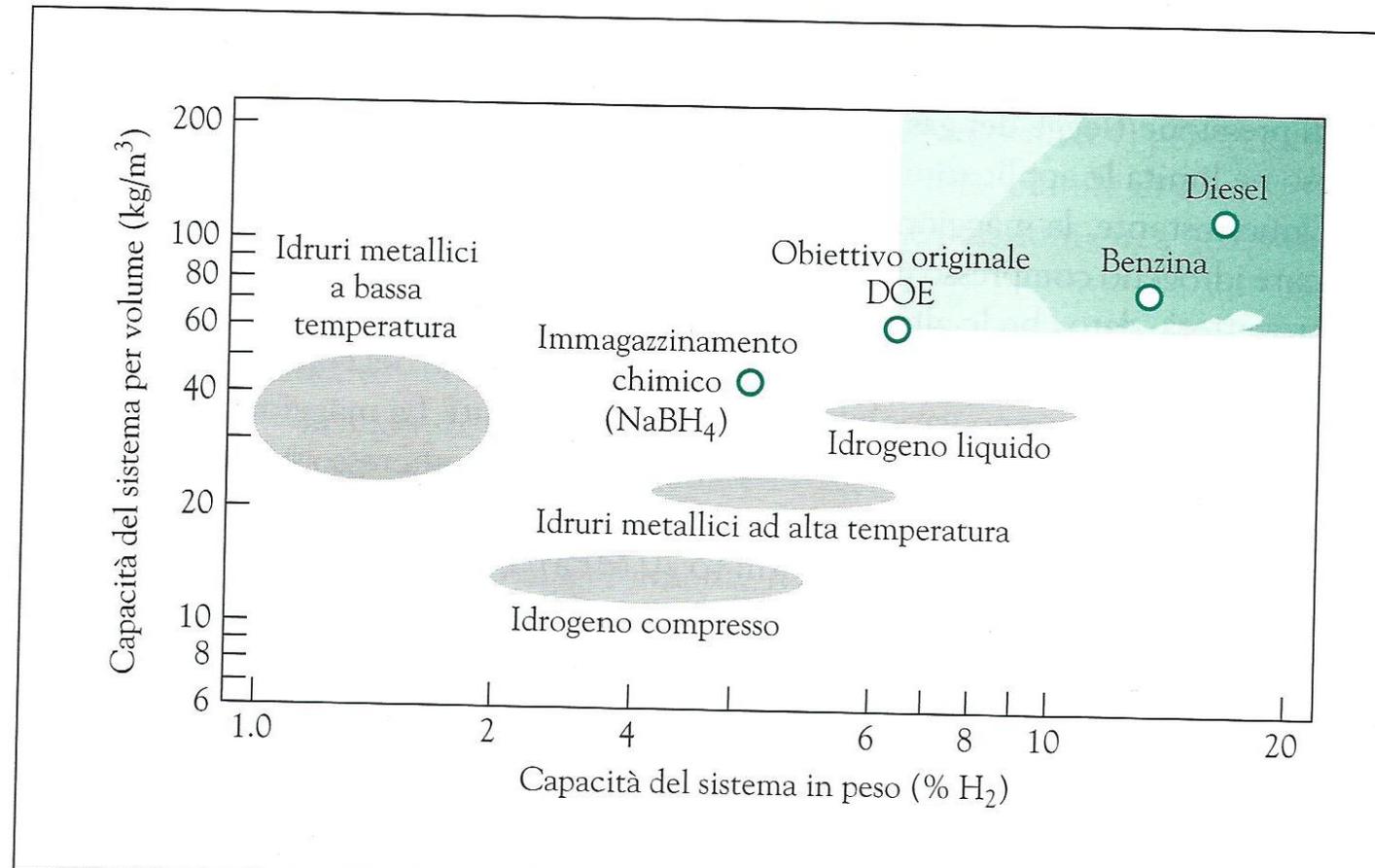
La magia del grafene: produce e immagazzina idrogeno



Dall'Università della Calabria una speranza per produrre energia pulita: il materiale scoperto nel 2004 sarebbe in grado di estrarre dall'acqua e trattenere il "combustibile del futuro"

Gli idruri e altri metodi di immagazzinamento chimico dell'idrogeno sono discussi in dettaglio di seguito. Nessun sistema pratico considerato finora ha raggiunto gli obiettivi fissati per il 2010 dal Dipartimento per l'Energia statunitense (Figura 7.6) in termini di combinazione di un'alta densità con la percentuale del 6% di idrogeno rispetto alla massa totale. Anche l'obiettivo per il 2015 del 9% di idrogeno rispetto al peso, con una densità volumetrica superiore a 80 g/L, potrebbe rivelarsi eccessivamente ottimistico.

FIGURA 7.6 Efficacia di varie tecniche per l'immagazzinamento dell'idrogeno. Si noti che sia la scala orizzontale che quella verticale sono logaritmiche. [Fonte: R. F. Service, "The Hydrogen Backlash", *Science* 305 (2004): 958-961.]



7.26 L'immagazzinamento dell'idrogeno: leghe metalliche e grafite

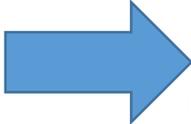
Un modo pratico e sicuro per immagazzinare idrogeno per l'uso come carburante per piccoli veicoli potrebbe essere sotto forma di idruro metallico. Molti metalli, fra cui diverse leghe, possono assorbire chimicamente grandi quantità di idrogeno gassoso in modo reversibile, nello stesso modo in cui una spugna assorbe acqua. La forma molecolare dell'idrogeno diventa dissociata nei singoli atomi sulla superficie del metallo man mano che esso viene assorbito, con la successiva formazione di idruri metallici in cui i piccoli atomi di idrogeno trovano posto in "buchi" nella struttura cristallina del metallo. **In questo modo all'interno del reticolo cristallino l'idrogeno è presente sotto forma di atomi, non molecole**, e il reticolo stesso si espande leggermente nell'incorporare gli atomi. Per esempio, il metallo titanio assorbe idrogeno per formare l'idruro di formula TiH_2 , un composto in cui la densità dell'idrogeno è doppia rispetto a quella dell' H_2 liquido. Il riscaldamento del solido permette il rilascio graduale dell'idrogeno sotto forma di gas molecolare, che può quindi essere bruciato in aria o in ossigeno per alimentare il veicolo.

Le ricerche proseguono nel tentativo di trovare una lega metallica leggera che possa immagazzinare idrogeno in modo efficiente senza rendere il veicolo eccessivamente pesante. Tuttavia, già oggi i sistemi esistenti basati sull'uso di idruri metallici sono più leggeri dei serbatoi pressurizzati necessari per immagazzinare l'idrogeno liquido. La maggior parte della ricerca industriale attuale si concentra quindi su questi sistemi metallici. Considerazioni pratiche suggeriscono che una lega capace di immagazzinare efficientemente l'idrogeno

- debba essere capace di assorbirlo in modo rapido e reversibile,
- non diventi fragile dopo molti cicli ripetuti di assorbimento-desorbimento,
- operi entro intervalli di pressione e temperatura rispettivamente di 1-10 atm e 0-100 °C,
- non sia così densa da rallentare eccessivamente il veicolo,
- non debba occupare un grande volume.

Le leghe lantanio-nichel derivate dal LaNi_5 presentano tutte queste caratteristiche tranne una: sono troppo pesanti (% di massa di idrogeno < 2), un problema mostrato da tutti gli idruri metallici conosciuti capaci di operare a temperature prossime a quel-

la ambiente. Si conoscono molti idruri e leghe più leggeri, come l' MgH_2 e l' Mg_2NiH_4 , ma essi non operano reversibilmente in condizioni non estreme. La ricerca su sistemi in cui entrano metalli più leggeri sta proseguendo, ma per ora non ha avuto successo nel produrre leghe che soddisfino tutte le condizioni elencate sopra.



Una delle difficoltà pratiche dell'uso dell'idrogeno come carburante è la sua tendenza a reagire nel corso del tempo con il metallo delle tubature o dei serbatoi in cui sia presente. Questa reazione rende il metallo più fragile e lo deteriora, fino a polverizzarlo. Recentemente sono stati fatti progressi per superare questa difficoltà utilizzando materie prime costituite da materiali compositi anziché metalli semplici analoghe a quelle usate per le infrastrutture di trasporto e immagazzinamento.

7.27 Immagazzinare l'idrogeno come composto

Per alcune applicazioni, potrebbe essere possibile il trasporto e l'immagazzinamento dell'idrogeno sotto forma di un *liquido energeticamente denso* come il metanolo, per poi rigenerarlo al momento della sua utilizzazione per la produzione di energia. Come vettore dell'idrogeno su lunghe distanze è stato proposto anche il *toluene*, C_7H_8 ; infatti tale composto potrebbe essere deidrogenato quando servisse dell' H_2 . Lo stesso vale per l'*acido formico*, $HCOOH$.

I composti del boro sono interessanti trasportatori di idrogeno perché questo elemento è molto leggero. Un sistema del genere è un sale alcalino (di litio o sodio) dello **ione boridruro**, BH_4^- . Per il suo prototipo di minivan alimentato con celle combustibili, la Chrysler ha utilizzato una soluzione al 20% di boridruro di sodio in acqua per "immagazzinare" l'idrogeno. Quest'ultimo viene rilasciato quando la soluzione viene pompata su di un catalizzatore di rutenio, attivando la reazione redox dell' H^- nel boridruro con l' H^+ nell'acqua per produrre H_2 :

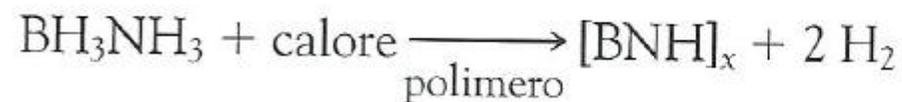


La densità dell'idrogeno nella soluzione di boridruro è paragonabile a quella dell'idrogeno liquido. Anche l'analogo *ione alanato*, AlH_4^- , nella forma del suo sale di sodio.

drogeno liquido. Anche l'analogo *ione alanato*, AlH_4^- , nella forma del suo sale di sodio, è un candidato per l'immagazzinamento di idrogeno in celle a combustibile per veicoli:



Recentemente sono stati proposti come trasportatori di idrogeno anche diversi composti molecolari del boro, come il **borano di ammonio**, BH_3NH_3 , un sistema organoboro-fosforo. Il borano di ammonio rilascia molecole di idrogeno in modo sequenziale in tre fasi, la prima delle quali si verifica a temperatura non elevata ($<100^\circ\text{C}$), formando un polimero con formula minima approssimativa BNH:



Tuttavia nessuno dei sistemi chimici descritti fin qui potrebbe avere a bordo del veicolo una fonte rigenerativa di idrogeno; i prodotti delle reazioni viste in precedenza dovrebbero essere riportati in un impianto centralizzato per essere riciclati. Per esempio l' H_2BO_3^- prodotto nel sistema di boridruro dovrebbe essere in seguito fatto reagire con *idruro di magnesio*, MgH_2 , esso stesso prodotto per reazione del magnesio metallico con idrogeno gassoso. Il borano di ammonio può essere riottenuto a partire dal suo polimero BNH per reazione con *idrazina*, N_2H_4 , ottenuta dall'ammoniaca, la sua volta formata attraverso il processo Haber a partire da idrogeno e azoto gassosi.

➔ L'estrazione dell'ultimo atomo di idrogeno dal polimero BNH produrrebbe un polimero BN che non potrebbe essere riutilizzato.

7.28 La combustione dell'idrogeno

L'idrogeno gassoso può essere combinato con l'ossigeno per produrre calore tramite combustione a fiamma convenzionale o a bassa temperatura in forni catalitici. L'efficienza della combustione, cioè la frazione di energia convertita in energia utilizzabile piuttosto che in calore di scarto, è approssimativamente del 25%, cioè più o meno la stessa della benzina. I principali vantaggi dell'uso dell'idrogeno come combustibile sono la sua piccola massa per unità di energia prodotta e la quantità inferiore (anche se non nulla) di gas inquinanti da esso prodotti rispetto ad altri carburanti.

Sebbene a volte si sostenga che la combustione dell'idrogeno produca soltanto vapore acqueo e nessun inquinante, ciò in effetti non è vero. Naturalmente insieme all'idrogeno non vengono emesse sostanze inquinanti contenenti carbonio, e quindi nemmeno biossido di carbonio. Tuttavia, dato che il processo di combustione coinvolge una fiamma, una parte dell'azoto presente nell'aria usata come fonte di ossigeno reagisce per formare ossidi di azoto, NO_x . Inoltre viene rilasciato anche del perossido di idrogeno, H_2O_2 . Pertanto, i veicoli che bruciano idrogeno non sono propriamente sistemi a emissioni nulle. È vero che la minore temperatura di fiamma della combustione di $\text{H}_2 + \text{O}_2$, rispetto a quella della combustione di combustibili fossili e ossigeno, produce intrinsecamente meno NO_x , una diminuzione che può arrivare fino a due terzi. Il rilascio di ossidi di azoto può essere eliminato utilizzando ossigeno puro anziché aria per bruciare l'idrogeno; in alternativa, esso può essere ridotto anche facendo passare i gas di scarico sopra a un convertitore catalitico oppure diminuendo il più possibile la temperatura di fiamma, cosa che può essere ottenuta riducendo il rapporto fra H_2 e O_2 alla metà della quantità stechiometrica.

➔ Nel 2007 la BMW ha introdotto sul mercato in produzione limitata l'*Hydrogen 7*, veicolo alimentato dalla combustione di idrogeno.

LE EMISSIONI...

L'idrogeno è a volte considerato un combustibile pericoloso a causa della sua alta infiammabilità ed esplosività; esso infatti prende fuoco più facilmente della maggior parte dei combustibili convenzionali. Il lato positivo, tuttavia, è che le perdite di idrogeno liquido evaporano rapidamente raggiungendo alte quote nell'atmosfera.

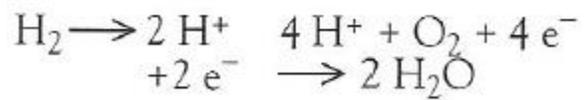
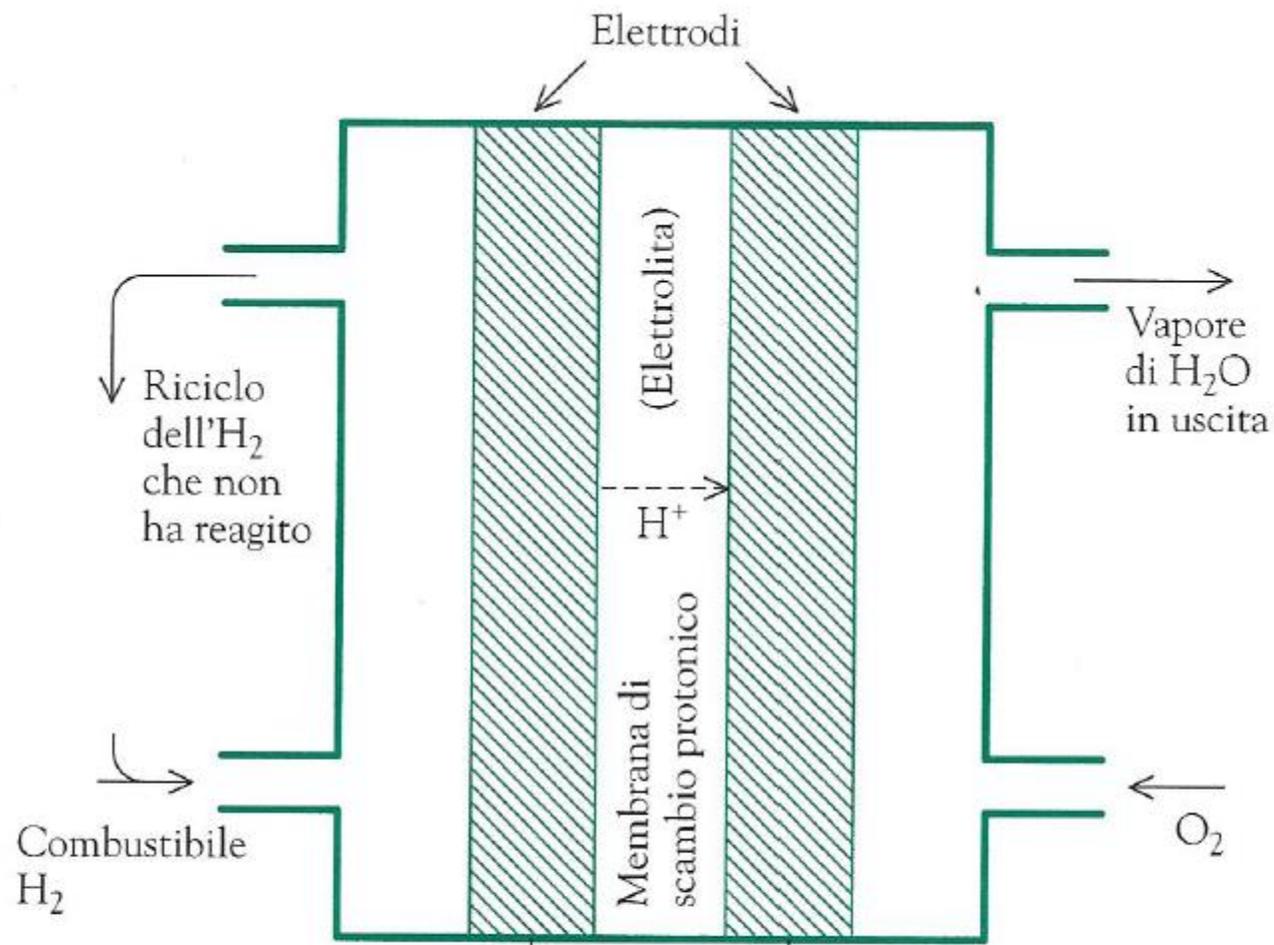
7.29 Generazione di elettricità attraverso l'alimentazione con idrogeno di celle a combustibile

Idrogeno e l'ossigeno possono essere combinati in celle a combustibile per produrre elettricità (una tecnologia dell'idrogeno utilizzata anche nei veicoli spaziali). Le celle a combustibile operano in modo simile a batterie, tranne per il fatto che i reagenti sono forniti continuamente. Nella cella a combustibile idrogeno-ossigeno, due gas vengono entrambi fatti passare sopra elettrodi separati che sono collegati:

- da una connessione elettrica esterna attraverso cui fluiscono gli elettroni, e anche
- da un elettrolita attraverso cui si spostano degli ioni.

Quindi i componenti di una cella a combustibile sono gli stessi di un sistema di elettrolisi in cui l'acqua viene scissa in idrogeno e ossigeno ma in cui la reazione chimica si verifica esattamente all'opposto. Infatti, in questo caso l'elettricità viene prodotta, anziché essere utilizzata per alimentare la reazione di elettrolisi. Rispetto alla combustione diretta, le celle a combustibile hanno il vantaggio di produrre una forma di energia di migliore impiego (elettricità invece che calore) e di non generare gas inquinanti come sottoprodotti. Infatti, in linea di principio l'unico prodotto della reazione è acqua. Sulla superficie catalitica del primo elettrodo, l' H_2 gassoso si scinde in ioni H^+ ed elettroni; questi ultimi corrono lungo il circuito esterno fino al secondo elettrodo, dove viene fatto gorgogliare O_2 gassoso (Figura 7.7). Intanto gli ioni H^+ si spostano attraverso l'elettrolita per poi ricombinarsi, in corrispondenza del secondo elettrodo, con gli elettroni e l' O_2 producendo acqua.

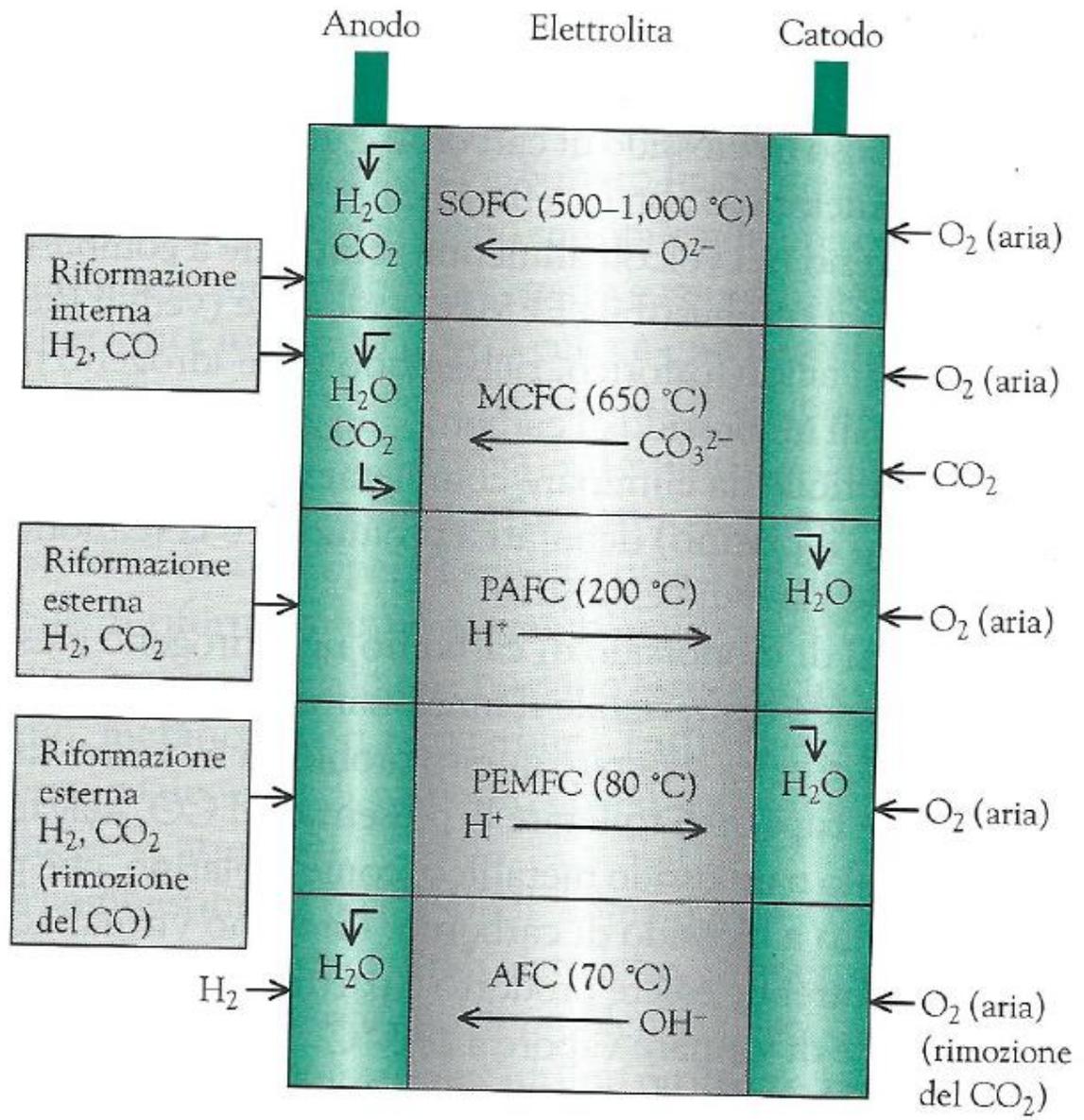




Sebbene una parte dell'energia della reazione che avviene in una cella a combustibile a idrogeno sia necessariamente rilasciata come calore – circa il 20%, in conseguenza della seconda legge della termodinamica – la maggior parte viene convertita in energia elettrica associata alla corrente che scorre fra gli elettrodi. I motori elettrici, siano essi alimentati da celle a combustibile o da batterie, hanno un'efficienza dell'80-85% di conversione dell'energia elettrica in energia meccanica. Le celle a combustibile attualmente disponibili hanno un'efficienza del 50-55% circa; in futuro esse potrebbero raggiungere un'efficienza del 70%. Per contrasto, i motori a combustione interna che utilizzano la benzina hanno un'efficienza del 15-25%, e i diesel del 30-35%.

Sebbene le automobili commerciali elettriche siano attualmente alimentate da batterie, miglioramenti futuri della loro tecnologia potrebbero portarne alla sostitu-

zione con celle a combustibile. Nel 2010 la Mercedes-Benz ha cominciato a produrre in piccola quantità automobili alimentate con celle a combustibile. Altri produttori di automobili hanno prototipi di veicolo pronti. Autobus-prototipo in servizio a Vancouver e a Chicago utilizzano come alimentazione innovative celle a combustibile. L'elettrolita utilizzato nelle celle a combustibile che alimentano questi veicoli è un polimero sintetico sottile come un capello (circa 100 nm) che agisce da *membrana di scambio protonico*. La membrana, quando è umida, conduce bene i protoni incorporando gruppi solfonato. Essa inoltre impedisce che l'idrogeno e l'ossigeno gassosi si mischino insieme. Gli elettrodi di queste **celle a combustibile a membrana polimerica elettrolitica** (PEMFC, *polymeric electrolyte membrane fuel cells*; Figura 7.8) sono composti di grafite, alla cui superficie si trova dispersa una piccola quantità di platino sotto forma di sottili strati di nanoparticelle (dello spessore di circa $50 \mu\text{m}$). Ogni cella, che opera a circa 80°C , genera circa 0,8 V di elettricità, cosicché se ne devono assemblare insieme molte per fornire energia sufficiente per il veicolo. Nell'attuale versione che alimenta gli autobus, l'idrogeno compresso viene immagazzinato in serbatoi situati al di sotto del tetto del veicolo.



VEDI Più AVANTI
PER GLI ELETTROLITI

FIGURA 7.8 Caratteristiche operative di varie celle a combustibile. [Fonte: B. C. H. Steele e A. Heinzel, "Materials for Fuel Cell Technologies", *Nature* 414 (2001): 345.]

I fattori che incentivano lo sviluppo dei veicoli che utilizzano celle a combustibile alimentate a idrogeno comprendono:

- la riduzione dello smog urbano, che è parzialmente causato dalle emissioni dei motori a benzina e diesel,
- la riduzione del consumo di energia, dato che le celle a combustibile sono molto più efficienti dei motori a combustione nella produzione di energia motrice, e
- la riduzione delle emissioni di biossido di carbonio, dato che le celle a combustibile alimentate da idrogeno non ne emettono.

Alcuni analisti hanno sottolineato che il costo del miglioramento della qualità dell'aria e delle emissioni di CO_2 ottenuto operando una transizione del sistema di

trasporto verso veicoli del genere nel corso dei prossimi decenni sarebbe molto maggiore delle strategie alternative, fra cui la rottamazione delle automobili più vecchie, il miglioramento dell'efficienza energetica dei veicoli, la riduzione delle emissioni di NO_x delle centrali elettriche e la cattura e il sequestro delle emissioni di CO_2 dalle centrali elettriche. Inoltre le perdite di idrogeno nell'aria agiscono indirettamente da gas serra, dato che reagiscono con l' OH , diminuendone la concentrazione atmosferica, e ciò porterebbe a un lieve aumento della vita atmosferica del metano e quindi della sua concentrazione, dato che il pozzo principale del CH_4 è rappresentato dalla sua reazione con l' OH , come discusso nel Capitolo 3.

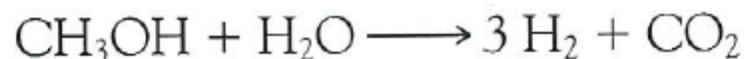


7.30 Produzione di idrogeno per le celle a combustibile a partire da combustibili liquidi

A causa delle difficoltà pratiche del trasporto dell'idrogeno all'interno dei veicoli, la ricerca è attivamente impegnata nel tentativo di progettare sistemi che ne permettano l'estrazione, quando serve, da combustibili liquidi, che sono molto più facili da trasportare. Per esempio, nel prossimo futuro, l'idrogeno potrebbe essere ottenuto all'occorrenza a partire dal metanolo liquido attraverso la decomposizione di questo realizzata direttamente a bordo del veicolo per generare idrogeno gassoso, utilizzando la reazione inversa di quella di formazione del metanolo discussa in precedenza:



Nella versione di questo processo progettata dalla General Motors, l'unità "riformatrice" opera a 275 °C e utilizza un catalizzatore di ossido di rame/ossido di zinco per promuovere la reazione. Quindi attraverso la reazione di spostamento del gas d'acqua il CO nel gas di sintesi viene fatto reagire col vapore formando ulteriore H₂ gassoso, secondo la reazione globale



Processi simili sono stati sviluppati per convertire benzina, gasolio per motori diesel, ottano o etanolo acquoso in biossido di carbonio e idrogeno. L'idrogeno può essere ottenuto da benzina o metanolo con un'efficienza di circa il 75%, e questa potrebbe essere la fonte di idrogeno nei veicoli alimentati con celle a combustibile. Sfortunatamente, le attuali celle a combustibile PEMFC e alcaline (vedi il Problema 7.15), così come quella a base di acido fosforico, richiedono tutte idrogeno relativamente puro, privo in particolare di monossido di carbonio, un gas che si produce nel processo di riformazione ed è difficile da eliminare completamente. Il CO si lega ai siti del catalizzatore (per esempio il platino) deputati a promuovere la reazione della cella a combustibile bloccandone l'attività catalitica.

Anche concentrazioni di monossido di carbonio nell'idrogeno gassoso superiori a 20 ppm rallentano in modo apprezzabile il funzionamento della maggior parte delle celle a combustibile. Forse per superare questo problema in futuro sarà sviluppato un elettrodo catalizzatore capace di tollerare la presenza del CO, magari uno che incorpori un secondo metallo o un ossido metallico, come il platino, che permetta l'ossidazione del CO adsorbito a biossido di carbonio. Idrogeno virtualmente libero da monossido di carbonio potrebbe essere prodotto a partire da metanolo attraverso un processo ossidativo capace di formare vapore a 230 °C:



Tuttavia dato che in questa reazione l'ossigeno è coinvolto come reagente, non tutto il valore energetico del metanolo è catturato nell'idrogeno così prodotto.

7.31 Celle a combustibile per le centrali elettriche

Le celle a combustibile del prossimo futuro potrebbero anche essere utilizzate in piccole centrali elettriche, in parte perché le loro emissioni inquinanti sono così ridotte rispetto a quelle derivanti dalla combustione dei combustibili fossili (per esempio immettono solo circa l'1% dei NO_x). In effetti, celle a combustibile a base di **acido fosforico** (i PAFC nella Figura 7.8) sono in attività fin dall'inizio degli anni '90 in alcuni ospedali e hotel per generare energia. Le celle a combustibile più promettenti per essere utilizzate in centrali elettriche sfruttano come elettrolita un sale **carbonato fuso**, per esempio carbonati di potassio e di litio, più additivi, a $650\text{ }^\circ\text{C}$ (la *cella a combustibile a carbonato fuso* è etichettata come MCFC nella Figura 7.8). L'idrogeno gassoso reagisce con gli **ioni carbonato**, CO_3^{2-} , per produrre biossido di carbonio, acqua ed elettroni in corrispondenza dell'anodo, laddove al catodo il biossido di carbonio reagisce con gli elettroni e l'ossigeno dell'aria per riformare ioni carbonato. Il biossido di carbonio deve essere riciclato dall'anodo verso il catodo durante l'operazione della cella. L'idrogeno viene prodotto nel sito per reazione del metano col vapore, cosicché in questo caso la vera fonte dell'energia combustibile è il CH_4 . Il calore di scarto può essere recuperato e utilizzato in un sistema di cogenerazione, e la corrente continua prodotta dalla cella a combustibile è convertita nella corrente alternata che viene distribuita. L'efficienza delle MCFC è prossima al 50%.

Come la cella a combustibile a carbonato fuso, quella basata sugli **ossidi solidi** (SOFC nella Figura 7.8) è molto meno sensibile alla presenza di impurità di monossido di carbonio nel combustibile idrogeno gassoso rispetto alle altre celle a combustibile. L'elettrolita in questo tipo di cella è una miscela ceramica di ossidi di zirconio e ittrio. L'anione ossido, O^{2-} , prodotto dall'ossigeno gassoso, trasporta la carica fra gli elettrodi, spostandosi attraverso il solido dal catodo all'anodo man mano che il combustibile viene consumato formando acqua in corrispondenza dell'anodo. L'alta temperatura a cui opera la cella a ossidi solidi (fino a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) permette al combustibile di riformarsi internamente e di produrre ioni idrogeno senza l'uso di catalizzatori costosi, di modo che possano essere usati come combustibile, al posto di idrogeno, metano e altri idrocarburi. Tuttavia in corrispondenza dell'anodo tendono a formarsi depositi di carbonio che alle alte temperature raggiunte possono anche rimanervi attaccati.

La cella a combustibile a ossidi solidi, come quella a carbonato fuso, è utilizzabile dal punto di vista pratico in centrali elettriche, essendo la sua efficienza energetica alta. Entrambi i tipi di cella soffrono di problemi pratici con gli elettrodi e della formazione di depositi di carbonio. Quest'ultimo problema per le celle a combustibile a ossidi solidi può essere superato abbassandone la temperatura a cui operano.

7.32 Altri usi delle celle a combustibile

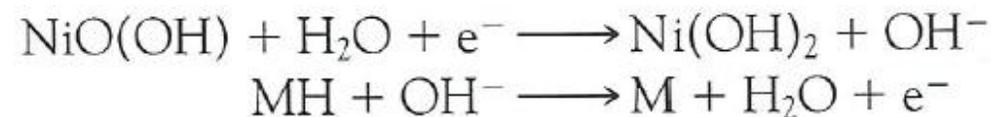
I primi prototipi di prodotti commerciali elettronici alimentati da celle a combustibile hanno cominciato a essere disponibili in commercio nel 2011. **Molti osservatori credono che i computer portatili finiranno per essere alimentati con celle a combustibile al posto delle batterie ricaricabili.** Queste celle a combustibile utilizzeranno direttamente come combustibile etanolo piuttosto che idrogeno e conterranno cartucce rimovibili contenenti l'alcool. Il vantaggio per l'utilizzatore dell'uso di queste celle a combustibile rispetto alle normali batterie è una durata di utilizzo molto maggiore prima che esse finiscano la carica. Inoltre l'uso diretto di metanolo o gas naturale al posto dell' H_2 come combustibile nelle celle evita il problema della generazione e dell'immagazzinamento dell'idrogeno.

Uno svantaggio del metanolo è la generazione come prodotto di scarto di monossido di carbonio, che avvelena il catalizzatore nel modo discusso in precedenza. La diluizione del metanolo con acqua riduce questo problema, ma anche la resa energetica della cella. Inoltre, né il metanolo né alcun altro combustibile liquido che possa in teoria essere utilizzato al posto dell' H_2 come combustibile nella cella reagisce abbastanza rapidamente da produrre la corrente elettrica necessaria a un veicolo, sebbene ricerche sull'uso di soluzioni diluite di metanolo indichino che questi problemi alla fine potrebbero essere superati.

7.33 Le automobili elettriche alimentate a batterie

Un'alternativa ai veicoli che utilizzano celle a combustibile sono quelli alimentati, almeno in parte, a batteria. Nei decenni scorsi, i prototipi di "automobili elettriche" utilizzavano batterie a piombo-acido che i veicoli a benzina hanno tradizionalmente utilizzato soltanto per alimentare il motorino di avviamento e che erano altrimenti usate per i golf-cart, i muletti, ecc. Tuttavia la densità di energia delle batterie a piombo-acido è troppo bassa per renderle praticamente utilizzabili per i veicoli attuali. La fonte di energia elettrica utilizzata nella maggior parte dei veicoli "ibridi" attualmente in commercio è di solito la batteria a nichel-idruro metallico o la batteria a ioni di litio.

Nella **batteria a nichel-idruro metallico**, l'energia viene prodotta quando uno **ione idrossido**, OH^- , prodotto nella semireazione di riduzione con l'acqua all'elettrodo di *ossidrossido di nichel*, $\text{NiO}(\text{OH})$ con formazione di *idrossido di nichel*, $\text{Ni}(\text{OH})_2$, migra attraverso la soluzione acquosa alcalina dell'elettrolita verso l'elettrodo composto da una lega intermedia, M , in cui sono presenti *idruri metallici*, MH . L'idrogeno dell'idruro metallico reagisce con lo ione idrossido formando acqua e rilasciando un elettrone:



La **batteria a ioni di litio** ha un elettrodo composto di biossido di cobalto e litio, LiCoO_2 , verso il quale, quando viene attivata l'alimentazione, migrano ioni Li^+ provenienti da un elettrodo di grafite, attraverso un solvente elettrolitico non acquoso contenente ioni litio complessati.

La **batteria a ioni di litio** ha un elettrodo composto di biossido di cobalto e litio, LiCoO_2 , verso il quale, quando viene attivata l'alimentazione, migrano ioni Li^+ provenienti da un elettrodo di grafite, attraverso un solvente elettrolitico non acquoso contenente ioni litio complessati.

L'inizio del nuovo millennio ha visto l'introduzione sul mercato di veicoli ibridi a combustione/elettrici, come la Toyota Prius. Quest'ultima utilizza batterie a nichel-

struttura metallica più compatte e leggere rispetto a quelle al piombo di potenza equivalente. Questi veicoli superano il problema dei lunghi e frequenti periodi di ricarica necessari ai sistemi interamente alimentati a batteria, dato che la batteria viene ricaricata continuamente mentre il (piccolo) motore a benzina è attivo e sviluppa energia in eccesso. Anche in corrispondenza delle frenate l'energia cinetica in eccesso viene utilizzata per la ricarica della batteria. La potenza motrice utilizzata dal veicolo è fornita sia dalla benzina che dal motore elettrico, in proporzione variabile a seconda della situazione di guida. I veicoli ibridi sono altamente efficienti in termini di consumo di carburante ed emettono pertanto quantità molto minori di biossido di carbonio, ossidi di azoto, monossido di carbonio e COV.

La Chevrolet Volt...

La Chevrolet Volt, un *ibrido plug-in* introdotto alla fine del 2010, utilizza l'energia di una batteria a ioni di litio per i primi 80 km o meno di guida, dopo i quali inizia a utilizzare un motore a benzina. La batteria può essere ricaricata nel corso della notte a casa del proprietario, un processo che richiede circa 12 ore da una regolare presa a 220 V ma solo 4 ore se è disponibile una presa a 240 V. Come nella Prius, anche qui un sistema di frenata rigenerativa contribuisce a ricaricare la batteria durante la guida.

Le difficoltà pratiche che scoraggiano l'adozione su larga scala di veicoli elettrici sono il loro alto costo, la ridotta autonomia di guida fornita da una ricarica della batteria, la lunghezza del tempo di ricarica della medesima, nonché il suo peso. Come i sistemi dotati di celle a combustibile, essi presentano l'interessante caratteristica di emissioni pari a zero e di un basso rumore di funzionamento. Naturalmente però esiste comunque un certo inquinamento atmosferico prodotto dai siti dove viene generata l'energia elettrica destinata ad alimentare queste automobili.

In futuro, le automobili elettriche probabilmente utilizzeranno batterie al litio migliorate e dotate di una densità energetica molto maggiore e più vicina a quella della benzina rispetto all'attuale sistema agli ioni di litio. Le batterie al *litio-zolfo* e specialmente quelle al *litio-aria* attualmente in corso di sviluppo promettono densità energetiche nettamente superiori.

➔ La batteria a ioni di litio nella Volt pesa 180 kg.

➔ Le Domande di ripasso 20-28 si basano sul materiale trattato nella sezione qui conclusa.

Subscribe to the FT



FINANCIAL TIMES

HOME WORLD US COMPANIES MARKETS OPINION WORK & CAREERS LIFE & ARTS

Special Report **The Future of the Car: Asia**

Hydrogen vehicles [+ Add to myFT](#)

Japan is betting future cars will use hydrogen fuel cells

Honda and Toyota think the technology's superior energy density will triumph over batteries



Le auto fuel cell sono un'idiozia, parola di Elon Musk di Tesla

2013



2018 <http://www.autoexpress.co.uk/car-news/electric-cars/93180/hydrogen-fuel-cell-do-hydrogen-cars-have-a-future>

