



# Generazione di H<sub>2</sub>

## Apparecchiature elettrochimiche

di Mario Silingardi, Giuseppe Sironi

Si discutono le principali problematiche legate sia ai processi elettrochimici che hanno luogo all'interno delle apparecchiature, sia all'impatto delle apparecchiature stesse sull'ambiente circostante, in termini d'affidabilità e di sicurezza. Inoltre, si sottolinea l'utilità di una vigilanza sulla commercializzazione e sulla messa in servizio delle apparecchiature, al fine di non pregiudicare la sicurezza degli utilizzatori.

**L'**opinione pubblica è ogni giorno più sensibile ai problemi d'inquinamento ambientale, derivanti dall'impiego dei combustibili fossili per la produzione dell'energia essenziale per lo sviluppo economico. È stato d'altronde chiarito che l'inquinamento provoca, come risultato indotto, elevati costi sociali a livello sanitario e ambientale.

Lo sfruttamento delle fonti rinnovabili, unitamente alla diffusione di efficienti tecniche d'uso dell'energia, costituisce un percorso obbligatorio per rendere socialmente sostenibile tale sviluppo.

Si considera, quindi, come fondamentale l'introduzione di nuove tecnologie, che portino ad una netta riduzione delle emissioni nocive in atmosfera. Fra queste sono di grande rilievo quelle che prevedono l'uso dell'idrogeno come vettore di energia.

In passato sono stati pubblicati numerosi lavori sull'argomento, giungendo a formulare ipotesi su un'economia basata interamente sulla distribuzione di idrogeno. Oggi l'argomento viene particolarmente rilanciato quale asse portante per lo sviluppo a medio-lungo termine, con l'introduzione delle celle (o pile) a combustibile in numerosi progetti di riconversione dell'idrogeno in energia elettrica. Significativa la promozione dell'argomento su base nazionale da parte dell'Enea.

M. Silingardi, Comitato Elettrotecnico Italiano (CeI) - Via Saccardo, 9 - Milano  
G. Sironi, Fast - Piazzale Morandi, 2 - Milano.

### L'idrogeno come vettore di energia "pulita"

Fondamentalmente, l'idrogeno può essere prodotto in due modi: per trasformazione chimica di materie prime minerali (carbone, gas naturale, derivati del petrolio) o per scissione elettrochimica o termica dell'acqua.

Nel primo caso la presenza dell'atomo di carbonio nella molecola porta alla produzione collaterale di anidride carbonica che, a tutela dell'atmosfera, dovrà essere separata dall'idrogeno per essere accumulata in modo permanente: sono recenti le ipotesi di confinarla nel sottosuolo o sui fondali marini.

Nel secondo caso questo problema non esiste, a patto che l'energia necessaria alla scissione dell'acqua non sia prodotta a partire da materie prime minerali, ma sia di fonte rinnovabile (ad esempio idroelettrica, solare o eolica).

La strategia vincente dovrebbe quindi sostituire gradualmente il consumo di energia primaria da fonti minerali con quella da fonti rinnovabili. L'introduzione dell'idrogeno come vettore di energia non richiede innovazioni tecnologiche di tipo fondamentale.

I metodi di generazione e di trasporto sono comunemente praticati in varia scala e dovranno essere progressivamente affinati in termini di efficienza, affidabilità, riduzione dei costi. Per contro, dovranno essere approfonditi alcuni metodi di separazione, individuate più convenienti modalità di stoccaggio, messe



Unità di generazione di H<sub>2</sub> da fonte solare fotovoltaica

a punto le tecnologie di riconversione in energia. L'elettrolisi dell'acqua è un metodo di generazione di idrogeno (ed ossigeno) noto da più di un secolo, così come è noto da tempo il principio della sua riconversione in energia elettrica mediante pila a combustibile.

Fra le caratteristiche peculiari della nuova economia basata sull'idrogeno è interessante notare come la generazione dell'idrogeno da elettrolisi ed il suo riutilizzo in pile a combustibile siano particolarmente adatti anche ad un'economia distribuita sul territorio, realizzata mediante unità di modesta potenzialità.

Tipicamente, l'idrogeno può essere prodotto da fonti solari, eoliche, idroelettriche attraverso l'elettrolisi dell'acqua, seguendo le fluttuazioni di produzione della fonte e può essere stoccato in forma gassosa, sotto pressione adeguata a ridurre il volume, per essere poi riutilizzato come combustibile in bruciatori catalitici (bassa temperatura operativa, con sostanziale riduzione degli ossidi di azoto) o in pile a combustibile.





### Qualità, affidabilità e sicurezza

In realtà risulta abbastanza semplice realizzare sia piccoli elettrolizzatori dell'acqua, che piccole pile a combustibile basate sull'idrogeno, così come è stato già dimostrato sul piano artigianale. Piccoli elettrolizzatori sono già stati posti in commercio per altri scopi, principalmente come sostitutivi della distribuzione di idrogeno in bombole.

In alcuni casi si pubblicizzano elettrolizzatori che, per la semplicità d'impiego, vengono espressamente paragonati ad elettrodomestici o a macchine da caffè espresso, giungendo ad utilizzarne tipici componenti per la regolazione. Si consideri però che negli apparecchi citati non sono presenti gas come l'idrogeno e l'ossigeno, che richiedono ben altro approccio all'esame dei rischi da possibili guasti o malfunzionamenti.

Comunque, prima di accettare una distribuzione indiscriminata di apparecchiature la cui qualità, affidabilità e sicurezza non siano garantite da opportuni criteri e controlli, è bene che si inneschi una discussione del problema, soprattutto in termini di sicurezza. La presenza di idrogeno, capace di dar luogo a miscele gassose esplosive sia con aria, sia con ossigeno, va considerata con grande attenzione. La sicurezza di ogni realizzazione è legata ad una combinazione dei parametri di rischio ed agli effetti che ne possono conseguire. Tutti ricordano con grande apprensione, anche se la scala è molto diversa, il disastro del dirigibile Hindenburg, enorme contenitore flessibile di idrogeno incendiatosi a causa di una combinazione negativa fra l'inadeguatezza di alcune caratteristiche del suo involucro e le condizioni atmosferiche prevalenti quel giorno.

È forse meno conosciuta, sebbene molto più pertinente, l'esplosione di un impianto di elettrolisi dell'acqua alle Laporte Industries Ltd (1975), di cui riferisce un rapporto ufficiale dell'inglese Factory Inspectorate, un documento importante perché, al capitolo "Lessons to be learned" pone le basi di accorgimenti progettuali (ad esempio analisi del gas, ispezioni sistematiche) cui oggi è bene far riferimento per la prevenzione dei rischi collegati alla tecnologia.

### Rischi legati al processo

L'esame può iniziare considerando quali rischi possano derivare dal processo operativo in atto all'interno delle appa-

recchiature che generano, consumano, separano, comprimono, distribuiscono o accumulano idrogeno.

Questi rischi sono legati essenzialmente alla fortuita presenza di miscele idrogeno-aria o idrogeno-ossigeno in varia proporzione. Ciò può provenire da inadeguatezza del sistema di controllo, da cedimento di tenute o di membrature interne, ma anche da possibili deviazioni dalle condizioni normali di processo. Si tratta in ogni caso di eventualità da evitare, senza mai accettare l'ipotesi che la sicurezza sia garantita da una presunta assenza di fonti di innesco (sono sufficienti energie dell'ordine di 20  $\mu$ J per innescare questo tipo di miscele gassose). Le unità di elettrolisi dell'acqua, così come i sistemi di pile a combustibile, sono gestiti da sistemi automatici più o meno sofisticati, che hanno il compito di garantire condizioni di esercizio affidabili e sicure. Il sistema di controllo, quindi, assume il compito di rendere minimo il rischio operativo, che qui si identifica principalmente, come abbiamo accennato, con la probabilità di pericolose esplosioni all'interno delle apparecchiature (ma con effetti proiettati poi verso l'esterno), dovute alla formazione fortuita ed innesco di miscele di idrogeno con ossigeno o con aria.

Alcune precauzioni che, a titolo di esempio, riteniamo come irrinunciabili nel settore degli elettrolizzatori dell'acqua (ma estendibili alle celle a combustibile per gli aspetti di competenza) riguardano l'intervento del sistema automatico di controllo per:

- dare l'allarme in caso di deviazioni significative dei parametri operativi (temperatura, pressione, livelli liquidi, analisi del gas, flusso di corrente ecc.) da soglie predeterminate in modo da garantire condizioni di sicurezza;
- dare il blocco al processo al perdurare delle deviazioni dette, riportando automaticamente il sistema in condizioni di sicurezza;
- abbassare la pressione operativa scaricando i gas di processo (idrogeno, ossigeno) con modalità controllate automaticamente, che non portino a miscelare fortuitamente gli stessi gas all'interno dell'apparecchiatura;
- sostituire automaticamente i residui di gas di processo con gas inerte, fino ad eliminazione dei gas che si sviluppano dalla fase liquida al rilascio della pressione;
- intervenire automaticamente in sostegno del sistema di controllo con una batteria-tampone nel caso in cui si dia

il blocco all'alimentazione elettrica; la stessa batteria deve provvedere anche a riportare il sistema in sicurezza in ogni altro caso di mancanza di alimentazione elettrica al sistema di controllo (lo stato di carica della batteria deve essere costantemente monitorato);

- operare il blocco del processo e la messa in sicurezza mediante un circuito di arresto realizzato in modo cosiddetto hard-wired, indipendente da istruzioni su supporto elettronico (per i moduli software non esistono validi metodi di predizione dell'affidabilità, che portino ad alti livelli di confidenza).

### Requisiti tecnici

Passando ad esaminare l'impatto delle apparecchiature sull'ambiente esterno, i requisiti tecnici generali si traducono nel rispetto di particolari disposizioni legislative e norme tecniche. Citiamo, nel caso generale, le norme che riguardano:

- la prevenzione degli infortuni (tutela della sicurezza e della salute),
- la progettazione dei recipienti a pressione e dei relativi sistemi di interconnessione,
- la realizzazione degli impianti elettrici in zone pericolose per la presenza di sostanze infiammabili, da applicare sia all'interno dell'apparecchiatura, sia nell'intorno della stessa,
- gli aspetti di sicurezza in relazione alle logiche di controllo ed all'affidabilità delle apparecchiature atte a realizzarle.

In termini di prevenzione degli infortuni vale la direttiva 89/391/Cee, riguardante il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori sul luogo di lavoro, recepita dallo Stato Italiano con il decreto legislativo 626/94.

Con riferimento alle particolari apparecchiature di cui trattiamo è rilevante, ad esempio, che l'utilizzatore non possa venire a contatto, nemmeno fortuito, con eventuali parti nude attive dei componenti elettrici: tali parti devono essere protette con opportuna segregazione, anche per impedire la formazione di scintille capaci di innescare atmosfere potenzialmente esplosive.

### Apparecchiature a pressione

Le attrezzature a pressione devono essere progettate, fabbricate e controllate tenendo conto di tutti i fattori pertinenti, che consentono di garantirne la sicurezza per tutta la durata di vita prevista. Di ciò tratta la direttiva del Parlamento Europeo 97/23/Ce.





Nella fattispecie, è necessaria una scelta oculata dei componenti destinati al contenimento dei fluidi, così come dei criteri costruttivi da adottare, quali:

- un'adeguata scelta dei materiali per la realizzazione dei recipienti, delle tubazioni e dei dispositivi di connessione, comprese le guarnizioni ove previste,
- una riduzione al minimo indispensabile delle giunzioni realizzate con dispositivi di connessione apribili,
- una costruzione a *perfetta regola d'arte* dei contenitori e dei giunti saldati, una loro qualificazione da parte degli enti riconosciuti;
- un'alta qualità degli accoppiamenti tra i componenti, in particolare delle flange e delle giunzioni a compressione, che devono essere di caratteristiche adeguate e certificate. Va qui sottolineata la presenza, sia per gli elettrolizzatori che per le pile a combustibile, di stack di celle, la cui tenuta ai fluidi interni è realizzata mediante un numero di guarnizioni relativamente elevato, ciò costituendo un elemento molto delicato nella determinazione delle potenziali sorgenti di emissione di idrogeno.

Ragioni di sicurezza impongono poi verifiche prima della messa in servizio, verifiche periodiche ed interventi di manutenzione programmata, per i quali è richiesto:

- un accurato collaudo dei circuiti mediante pressatura idraulica, quindi a pressione di gas con contemporanea ricerca delle perdite mediante agenti schiumogeni, seguita da individuazione delle perdite mediante rilevatore di idrogeno (leak detector), sia durante la marcia normale, sia mediante verifiche periodiche;
- una sostituzione programmata dei componenti usurabili e delle guarnizioni, nel rispetto delle indicazioni del costruttore e comunque con periodicità tale da assicurare nel tempo il mantenimento della tenuta;
- la consegna all'utilizzatore di un dettagliato manuale di istruzioni per l'installazione, l'uso e la manutenzione dell'apparecchiatura.

È importante evitare che possibili interventi di manutenzione producano variazioni nelle caratteristiche di tenuta dei componenti dell'impianto, con alterazione dei requisiti di sicurezza originari. Ciò deve essere impedito, sia da corrette scelte progettuali che favoriscano la manutenibilità, sia da un'accurata istruzione di chi debba operare interventi.

#### Apparecchiature elettriche

Per il controllo dei rischi dovuti alla formazione di miscele gassose infiammabili, ogni impianto di generazione o di utilizzo dell'idrogeno deve essere progettato, installato, esercito e mantenuto in modo da:

- prevenire o comunque rendere minime e poco probabili le sue emissioni, sia in funzionamento normale, sia in caso di *funzionamento anormale ragionevolmente prevedibile*,
- evitare l'innesco delle atmosfere esplosive eventualmente venutesi a creare,
- attenuare i danni di un'esplosione in modo da garantire la salute e la sicurezza degli utilizzatori.

Al riguardo esiste la direttiva 1999/92/Ce, non ancora recepita dallo Stato Italiano.

A questo scopo è necessario saper riconoscere, in fase di progettazione, quali possano essere le potenziali *sorgenti di emissione* d'idrogeno, nonché la frequenza e durata delle emissioni. Le *zone pericolose* sono definite come quelle porzioni del luogo di installazione in cui possa essere presente un'atmosfera esplosiva tale da richiedere provvedimenti particolari per la realizzazione, l'installazione e l'impiego dei componenti costruttivi, che non devono causare il suo innesco. Particolare attenzione deve essere posta, in generale, alla protezione contro eventuali scintille capaci di innescare l'esplosione di miscele idrogeno-aria, quali possono essere generate da parti attive di componenti elettrici, da elettricità statica, da fulmini, da mancanza di equipotenzialità fra parti conduttrici di impianto.

In merito agli impianti elettrici, ad esempio, la norma Cei En 60079-10 (1996) classifica le possibili emissioni come di *grado continuo*, *grado primo* (periodiche, in funzionamento normale), *grado secondo* (brevi, infrequenti).

Per le apparecchiature che stiamo considerando, il *grado continuo* può essere rappresentativo di tutte le emissioni strutturali (fugitive emission), considerate come uniformemente distribuite in corrispondenza di tutti i punti di discontinuità del sistema di contenimento dell'idrogeno.

Può darsi che l'apparecchiatura, per ragioni di processo, debba procedere a sfiati sistematici di idrogeno, localizzabili e riconoscibili come sorgenti di *grado primo*.

Il *grado secondo* è rappresentativo di tut-

te le emissioni che possono avvenire in occasione di guasti ragionevolmente prevedibili ai dispositivi di tenuta (guarnizioni, premistoppa e simili), o di apertura di valvole di sicurezza o di dischi di rottura, posti a protezione delle apparecchiature. Il tipo di *zona pericolosa* viene strettamente correlato al *grado* dell'emissione, per cui in generale un'emissione di *grado continuo* genera una *Zona 0*, una di *grado primo* una *Zona 1*, una di *grado secondo* una *Zona 2*. La ventilazione dell'ambiente può tuttavia alterare questa corrispondenza biunivoca: una ventilazione cattiva o del tutto mancante può aggravare la situazione ed incidere negativamente sulla classificazione della zona, così come una ventilazione efficace e garantita può essere migliorante della classificazione.

La stessa norma indica come valutare l'estensione delle zone pericolose di vario tipo, causate dalle singole sorgenti, in termini di *forma* e *dimensione*. Esempi sono riportati nella Guida Cei 31-35 (1999). La forma può essere condizionata dalla presenza d'ostacoli, anche in relazione alla densità del gas sotto esame. Essendo l'idrogeno un gas di bassissima densità in relazione all'aria, le emissioni tendono a diffondere verso l'alto. Deve essere quindi esclusa, all'atto della progettazione, la presenza di tetti o pareti che ne favoriscano l'accumulo all'interno di un eventuale contenitore dell'apparecchiatura stessa o nell'ambiente in cui essa è installata, a meno di prevedere rivelatori di idrogeno, collegati ad un sistema di blocco totale dell'alimentazione elettrica all'apparecchiatura.

L'inviluppo delle zone pericolose originate da tutte le sorgenti d'emissione determina l'estensione globale del luogo con pericolo d'esplosione. Gli impianti elettrici situati all'interno di tale luogo sono soggetti a normative specifiche; i loro componenti devono essere *in esecuzione di sicurezza*.

Per quanto si riferisce all'apparecchiatura nel suo insieme ed ai relativi componenti (elettrici e non elettrici), esiste la direttiva 94/9/Ce (recepita dallo Stato Italiano con il DPR 23 marzo 1998 n.126), che definisce i requisiti degli apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfere potenzialmente esplosive. La direttiva convive con le direttive *del vecchio approccio* (esempio 76/117/Cee, 79/196/Cee) fino al 30 giugno 2003, data in cui essa diverrà obbligatoria in tutti i Paesi dell'Ue. e le vecchie direttive saranno abrogate. Il perio-





do di contemporanea validità (dal 1994 al 2003) è stato previsto per consentire l'armonizzazione delle norme Cenelec e Cei ora in vigore, l'adeguamento delle produzioni, lo smaltimento delle scorte di magazzino.

#### Sistemi di controllo

Abbiamo già sottolineato quanto sia necessaria l'affidabilità progettuale e funzionale dei sistemi di controllo a proposito dei rischi legati al processo operativo. Di fatto, la progettazione delle apparecchiature non può prescindere da un'analisi accurata, che identifichi tutte le possibili cause di formazione, al suo interno, di miscele gassose pericolose ed i criteri per prevenirle. Quest'analisi, ad esempio, può essere vantaggiosamente compiuta con metodologia Hazop (Hazard and Operability Study), valutando per ogni componente del sistema quali possano essere le conseguenze di una sua deviazione dal comportamento corretto e procedendo di conseguenza con provvedimenti di adeguato rilievo nella scelta del componente stesso o nella reazione di intervento del sistema di controllo (ridondanze, allarmi, interblocchi). Analisi di questo genere possono essere condotte da società specializzate, con rilascio di rapporti che certifichino i risultati. Direttive tipiche di esame del rischio sono ad esempio le norme Din V 19 250 (Grundlegende Sicherheitsbetrachtungen für MSR-Schutzeinrichtungen). Per la valutazione della *fidatezza* di un sistema di misura e controllo rimandiamo anche alla Norma Italiana Cei En 61069-5.

#### Il problema della sorveglianza

Le direttive del Parlamento Europeo disseminano il concetto secondo cui gli Stati membri devono adottare tutte le misure necessarie affinché le apparecchiature sottoposte alle direttive stesse siano commercializzate e poste in servizio soltanto se non pregiudicano la sicurezza e la salute delle persone e dei beni. Si richiede cioè un'adeguata vigilanza sul mercato.

Esistono nazioni europee in cui un'apparecchiatura di elettrolisi dell'acqua non può essere introdotta ed installata senza un dettagliato esame preliminare del progetto di costruzione e delle modalità di installazione e di uso. In Germania l'ente di controllo che opera in tal senso è il Tüv.

In altre aree gli impianti non vengono assicurati contro gli infortuni se non dopo un analogo esame da parte del Lloyd's

Register. In Italia, purtroppo, al momento non è richiesto alcun esame preliminare formale, che faccia da filtro alla diffusione di apparecchiature criticabili in termini di sicurezza.

È richiesto, naturalmente, che il costruttore rispetti le norme di legge relative alla prevenzione degli infortuni, alla progettazione ed installazione dei recipienti in pressione, alla realizzazione di impianti elettrici in luoghi con pericolo di esplosione, ma nulla fa riferimento ad un esame preventivo dei rischi operativi di processo e dell'affidabilità intrinseca dei sistemi. Tra l'altro, i luoghi di installazione di questo tipo di apparecchiature non rientrano generalmente tra quelli, definiti nel dm 22-12-1958, per i quali sono prescritte le particolari norme di cui agli articoli 329, 330, 331, 332, 333, 334 e 400 del dPR 547/55, con obbligo di denuncia (modello C) e di verifiche (iniziale e periodiche) da parte dell'Asl competente per territorio ai sensi del dPR 547 art. 336, concernenti gli impianti elettrici nei luoghi con pericolo di esplosione.

Ci si deve quindi augurare che questo modo di gestire la problematica, a fronte dell'introduzione progressiva di un'economia distribuita dell'idrogeno, si allinei quanto prima alla riconosciuta necessità di un esame preliminare dei criteri di progettazione, di installazione ed uso dei manufatti.

Nell'attesa, l'utilizzatore di tali apparecchiature, che per ora è nella maggior parte dei casi l'artigiano o la piccola-media azienda che decide di sostituire l'uso delle bombole di idrogeno con l'acquisto di un elettrolizzatore dell'acqua, o di rimpiazzare l'uso di accumulatori elettrici con l'installazione di una cella a combustibile, dovrebbe essere sensibilizzato in modo adeguato a garantirsi una situazione di reale assenza di rischio. Non si tratta di compito semplice, date le caratteristiche di poca visibilità di un tale utente.

Va infine sottolineato, anche se a tutti ovvio, che la prevenzione del rischio mediante analisi approfondita dei processi operativi, la scelta di componenti di impianto affidabili, l'osservazione puntuale delle norme, hanno un loro inevitabile costo, che l'utente deve essere pronto ad affrontare come valore irrinunciabile, scartando i prodotti che non diano formali garanzie, possibilmente certificate da qualificati enti terzi rispetto al costruttore del manufatto. Si eviti soprattutto di accettare una concorrenza di prezzo basata sulla rinuncia a fattori di sicurezza.

