



Stazione di produzione e caricamento idrogeno per motori a idrogeno (fuel cells) (elettrolizzatore Erreuegas, Italia; pannelli Solterra, Svizzera)

Alfonso Pozio, Alessia Cemmi
ENEA - Unità Tecnica Fonti Rinnovabili
Santa Maria di Galeria (Roma)
alfonso.pozio@enea.it

LA PRODUZIONE DELL'IDROGENO MEDIANTE ELETTROLISI

L'energia solare ed eolica potrebbero essere utilizzate per produrre energia elettrica in grado di generare idrogeno per mezzo di elettrolizzatori. In questo modo la produzione di idrogeno potrebbe essere un mezzo per utilizzare sorgenti rinnovabili nazionali e contribuire direttamente alla riduzione dei gas serra ed alla dipendenza dall'importazione dei combustibili fossili. Nell'articolo, si analizza lo stato dell'arte del processo di produzione dell'idrogeno mediante l'elettrolisi ed i suoi costi effettivi. Si effettua inoltre un'analisi della possibilità di accoppiamento del processo con fonti rinnovabili (eolico, fotovoltaico) per il rifornimento di combustibile a bordo di veicoli. Infine, si traccia un quadro generale dell'industria nazionale in questo settore.

Come è noto, il fenomeno dell'elettrolisi consiste nella trasformazione di energia elettrica in energia chimica. Il processo dell'elettrolisi fu applicato per la prima volta da Sir William Grove, nell'anno 1839. Attualmente tale processo produttivo copre un mercato di nicchia (circa il 4% della produzione mondiale) per soddisfare fabbisogni di H_2 ad elevata purezza. Il costo di produzione è elevato, ma questo è l'unico processo che permette la produzione di idrogeno a partire dall'acqua utilizzando energia elettrica. Interessante ne appare in prospettiva l'utilizzo nelle ore notturne e per produzione distribuita (si risparmiano i costi di stoccaggio e di trasporto) sfruttando i minori costi dell'elettricità. La validità economica di tale

processo è tuttavia condizionata dalla possibilità di ottenere energia elettrica a basso costo, poiché l'80% circa del costo dell'idrogeno è imputabile al costo dell'elettricità.

L'elettrolisi, ad oggi, comporta costi di produzione nettamente superiori rispetto ai costi di esercizio, ad esempio di uno steam reformer. Il fatto di produrre idrogeno dall'acqua tuttavia non comporta l'emissione di ossidi di carbonio nel luogo di produzione. D'altra parte, nella maggior parte dei Paesi del mondo gli impianti per la generazione di energia elettrica utilizzano metano, petrolio o carbone come combustibili di base, e quindi verrebbe meno il vantaggio ambientale, poiché si avrebbe un significativo incremento delle emissioni di gas serra

dovuto all'aumentata richiesta di energia elettrica. Solo in nazioni con un mix produttivo fortemente spostato verso il nucleare o l'idroelettrico (Francia, Brasile, Canada, Norvegia e Svezia) si avrebbe una riduzione netta delle emissioni di gas serra.

Considerazioni generali

In dettaglio, l'elettrolisi dell'acqua avviene quando una corrente continua è fatta passare tra due elettrodi immersi in un'opportuna soluzione acquosa (soluzioni concentrate di idrossido di potassio o di acido solforico) e separati tra loro da particolari materiali (diaframmi o separatori), dando luogo alla decomposizione elettrolitica dell'acqua secondo la reazione globale:



Si producono così separatamente idrogeno (al catodo) ed ossigeno (all'anodo) di elevata purezza, successivamente sottoposti a vari processi (raffreddamento, deumidificazione, etc.) che li rendono disponibili per un immediato utilizzo.

Sulla base di considerazioni di carattere termodinamico e cinetico, è possibile evidenziare l'effetto di alcuni parametri operativi che contribuiscono ad incrementare l'efficienza del processo elettrolitico [1-5].

L'aumento della temperatura produce un effetto positivo sul funzionamento del sistema sia per la diminuzione di corrente da applicare alla cella elettrolitica, sia per una sensibile diminuzione delle sovratensioni elettrodiche e delle cadute ohmiche. Allo stesso tempo, valori elevati di temperatura causano seri problemi legati alla corrosione dei materiali ed all'evaporazione della soluzione, richiedendo quindi celle pressurizzate.

Un altro parametro importante è la densità di corrente che dipende essenzialmente dalla natura dei materiali elettrodici e che determina la

dimensione degli elettrodi, fattore che rappresenta il contributo principale in relazione al costo dell'elettrolizzatore stesso. Inoltre, per ridurre la tensione applicata, aumentare l'efficienza del processo e quindi la produzione di idrogeno si possono utilizzare sulla superficie degli elettrodi dei rivestimenti catalitici che consentono la ricombinazione rapida dell'idrogeno sulla superficie dell'elettrodo, aumentando la velocità di reazione.

Un'ultima considerazione riguarda la pressione di reazione. Anche se il suo incremento non porta grandi variazioni alla tensione da applicare all'elettrolizzatore, operando in pressione si riduce o si elimina la necessità di uno stadio di compressione meccanica a valle dell'elettrolizzatore stesso. Questo comporta una semplificazione dell'impianto ed un aumento della sua efficienza. Allo stesso tempo, però, pressioni elevate rendono difficoltose la separazione ed il contenimento dei gas, oltre a generare problemi di corrosione ed infragilimento dei materiali causati dalla permeazione dell'idrogeno.

Elettrolizzatori: stato dell'arte e sviluppi futuri

Generalmente, gli impianti di elettrolisi presentano numerosi vantaggi: operano con poche parti in movimento, sono poco ingombranti, non sono inquinanti, la loro manutenzione è piuttosto ridotta ed infine i prodotti di reazione, idrogeno ed ossigeno, vengono separati fisicamente durante il loro sviluppo agli elettrodi. Tuttavia, nonostante le buone prestazioni finora raggiunte, gli elettrolizzatori sono oggetto di ricerca e sviluppo al fine di ottenere un'ulteriore diminuzione degli ingombri e dei costi, un aumento dell'efficienza, della produttività e della purezza dei gas, un incremento della durata in esercizio (maggiore resistenza alla corrosione e alla disattivazione), la possibilità di poter lavorare in condizioni di alimentazione intermittente ("off-peak" nucleare, idroelettrico e fotovoltaico) [6, 7].

Gli elettrolizzatori attualmente disponibili sul mercato, le cui caratteristiche sono riportate nella Tab. 1, possono essere suddivisi nelle seguenti categorie [5, 8-15]:

- *elettrolizzatori alcalini tradizionali (EAT)*: sono caratterizzati da concentrazione della soluzione elettrolitica alcalina (solitamente KOH) che va dal 20 al 30% in peso, pressioni tipicamente comprese tra 1 e 30 bar, efficienze fino all'80% e temperature operative tra 70 e 100 °C, in modo da assicurare un buon compromesso tra conducibilità dell'elettrolita ed effetti di corrosione [8];
- *elettrolizzatori alcalini avanzati ad alte densità di corrente (EAHCD)*: viene sfruttato il sensibile aumento

Tab. 1 - Caratteristiche degli elettrolizzatori commerciali

Tecnologia	Elettrolizzatori alcalini		Elettrolizzatori a polimero solido (SPE)	Elettrolizzatori ad alta temperatura (HTE)
	Elettrolizzatori alcalini convenzionali (EAT)	Elettrolizzatori alcalini avanzati (EAHCD)		
Stadio di sviluppo	Unità di grande scala commerciali	Unità da laboratorio e prototipi	Unità da laboratorio e prototipi	Unità molto piccole da laboratorio
Tensione di cella [V]	1.84 – 2.25	1.50 – 3.00	1.00 – 2.00	0.95 – 1.30
Densità di corrente [A/cm ²]	0.13 – 0.25	0.20 – 2.00	0.25 – 2.00	0.30 – 1.00
Temperatura [°C]	70 - 90	90 - 145	80 - 150	920 - 1000
Pressione	1 – 30 atm	Fino a 40 atm	Fino a 40 atm	Fino a 30 atm
Catodo	Acciaio, acciaio inossidabile o nichel	Nichel, nichel attivato cataliticamente	Foglio di fibra di carbonio porosa con uno strato di Pt catalizzatore	Nichel
Anodo	Nichel	Nichel, nichel attivato cataliticamente	Titanio poroso con uno strato di catalizzatore	Ni-NiO o Perovskite (LaNiO ₃ , LaMnO ₃ , etc.)
Separatore: materiale e resistenza per unità di superficie [Ω/cm ²]	Amianto 1.2 – 1.7	A base di amianto (sotto i 100°C), teflon legato, KTi e polibenzimidazolo 0.5 – 0.7	-	-
Elettrolita	25 – 35% KOH	25 – 40% KOH	Membrana di Nafion	Solido: Y ₂ O ₃ – ZrO ₂
Efficienza di cella	77 – 80%	80 – 90%	85 – 90%	90 – 100%
Consumo di energia [kWh/Nm ³ _(st)]	4.3 – 4.9	3.8 – 4.3	-	3.5

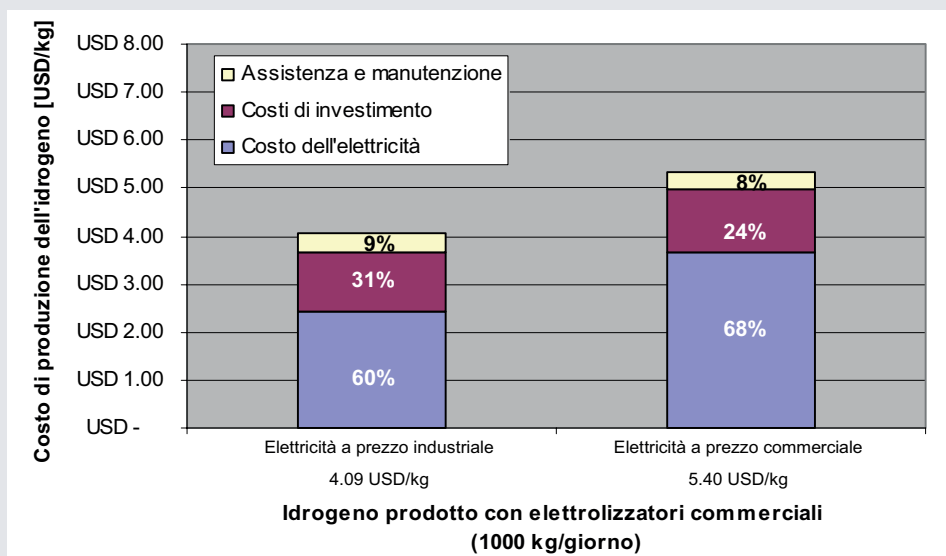


Fig. 1 - Costo di produzione dell'idrogeno ottenuto da elettrolizzatori con produzione di 1.000 kg/giorno (466 Nm³/h) alimentati con energia elettrica fornita a prezzo industriale e commerciale

di conducibilità elettrica dell'elettrolita (pari a circa il 2-3% per ogni °C) con la temperatura [9]. In confronto agli elettrolizzatori alcalini tradizionali, la densità di corrente è stata incrementata compatibilmente con la diminuzione della tensione di cella, aumentando così il rendimento del sistema. In questo modo, inoltre, si diminuiscono i costi di investimento e si ottiene un significativo risparmio di energia elettrica a parità di idrogeno prodotto;

- *elettrolizzatori a polimeri solidi (SPE) o a membrana*: rispetto agli elettrolizzatori alcalini presentano numerosi vantaggi: maggiore sicurezza ed affidabilità per l'assenza di elettroliti liquidi corrosivi, una notevole compattezza, semplicità progettuale, operativa e di manutenzione, possibilità di lavorare ad elevate densità di corrente. Un problema è rappresentato dai materiali impiegati (platino, membrane a scambio ionico) che contribuiscono sensibilmente al costo finale del sistema, mentre un notevole vantaggio è rappresentato dalla consolidata esperienza nel campo delle celle a combustibile polimeriche, sistemi molto simili agli SPE sia in termini di materiali che di tecnologia;
- *elettrolizzatori ad alta temperatura (HTE)*: i vantaggi dell'elettrolisi ad alta temperatura includono la maggiore efficienza ottenibile e l'utilizzo di un elettrolita solido ceramico (conduttore di ioni ossigeno) che non è corrosivo e che non provoca problemi di perdite liquide o gassose. La tecnica HTE richiede quindi sia una fonte di calore ad alta temperatura (800-1.000 °C) che l'utilizzo di materiali e tecniche di fabbricazione costosi. Anche per questa tecnologia, comunque, sono necessari grandi progressi prima di arrivare alla fattibilità commerciale, ma un incentivo risiede nel fatto che il rendimento medio è prossimo al 95%.

In definitiva, le linee di ricerca che vengono seguite per un ulteriore miglioramento delle prestazioni degli elettrolizzatori riguardano principalmente:

- 1) un aumento della temperatura e della pressione di esercizio e della densità di corrente, compatibilmente con l'impiego di materiali non

eccessivamente costosi ma resistenti alla corrosione;

- 2) una significativa riduzione della resistenza della cella, con l'uso di opportune geometrie e di materiali a più alta conducibilità;

- 3) una riduzione delle sovratensioni, mediante l'utilizzo di opportuni materiali elettrocatalizzatori. Concludendo, l'elettrolisi alcalina avanzata (EAHCD) è quella con il maggior potenziale per un'immediata commercializzazione su vasta scala, poiché non è richiesto alcuno sforzo di sviluppo radicale rispetto alla tecnologia di elettrolisi alcalina convenzionale, in quanto il processo è simile ed è potenzialmente applicabile alla produzione industriale attuale. Ricordiamo infatti che la chiave della tecnologia consiste nel far operare le celle a temperatura superiore ai 100 °C per migliorarne l'efficienza, cercando allo stesso tempo

di minimizzare i problemi dovuti ai fenomeni corrosivi.

La tecnologia HTE è molto interessante dal punto di vista del rendimento energetico, qualora si disponga di energia termica ad alta temperatura, pur richiedendo l'impiego di materiali ceramici particolari.

Infine, gli elettrolizzatori a membrana polimerica o a polimero solido (SPE), pur presentando buone prestazioni anche ad elevati valori di densità di corrente, una buona affidabilità e ad essere preferibili per la minor carica corrosiva e la maggiore modularità, presentano un costo di investimento ancora troppo elevato e la necessità di alimentazione con acqua ultrapura. Per il momento quindi si tratta di apparecchiature adatte principalmente alla produzione di idrogeno ed ossigeno puri per usi di laboratorio o militari [14, 15].

Tra i maggiori produttori di elettrolizzatori alcalini ricordiamo Norsk Hydro (Norvegia), Bamag e Krebskomo (Germania), De Nora (Italia), BBC (Inghilterra), Stuart Energy Systems (Canada), Teledyne Energy Systems (USA); di elettrolizzatori polimerici Hamilton Sundstrand, ITM Power Ltd. e Proton Energy Systems (USA), Shinko Pantec (Giappone) e Wellman-CJB (Inghilterra); di elettrolizzatori ad alta temperatura Siemens (Germania).

Produzione di idrogeno da elettrolisi: valutazione economica ed aspetti critici

Un attento studio sul costo di produzione dell'idrogeno mediante elettrolisi è stata recentemente condotta dagli analisti del National Renewable Energy Laboratory (NREL, US) [16].

L'analisi prende in considerazione cinque tra le più importanti industrie produttrici di elettrolizzatori (con riferimento ai modelli disponibili nel 2004): Stuart Imet, Teledyne HM ed EC, Proton Hogen, Norsk Hydro HPE e Atmospheric, ed infine Avalence Hydrofiller.

Inizialmente è stato analizzato l'effetto del costo dell'elettricità in relazione all'idrogeno prodotto.

I risultati evidenziano che, per produrre idrogeno a meno di 3 USD/kg

(stima DOE 2006 per il valore calcolato a parità di resa energetica rispetto ai combustibili fossili), se si impiega un elettrolizzatore commerciale con un consumo compreso tra 54 e 67 kWh/kg e con un'efficienza dell'intero sistema compresa tra il 58 ed il 72%, il costo dell'elettricità dovrebbe essere compreso fra 0,040 e 0,055 USD/kWh. Supponendo invece di utilizzare un elettrolizzatore ideale, con consumi di circa 39 kWh/kg ed un'efficienza del 100%, il costo dell'elettricità potrebbe arrivare a 0,075 USD/kWh.

È quindi evidente che, a meno di qualsiasi altro costo addizionale e pur raggiungendo valori di efficienza il più elevati possibile, il maggiore impatto sulla produzione di idrogeno mediante elettrolisi è rappresentato dal costo dell'elettricità.

Una seconda stima è stata effettuata tenendo conto del costo di produzione dell'idrogeno per elettrolisi basata sull'analisi del valore attuale netto (VAN o DCF). Viene cioè considerato il costo di produzione dell'idrogeno in rapporto a parametri sia tecnici (tempo di vita dell'impianto, ricambi, etc.) che finanziari (investimenti, tasse, utili, manodopera, etc.) in un arco di tempo piuttosto ampio (2005-2045).

In Fig. 1 è mostrato il risultato dell'analisi VAN per elettrolizzatori (con produzione di 1.000 kg/giorno) alimentati con energia elettrica fornita al prezzo commerciale ed industriale. Come si può osservare, suddividendo il costo dell'idrogeno in base al costo dell'elettricità ed ai costi di investimento, di assistenza e di manutenzione dell'impianto, la percentuale maggiore (pari a circa il 60% nel caso di fornitura di energia elettrica a prezzo industriale ed al 68% relativamente al prezzo commerciale) è da imputare senz'altro al costo dell'energia elettrica impiegata.

L'analisi mostra che, stimando ottimisticamente un risparmio del 15% sui costi di investimento ed un incremento di efficienza del sistema del 10%, si potrebbe produrre idrogeno ad un costo di circa 2 USD/kg con una corrente elettrica al prezzo di circa 0,012 USD/kWh (rispetto al valore di 0,007 USD/kWh con tecnologia 2004).

Per confronto, il prezzo in Italia dell'energia elettrica al costo industria-

le nel 2005 è stato pari a 0,124 euro/kWh equivalenti a 0,182 USD/kWh ovvero circa 15 volte superiore al valore richiesto secondo l'analisi più ottimistica e 26 volte superiore nel caso della situazione tecnologica del 2004.

Un'ultima analisi riguarda invece la possibilità di produrre idrogeno da elettrolisi per il rifornimento di autovetture utilizzando energia elettrica prodotta *on site* da impianti eolici o fotovoltaici. Le unità di elettrolisi attualmente esistenti hanno velocità di produzione comprese tra 1-1.000 kg/giorno. Considerando un pieno di 6 kg di idrogeno, un'unità con produzione di 1.000 kg/giorno potrebbe produrre idrogeno per circa 170 automobili. Secondo le specifiche DOE 2006, due unità con rendimento del 75% arriverebbero a rifornire 250 automobili al giorno. Inoltre, l'energia necessaria per un sistema da 1.000 kg/giorno risulterebbe pari a 2,3 MW/giorno (o 20 GWh annuali), a cui andrebbero sommati i contributi per la compressione, l'immagazzinamento ed il rifornimento del combustibile alla stazione di servizio (pari a circa 2,2 kWh/kg), ammontanti a circa 92 kW/giorno (800 MWh annui).

Considerando un sistema fotovoltaico da 100 W/m² con un fattore di capacità del 20%, una stazione di rifornimento di queste dimensioni necessiterebbe di un'area di 175.000 m² di celle, mentre un sistema eolico, assumendo una sorgente di vento di classe 5 ed una capacità di conversione del 32%, richiederebbe l'installazione di una turbina della capacità di 11 MW.

Ciò implica che, supponendo di poter installare un generatore eolico ogni km², il nostro sistema di produzione di idrogeno occuperebbe un'area di 2,2 km².

Entrambe queste ipotesi risultano chiaramente di difficile realizzazione in zone densamente popolate.

È chiaro tuttavia che, in un'ottica più ampia e considerando prospettive a medio e lungo termine, un'attenta valutazione economica sulla possibilità di impiegare l'idrogeno (e le tecnologie ad esso relative) in sostituzione parziale o totale dei combustibili fossili, non potrà prescindere dal costo di questi ultimi, in netta crescita negli ultimi anni.

Così, se al momento attuale l'analisi riportata indica un chiaro vantaggio economico derivante dall'impiego di combustibili tradizionali, nei prossimi anni la situazione potrebbe drasticamente mutare.

Sinergie con altri settori, prospettive e campi di applicazione

Alla luce di quanto finora riportato, l'elettrolisi dell'acqua rappresenta una tecnologia ben consolidata dal punto di vista tecnico ed in grado di fornire consistenti quantità di idrogeno ed ossigeno ad impatto ambientale praticamente nullo. Tuttavia, l'impedimento principale per una più ampia diffusione è senz'altro rappresentato dal costo attuale dell'energia elettrica. In tal senso, un'interessante prospettiva può essere individuata nel



Laboratorio Giacomini SpA: impianto dimostrativo di caldaia a idrogeno con produzione di idrogeno per via elettrolitica con sorgenti energetiche rinnovabili

campo delle energie rinnovabili: l'elettrolisi dell'acqua rappresenta infatti l'unico mezzo al momento disponibile per la produzione di combustibile (idrogeno) dalla corrente elettrica di tali fonti energetiche.

A tale riguardo, se da un lato si potrebbe così ottenere energia elettrica a costo zero (in particolare da energia eolica, idroelettrica o geotermica), dall'altro con il processo elettrolitico sarebbe possibile ovviare al problema intrinseco della discontinuità di tali fonti, utilizzando l'idrogeno come molecola di stoccaggio energetico e prevedendone un impiego successivo con le celle a combustibile per riottenere l'energia immagazzinata [14, 17-20].

In pratica, questo permetterebbe l'impiego di energia ad un costo medio inferiore, supponendo di immagazzinare la corrente elettrica prodotta in condizioni economiche più vantaggiose (orari notturni) per poi riutilizzarla in orari in cui essa è più costosa (durante il giorno).

Sono già presenti varie realizzazioni sia nei Paesi europei (Casale-Chemicals, Italia; Von Hoerner, Germania) che negli Stati Uniti (Teledyne).

È inoltre importante sottolineare anche il grande vantaggio rappresentato dalla produzione elettrolitica di idrogeno che consiste nella generazione "on-site", evitando ogni possibile problema correlato con il trasporto e la distribuzione del gas, fattori piuttosto critici nell'ottica di una diffusa economia dell'idrogeno [21].

Un'ultima considerazione riguarda chiaramente l'impiego dell'energia nucleare (laddove è possibile) che fornisce energia a costi estremamente competitivi.

L'elettrolisi dell'acqua rappresenta evidentemente un reale collegamento tra il campo delle fonti rinnovabili e l'applicazione dell'idrogeno nel campo dei trasporti, in un'ottica di sostenibilità e rispetto dell'ambiente.

Programmi di ricerca internazionali ed europei

Negli ultimi anni sono stati presentati numerosi programmi di ricerca che hanno come oggetto l'incremento dell'efficienza degli impianti elettrolitici e lo sviluppo di nuovi materiali impiegati nei diversi tipi di elettrolizzatori.

Ad esempio, si ricordano i programmi europei ENNONUC 3C, ENDEMO C, RAWMAT 3C, FP6-INCO (1994-2002). In tempi più recenti, numerose ricerche hanno riguardato l'impiego delle energie alternative (in particolar modo l'energia eolica) per la produzione di idrogeno: il progetto JOULE 2 (1996), ELECTROCELL (2005), MS-UK C (2007) ed il programma EESD (2005) con i Progetti RENEWABLE-H2 e WEFC.

Nell'ambito del FP6-SUSTDEV, il progetto HI2H2 (2007) è dedicato allo studio degli elettrolizzatori ad alta temperatura ed efficienza, HYDROSOL (2005-2007) all'elettrolisi dell'acqua mediante energia solare e nel JRC 48 (2006) oggetto di

ricerca sono gli elettrolizzatori ad elevata pressione.

Interessanti sono anche le implicazioni del progetto FP6-EURATOM (2006) che prevede l'impiego dell'energia termica sviluppata nei reattori nucleari di quarta generazione per la generazione di idrogeno tramite elettrolisi ad alta temperatura (HTE).

Partners industriali coinvolti sono, tra gli altri, DMK Ingenieria S.L. (Spagna), Applied Technologies Co. Ltd. (Russia), Centre for Renewable Energy Sources (Grecia), Ceram Hyd. S.A.S. (Francia).

A proposito del coinvolgimento dei Paesi extraeuropei nell'ambito di progetti ed impianti di produzione elettrolitica di idrogeno, le attività e le realizzazioni più significative si ritrovano in Canada, negli Stati Uniti e nei Paesi asiatici.

Nello specifico, il Canmet Energy Technology Centre e Hydro-Quebec Institute of Research sono particolarmente attivi nel campo della ricerca e sviluppo di elettrolizzatori, mentre la Air Products & Chemicals Inc., la Infinity Fuel e la Treadwell Corporation hanno realizzato numerose stazioni di rifornimento ad idrogeno generato "on-site" sfruttando energie alternative.

Impianti dello stesso tipo sono presenti in Corea ed in Giappone (programmi WE-NET), sviluppati in collaborazione con gli istituti di ricerca Kaist e Nedo, rispettivamente, ed a Singapore, frutto di una collaborazione tra Shinko Pantec Pem Electrolyzers, BP e Daimler Chrysler.

Situazione italiana

Dal punto di vista dell'attività industriale, in Italia, a parte il già citato Gruppo De Nora, non esistono grandi industrie produttrici di elettrolizzatori. È presente però una realtà costituita da piccole società che producono generalmente elettrolizzatori di tipo alcalino, sia a pressione atmosferica che ad alta pressione, ed elettrolizzatori a membrana.



Generatore di H₂ Erreuegas G10 da 6,7 Nm³/h, per alimentazione caldaia a idrogeno per riscaldamento strutture alberghiere con fonti rinnovabili

MULTIFUEL STATION



Fig. 2 - Distributore Agip "Multienergy" di Grecciano (LI)

In particolare, nella provincia di Milano, sono attive la Sepsi Srl, la Nitor Clever Srl che produce sistemi fino a 30 bar con produzione di idrogeno da 0,25 a 2,0 Nm³/h e che collabora con la Casale Chemicals (CH), la Idrogen2 con impianti ad alta pressione (30 bar) che forniscono fino a 5 Nm³/h di idrogeno.

Infine, in provincia di Pisa ha sede la Piel (divisione della ILT Technologie Srl) che costruisce sistemi (sia standard che ad alta pressione) piuttosto efficienti che raggiungono una produzione di idrogeno di 14 Nm³/h, ed in provincia di Livorno la ErreDue Srl che produce generatori di idrogeno alcalini da 1 Nm³/h a 64 Nm³/h.

La DBS Strumenti Scientifici Srl (PD) produce elettrolizzatori a membrana polimerica con produzione di idrogeno fino a 60 Nlt/h (1,0 Nlt/min). La ILT Technologie è la società più attiva nell'integrazione tecnologica per una filiera sostenibile per l'idrogeno e quindi per una più ampia dif-

distributore di idrogeno a Modena. Una realizzazione di particolare rilievo è rappresentata dal distributore Agip "Multienergy" di Grecciano (LI) che eroga idrogeno, oltre agli altri combustibili, ed è del tutto autosufficiente dal punto di vista energetico (Fig. 2).

Si tratta di un sistema all'avanguardia in cui, sfruttando l'energia solare ed eolica, vengono prodotti circa 80 kW: parte di questa energia viene utilizzata per la produzione, ad impatto ambientale zero, di idrogeno da elettrolisi dell'acqua.

Da ultimo, esistono varie società che producono componenti specifici per elettrolizzatori sia alcalini che polimerici (ad esempio Chem-Tech Engineering, in provincia di Bergamo).

Considerando l'aspetto più propriamente correlato alla ricerca ed allo sviluppo di questa tecnologia, sia il Centro Nazionale delle Ricerche che l'Enea partecipano a vari progetti.

Bibliografia

- [1] www.chem.polimi.it
- [2] L. Giorgi, Materiali per elettrolizzatori alcalini innovativi, RT ENEA TEA-ECHI, 1994.
- [3] www.ulisse.sissa.it
- [4] JANAF Thermochemical Tables, 2nd Edition, NBS, Washington, 1971.
- [5] B.V. Tilak *et al.*, in Comprehensive Treatise of Electrochemistry, J.O'M. Bockris *et al.* (Eds.) Plenum Press, New York, 1981.
- [6] T. Oi, Y. Sakaki, *Journal of Power Sources*, 2004, **129**, 237.
- [7] W. Kreuter, H. Hofmann, *Int. J. Hydrogen Energy*, 1998, **23**(8), 661.
- [8] H. Wendt, H. Plzak, *Karntechnik*, 1991, **56**(1), 8.
- [9] J. Divisek, in Electrochemical Hydrogen Technologies, H. Wendt (Ed.), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1990.
- [10] P. Millet *et al.*, *Int. J. Hydrogen Energy*, 1996, **21**(2), 87.
- [11] K. Sundmacher *et al.*, *Catalysis Today*, 2005, **104**, 185.
- [12] S.A. Grigor'ev *et al.*, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2006, **31**, 171.
- [13] P. Millet *et al.*, *J. Appl. Electrochem.*, 1989, **19**, 162.
- [14] W. Smith, *Journal of Power Sources*, 2000, **86**, 74.
- [15] S.A. Grigor'ev, V.I. Porembskii, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2004, **40**, 9.
- [16] J.I. Levene *et al.*, *Solar Energy*, 2007, **81**, 773.
- [17] www.etruriainnovazione.it
- [18] D. Shapiro *et al.*, *Solar Energy*, 2005, **79**, 544.
- [19] M. Kato *et al.*, *Applied Energy*, 1998, **59**(4), 261.
- [20] www.micro-vett.it
- [21] C. Schroeder, "Hydrogen from electrolysis", in The Hydrogen Energy Transition, a cura di D. Sperling, J.S. Cannon, Elsevier, 2004, 121.

RIASSUNTO

Hydrogen Production by Electrolysis

Solar and wind energy could be suitable to provide clean electricity by hydrogen-generating electrolyzers. In this way, hydrogen production represents a pathway for using renewable domestic energy sources, directly contributing to the greenhouse gases emission reduction and to the imported fuels dependence limitation. In this article, the state-of-the-art of the hydrogen production by means of water electrolysis and its effective cost have been analysed. The authors carried out an assessment work on the renewable hydrogen resource and on the hydrogen production cost via electrolytic process, giving a short review of the electrolyser national industries. Finally, the energy requirements to refuelling hydrogen production from wind and solar power has been analysed.