

MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART
 NATIONAL BUREAU OF STANDARDS
 STANDARD REFERENCE MATERIAL 1010a
 (ANSI and ISO TEST CHART No. 2)

IT 02E 1265

IL PROGETTO DELL'ENEA PER LA PRODUZIONE DI IDROGENO FOTOVOLTAICO

ETDE-IT-92-54

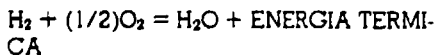
L. Barra, D. Coiante, ENEA, Area Energetica, Dipartimento Fonti Rinnovabili

DE92 526493

PREMESSA

L'idrogeno è l'elemento chimico più leggero e più diffuso nell'universo. Sulla terra esso è presente in grandissima quantità in numerosi composti chimici, tra cui primeggia l'acqua dei fiumi e degli oceani. Ogni litro o kg di acqua pura contiene 1/9 di kg di idrogeno, cioè 0.111 kg.

L'idrogeno gassoso brucia facilmente combinandosi con l'ossigeno per produrre acqua, sviluppando in tal modo notevoli quantità di calore, secondo la reazione:



La combustione di 1 kg di idrogeno produce una quantità di energia termica (potere calorifico inferiore) pari a 34.75 kWh.

In ogni litro di acqua è racchiusa una quantità di idrogeno corrispondente ad una energia termica di circa 38 kWh, che equivale a quella dissipata da una lampada da 100 W per 38 ore di funzionamento.

L'enorme quantità di energia collegata all'idrogeno dell'acqua può essere resa accessibile agli usi umani rompendo i legami chimici della molecola d'acqua (elettrolisi) per mezzo della altrettanto grande ed inesauribile energia solare che cade sulla terra. La reazione di scissione, che risulta essere esattamente inversa di quella della combustione, si scrive:



L'insieme delle due reazioni sintetizza l'intero processo e ne mette in risalto la natura ciclica e rinnovabile (Fig 1) dall'acqua, per azione dell'energia elettrica solare, si produce idrogeno, che, bruciato, restituisce parte dell'energia solare primaria sotto forma di energia elettrica o termica e ripristina l'acqua di partenza.

senza alcuna emissione di sostanze inquinanti.

ELEMENTI DI STRATEGIA

La polluzione ambientale

Il consumo mondiale di energia è oggi soddisfatto per oltre l'80% dai combustibili fossili. Tale consumo è in rapido aumento nonostante le misure di risparmio energetico attuate nei paesi industrializzati. Questo fenomeno è collegato anche alla crescita demografica mondiale ed allo sviluppo dei PVS.

L'utilizzo energetico dei combustibili fossili dà luogo all'emissione di una serie di prodotti inquinanti, che consistono essenzialmente in:

- anidride carbonica (CO₂) ed ossido di carbonio;
- ossidi di azoto;
- ossidi di zolfo;
- composti organici volatili (VOCs);
- particolati

L'anidride carbonica è uno dei maggiori responsabili dell'effetto serra, mentre gli ossidi di azoto e di zolfo determinano il fenomeno delle piogge acide. I VOCs si decompongono sotto l'azione dei raggi ultravioletti del sole producendo composti che si legano all'ozono atmosferico

e ne riducono la concentrazione nella fascia protettiva ad alta quota. Il particolato, infine, possiede proprietà fortemente irritative e cancerogene.

Proporzionalmente all'incremento del consumo dei combustibili fossili, il contenuto atmosferico di anidride carbonica è aumentato esponenzialmente a partire dal livello di equilibrio dell'epoca pre-industriale, collocabile a circa 280 ppm, fino a raggiungere quello attuale di circa 380 ppm. Il settore energetico contribuisce all'aumento per una quota rilevante, stimata intorno al 57%.

La metà circa dell'incremento si è avuta negli ultimi 30 anni. Se il ritmo attuale di crescita dell'anidride carbonica, pari a circa lo 0.4% all'anno, dovesse continuare, si potrebbe arrivare al raddoppio del contenuto atmosferico entro il 2075. Tale raddoppio potrebbe comportare un aumento della temperatura media dell'atmosfera terrestre compreso tra 1.5 e 4.5 °C.

Per ridurre la produzione di CO₂ è indispensabile limitare l'uso dei combustibili fossili, individuando una fonte energetica diversa e pulita.

Le sole fonti attualmente note che si pongono in alternativa ai combustibili fossili sono:

- il nucleare da fissione,

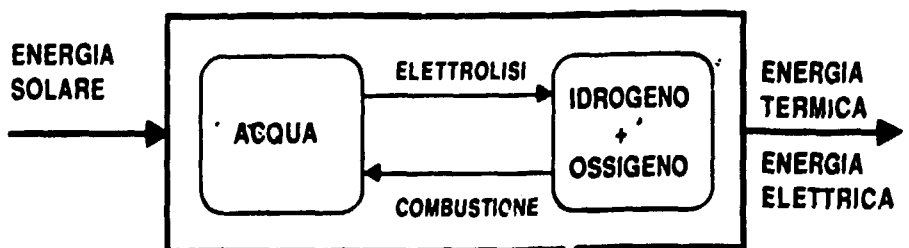


Figura 1 - Ciclo dell'idrogeno

MASTER

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED
FOREIGN SALES PROHIBITED RB

- la nucleare da fusione.
- le fonti rinnovabili.

Le fonti rinnovabili

Il ricorso alle fonti rinnovabili (idroelettrico, eolico, solare termico, fotovoltaico e biomasse) nella progressiva sostituzione dei combustibili fossili diverrà sempre più significativo via via che esse raggiungono la competitività e che i costi ambientali vengono contabilizzati nei bilanci economici della produzione di energia.

La totale sostituzione delle fonti convenzionali con quelle rinnovabili è un concetto situabile nel lungo periodo, in quanto esso implica, oltre alla competitività dei costi, il superamento della barriera tecnica dovuta alla intermittenza della produzione di energia, che è propria di tali fonti e che, in ultima analisi, è riconducibile alla variabilità della fonte solare.

Il fotovoltaico

In particolare, il fotovoltaico, che sul piano delle prospettive di costo e della disponibilità rappresenta per l'Italia l'opzione più praticabile su larga scala, ha come unica limitazione tecnica la aleatorietà della produzione di energia.

In definitiva, la penetrazione del fotovoltaico nel settore delle centrali elettriche risulta oggi limitato da due fattori: il costo e la discontinuità della produzione.

- Per quanto riguarda il primo, i programmi di ricerca e sviluppo in corso a livello mondiale e l'ampliamento continuo della base di mercato produrranno una progressiva riduzione dei costi dell'energia fotovoltaica fino alla competitività con le altre fonti a livello di confronto nel settore omologo della produzione di energia elettrica (energia secondaria).

- Per ciò che concerne la discontinuità della produzione, occorre sviluppare un appropriato ed efficace sistema di accumulo dell'energia, che, integrato negli impianti fotovoltaici, assicuri la continuità temporale dell'erogazione di energia elettrica almeno con lo stesso grado di affidabilità di una centrale convenzionale.

L'idrogeno

Tra le varie forme di accumulo dell'energia (accumulatori elettrochimici, volani meccanici, bacini di pompaggio, gas compressi, superconduttori, ecc.), la tecnica più promettente, che mostra di possedere i requisiti pratici, tecnici, economici ed ambientali di applicabilità al fotovoltaico, appare quella dell'accumulo chimico sotto forma di idrogeno.

Questo processo (Fig. 2), che, sviluppandosi lungo un percorso ciclico, viene anche denominato, come ciclo dell'idro-

geno, consiste nel convogliare l'energia elettrica fotovoltaica verso un secondo stadio di trasformazione in cui si produce idrogeno ed ossigeno per elettrolisi dell'acqua, nell'immagazzinare tali gas come gas compressi e/o gas liquefatti, nell'usare in tempo differito, ed eventualmente in luogo diverso dalla produzione, l'idrogeno per alimentare i diversi settori delle utenze energetiche, che possono andare da quello dell'elettricità a quello dei trasporti. La combustione dell'idrogeno negli usi finali ha come sottoprodotto principale acqua nella stessa quantità che era stata impiegata per l'elettrolisi di partenza (chiusura del ciclo).

Nelle applicazioni in motori a combustione interna, sono presenti quantità, comunque modeste, di ossidi di azoto.

L'interesse per l'idrogeno da fonte rin-

novabile, oltre che alla sua particolare applicazione come mezzo di accumulo chimico per il fotovoltaico, è, anche e soprattutto, dovuto a due altri fattori:

a) la capacità di sostituire i combustibili fossili in tutte le loro applicazioni energetiche, sia nella funzione di vettore dell'energia, sia come combustibile vero e proprio, preservando in tal modo gli idrocarburi per le ben più importanti applicazioni chimiche,

b) la grande pulizia ambientale connessa con la sua combustione, sia a fiamma libera, sia soprattutto catalitica, da cui si ottiene come principale effluente soltanto acqua.

SITUAZIONE INTERNAZIONALE

Un esempio significativo della produzione di idrogeno utilizzando una fonte

RADIAZIONE SOLARE

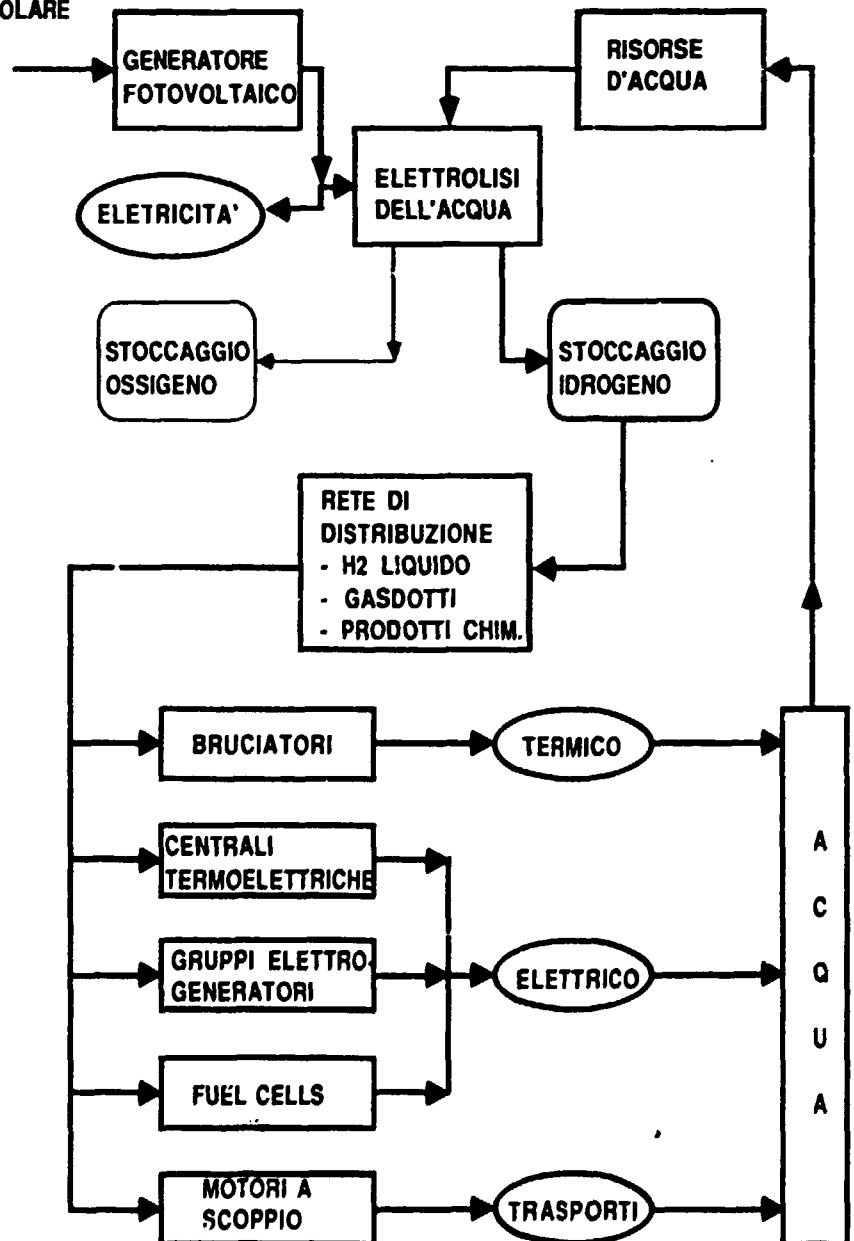


Figura 2 - Sistema energetico alternativo basato sull'idrogeno fotovoltaico

rinnovabile emerge dalla constatazione che questo gas oggi viene prodotto in numerosi paesi in quantità di circa 138.000 Nm³ all'anno ed a costo relativamente basso, con il processo di elettrolisi dell'acqua alimentato da energia idroelettrica. Attualmente l'idrogeno prodotto è impiegato principalmente per la sintesi dell'ammoniaca sostanza di base per i fertilizzanti agricoli.

I principali progetti che prevedono la produzione di idrogeno da fonte rinnovabile per impieghi nel settore energetico sono i seguenti:

- Progetto Solar Hydrogen Energy HYSOLAR.
- Progetto Solar Wasserstoff Bayern SWB.
- Progetto Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project EQHPP.
- Progetto concettuale Solar Hydrogen & Electrical Energy - Trans European Enterprise SHEE-TREE.

Il Progetto HYSOLAR

Il progetto tedesco-arabo HYSOLAR si propone di verificare, su una scala significativa, la fattibilità tecnico-economica della produzione e dell'uso dell'idrogeno da fotovoltaico. Il progetto, che è stato avviato nell'86, è molto articolato sia sul piano degli aspetti tecnici, sia su quello delle strutture, sia rispetto ai siti di realizzazione degli impianti.

Le tecnologie investigate nel progetto sono:

- elettrolizzatori avanzati in soluzione alcalina.
- celle a combustibile.
- sistemi di stoccaggio.
- motori a idrogeno per applicazioni stazionarie.
- bruciatori catalitici per la combustione dell'idrogeno.
- generatori di vapore surriscaldato per ricombinazione diretta idrogeno/ossigeno.

Il progetto è gestito congiuntamente dal Bundesminister für Forschung und Technologie e dal Ministerium für Wissenschaft und Kunst des Landes per parte tedesca e dal King Abdulaziz City for Science and Technology per l'Arabia. Sono coinvolte le seguenti strutture di ricerca:

- German Aerospace Research Establishment.
- University of Stuttgart.
- King Saud University.
- King Abdulaziz University.
- King Fahd University.

Gli obiettivi strategici del progetto HYSOLAR sono:

- costituire i presupposti scientifici, tecnologici ed economici per la produzione su scala industriale dell'idrogeno da fotovoltaico.

- iniziare una cooperazione a lungo termine tra la Germania e l'Arabia Saudita con lo scopo di promuovere il trasferimento di conoscenze e di "hardware" nel campo delle tecnologie avanzate.

Il progetto HYSOLAR è considerato come un esempio importante dell'approccio alla produzione di idrogeno fotovoltaico su larga scala. Esso si articola in sei obiettivi intermedi:

- progettazione, costruzione ed esercizio di un impianto dimostrativo da 350 kW situato a Riyadh.
- realizzazione a Stoccarda di una "facility" di prova da 10 kW.
- realizzazione a Jeddah di un'altra "facility" da 2 kW, essenzialmente di supporto all'impianto dimostrativo.
- studi di componenti e di sistema.
- formazione e informazione.

Attualmente, l'impianto da 350 kW è in esercizio, e le facility sperimentali di Stoccarda e Jeddah hanno già fornito significativi risultati sul comportamento dei diversi componenti del sistema.

Il Progetto SWB

Un altro rilevante progetto di ricerca, sviluppo e dimostrazione è il Solar Wasserstoff Bayern. L'SWB è un progetto interamente tedesco e di iniziativa privata, che utilizza anche fondi pubblici di ricerca. La gestione del progetto è affidata interamente ad un consorzio di imprese costituito ad hoc nel 1986, che si chiama appunto SWB GmbH e che risulta composto dalla Siemens (10%), dalla Linde (10%), dalla MBB (10%), dalla BMW (10%) e dalla Bayern Werk (60%). Il progetto è finanziato per il 50% dal governo tedesco e dallo stato della Baviera. Il costo totale previsto per la prima fase del progetto, che si conclude nel dicembre '91, è di 64 milioni di marchi.

L'obiettivo generale del progetto consiste nello studiare su scala significativa tutte le fasi del ciclo dell'idrogeno: produzione, accumulo ed usi finali, con particolare attenzione alle interfacce tra le diverse tecnologie implicate.

Il progetto prevede la realizzazione di un impianto fotovoltaico da 500 kWp installato a Neunburg vorm Wald nella Baviera orientale, sito considerato rappresentativo delle condizioni climatiche dell'Europa centrale.

Verranno sperimentate nell'impianto sia le attuali celle al silicio mono e policristallino, sia quelle al silicio amorfo. Particolare attenzione verrà dedicata allo studio degli elettrolizzatori ad alta effi-

cienza in relazione alle condizioni di intermittenza dell'alimentazione e del carico.

Saranno anche studiate le tecniche di immagazzinamento dell'idrogeno sotto forma gassosa e liquida, mentre per quanto riguarda lo studio delle applicazioni si studieranno le celle a combustibile, i combustori catalitici e i motori endotermici alimentati sia ad idrogeno gassoso che liquido.

La realizzazione del progetto prevede due fasi delle quali la prima dura 5 anni. Tale fase avviata con la costruzione dell'impianto e delle altre test facilities sul sito di Neunburg, si è appena conclusa ed ha portato alle seguenti acquisizioni:

- l'assemblaggio della prima sezione dell'impianto fotovoltaico con le tecnologie del silicio mono e policristallino per una potenza pari a 280 kW terminato nell'89.
- il collegamento dell'impianto alla rete effettuato a marzo '90.
- la consegna dell'intero sistema conclusa nella metà del '90.
- l'esecuzione della campagna delle prove sperimentali avviata a partire dalla seconda metà del '90 e fine del '91.

La seconda fase di attività è attualmente in corso di pianificazione di massima, essendo subordinata ai risultati ottenuti nella prima fase.

Il Progetto EQHPP

Il progetto è finalizzato alla dimostrazione su scala industriale della fattibilità tecnica ed economica del ciclo dell'idrogeno attraverso la realizzazione delle seguenti fasi sintetiche:

- produzione di idrogeno utilizzando 100 MWe di una centrale idroelettrica situata in Quebec.
- stoccaggio in Canada e trasporto via mare in Europa.
- utilizzo in diversi settori in utenza.

La spesa complessiva prevista ammonta a 500 Mecu (circa 750 miliardi di lire) e vede la partecipazione di una trentina di organizzazioni industriali ed istituti di ricerca tra i più qualificati ed importanti, appartenenti a Canada, Germania, Francia, Italia, Spagna, Belgio, Svizzera e CCR della CCE di Ispra.

Il concetto è nato ai CCR di Ispra ed è stato giudicato conforme alle intenzioni del Parlamento Europeo. Il governo del Quebec e la CCE hanno nominato proprie mandatarie, rispettivamente, la società Hydro-Quebec e la fondazione Ludwig-Bolkow-Stiftung, per costituire il Joint Project Management. Il CCR di Ispra coordina le attività del Progetto, cui ora partecipano 22 organizzazioni europee ed 8 canadesi.

Le attività finora svolte sono state finanziate, in misura diversa, dalla CEE, dal

governo del Quebec e dalle industrie interessate.

Lavori avviati nel 1986 hanno già condotto alla conferma della fattibilità tecnico-economica del progetto.

E' ora in corso la terza fase che si concluderà con la stesura dei progetti esecutivi dei vari componenti del sistema. Infine, nel '93 inizierà la quarta fase, di durata prevista di 4 anni, che prevede la costruzione dei componenti e l'avvio delle operazioni del progetto pilota.

Il programma consiste nel produrre in Canada, nella Provincia del Quebec, una quantità significativa di idrogeno utilizzando 100 MWe messi a disposizione da una centrale idroelettrica locale a basso prezzo per alimentare un sistema di elettrolizzatori ad alta efficienza.

L'idrogeno viene successivamente liquefatto ed immagazzinato in contenitori "dewars" da 3000 mc alla pressione atmosferica. I recipienti di forma cilindrica verranno montati su "barges" predisposte per essere caricate su una nave a sua volta progettata ad hoc, che ne può trasportare 5 per viaggio ad Amburgo, dove si prevede di utilizzare l'idrogeno in numerose applicazioni energetiche. Sono previsti 17 viaggi all'anno.

I contenitori sono progettati per mantenere l'idrogeno liquido per 50 giorni, senza che si renda necessario alcun discarico di gas; questi recipienti possono quindi anche costituire stoccaggio, sia in Quebec, che in Germania.

I risultati già noti, relativi alla conclusione della prima fase, mostrano che l'idrogeno trasportato in Europa corrisponde a 74 MW termici, ed il costo dell'unità di energia termica, prima dell'uso finale, è stato stimato approssimativamente intorno ai 16/100 di ecu per kWh.

Il progetto, tra i numerosi tipi di utenze che intende sperimentare, pone l'attenzione in particolare modo sul trasporto urbano e sul trasporto aereo, ritenendo prioritari questi settori, da un lato per la riduzione della inquinazione ambientale e dall'altro per l'eliminazione della pericolosa causa generale di inquinamento in alta quota.

Per quanto riguarda la autotrazione, alcune industrie ed enti che hanno programmi propri nel campo, sviluppano competenze anche nell'ambito del progetto EQHPP, mediante appositi contratti. Tra questi, anche la Daimler Benz e la BMW.

Il Progetto Concettuale SHEE-TREE

Esiste infine una iniziativa privata per tentare di coagulare risorse internazionali su un progetto grandioso ed ambizioso di lungo periodo, denominato SHEE-TREE Project (Solar Hydrogen & Electrical Energy - Trans European Enterprise).

Il progetto è sostenuto dal Circle Mon-

dial du Consensus (CMDC), che è un'organizzazione culturale internazionale privata fondata nel 1983 ed avente sede a Zurigo. Finora l'iniziativa è riuscita a produrre un voluminoso studio di fattibilità del progetto su commissione del governo cantonale di Berna. Lo studio è stato presentato al simposio internazionale sull'idrogeno solare che si è tenuto nel novembre 1990 a Zurigo.

Vale la pena di citare questo progetto per l'ampiezza utopica della prospettiva che tuttavia assume un preciso valore di stimolo culturale per operare in questo settore. Si tratta di un progetto per produrre nel Sahara mediante il solare fotovoltaico e termodinamico tutta l'elettricità necessaria a produrre nelle vicinanze degli impianti solari idrogeno in quantità pari all'intero fabbisogno energetico europeo. L'idrogeno prodotto dovrebbe essere convogliato alle utenze utilizzando la rete già esistente di gasdotti e trasportandolo sotto forma liquida mediante navi cisterna verso i terminali del nord Europa.

Lo studio di fattibilità ha il pregio di aver esaminato in dettaglio tutto il "lay out" del progetto ed aver tentato una valutazione quantitativa in base alla quale l'idea sembra realizzabile sia sul piano tecnico, che su quello economico. Ad esempio, il territorio del Sahara che sarebbe necessario per produrre con l'odierna efficienza dei sistemi tutta l'energia corrispondente al fabbisogno tedesco (260 tce/anno) ammonterebbe soltanto a 28000 kmq, pari all'1,03% dell'intero Sahara.

IL PROGETTO IDROGENO FOTOVOLTAICO DELL'ENEA

Motivazioni

La proposta di avviare il Progetto per la produzione dell'idrogeno utilizzando l'energia solare fotovoltaica, oltre alle ovvie motivazioni di carattere strategico relative alla necessità di aumentare l'indipendenza e l'autonomia energetica nazionale e quelle di natura economica collegate alla riduzione della fattura energetica, si basa anche sulle seguenti ragioni:

a) In una prospettiva di lungo periodo, la sostituzione degli idrocarburi fossili nei usi energetici con l'idrogeno appare oggi, come l'unica soluzione definitiva perseguibile su scala mondiale per controllare il processo di inquinazione ambientale derivante dalla crescita della concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica, degli ossidi di azoto e di zolfo e del metano (riduzione dell'effetto serra e delle piogge acide).

b) La produzione dell'idrogeno permette di superare la limitazione degli impianti fotovoltaici dovuta alla scarsità

della fonte solare. Infatti l'accumulo dell'idrogeno prodotto durante le ore di insoolazione ed il suo utilizzo in celle a combustibile e/o in gruppi elettrogeni integrati nel sistema consente l'erogazione continua di energia elettrica durante tutto l'arco della giornata.

c) La completa modularità dell'intero sistema permette un adattamento ottimale rispetto al carico e un notevole risparmio nelle linee di distribuzione potendo gli impianti essere decentrati vicino alle utenze.

d) La natura fortemente interdisciplinare delle competenze necessarie per portare avanti il progetto, l'entità notevole delle risorse critiche per avere garanzia di risultati, la connessione stretta con gli aspetti di sviluppo industriale, il periodo temporale ampio (circa 20 anni, lungo il quale si distendono le attività), sono tutti elementi che favoriscono il collocamento della gestione presso l'ENEA, stante la comprovata esperienza di gestione di progetti complessi e di lunga durata (Fusione Fotovoltaico Eolico, ecc.).

Descrizione

Il Progetto consiste in un complesso di azioni di ricerca e sviluppo condotte in collaborazione con l'industria, tendenti alla realizzazione di alcuni impianti e prototipi di dimostrazione e di ricerca e alla esecuzione di un programma di sperimentazione sui componenti degli impianti, sulle logiche di sistema e sulla sua architettura, al fine di ottimizzarne il funzionamento in accordo con le modalità e gli obiettivi della strategia dell'intervento.

Lo schema a blocchi del Progetto è rappresentato sinteticamente nella figura 3.

Il Progetto si articola su due linee:

- ciclo di produzione e d'uso dell'idrogeno fotovoltaico per la generazione non discontinua di elettricità da fonte solare.

- ciclo di produzione dell'idrogeno da fonti rinnovabili e suo utilizzo nel settore dei trasporti come combustibile alternativo pulito.

Il programma di attività comprende anche alcune azioni che interessano entrambe le linee, come gli studi di fattibilità, le valutazioni economiche e lo sviluppo della tecnologia e dei componenti.

Il tipico impianto dimostrativo per la produzione di idrogeno solare ha le dimensioni e le caratteristiche di un vero e proprio prototipo di interesse industriale. Esso ha lo scopo di produrre idrogeno utilizzando l'energia solare fotovoltaica, di immagazzinare l'idrogeno prodotto utilizzando la tecnica di maggior sicurezza e di riconvertire tale idrogeno in elettricità mediante l'uso

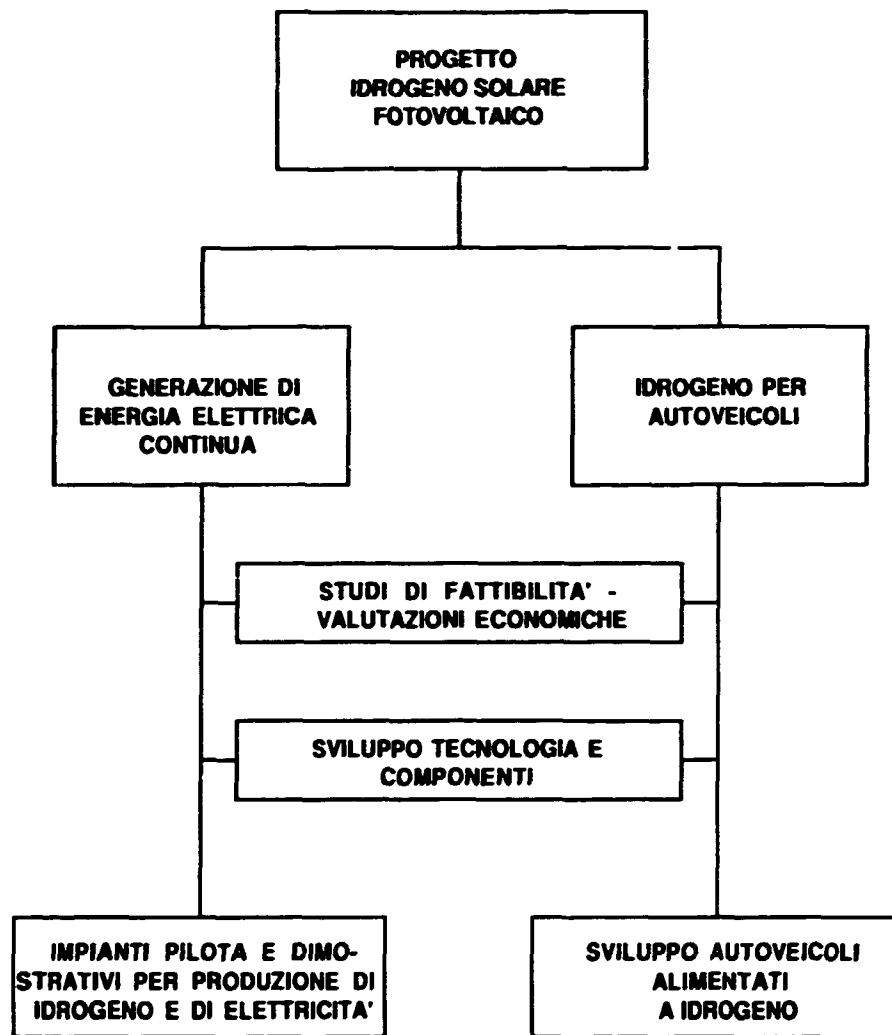


Figura 3 - Schema logico a blocchi del Progetto

delle diverse opzioni possibili (combustione convenzionale e catalitica e celle a combustibile). L'impianto è composto da un campo fotovoltaico modulare da 100 kW, che alimenta, attraverso un'interfaccia di condizionamento della potenza, un apparecchio industriale per l'elettrolisi dell'acqua. L'idrogeno prodotto viene immagazzinato in serbatoi in pressione e/o liquefatto e utilizzato successivamente come combustibile per produrre energia elettrica in modo continuo.

Gli impianti di ricerca hanno dimensioni ridotte in modo da consentire il miglior adattamento alle condizioni di laboratorio per lo studio del processo e di parte di esso ed al fine di mettere a punto tutte le varianti migliorative, che, introdotte nell'impianto dimostrativo dopo una loro rielaborazione industriale, ne permettano l'ottimizzazione sotto gli aspetti della funzionalità, dell'affidabilità, della economicità e della sicurezza. Questi impianti satelliti possono avere, in generale, collocazioni spaziali in siti differenti fra loro e diversi dal sito dell'impianto dimostrativo principale.

Per quanto riguarda la linea dell'autotrazione, è prevista la realizzazione di una

flotta campione di autoveicoli prototipali con motore a scoppio modificato per l'alimentazione ad idrogeno ed una successiva campagna sperimentale per la valutazione delle prestazioni sul campo.

Gli obiettivi del Progetto

L'obiettivo finale del Progetto consiste nella dimostrazione sperimentale della adeguatezza tecnica e della sicurezza delle centrali fotovoltaiche con accumulo ad idrogeno e della possibilità di conseguire la competitività economica del costo dell'idrogeno prodotto, sia nelle applicazioni per la generazione di elettricità, sia per l'uso nel settore degli autotrasporti.

Il conseguimento dell'obiettivo finale prevede il passaggio attraverso i seguenti obiettivi intermedi da realizzare nel breve e medio termine:

- 1) Dimostrare sperimentalmente su scala pilota la fattibilità tecnico-economica del processo di produzione di energia elettrica mediante l'utilizzo dell'idrogeno fotovoltaico.
- 2) Accertare lo stato dell'arte delle tecnologie implicate con particolare riferi-

mento alla situazione dell'industria italiana.

3) Individuare attraverso la sperimentazione e l'analisi di sensibilità applicata ai costi delle parti del sistema, le problematiche e le fasi del processo necessarie allo sviluppo e/o gli eventuali "break through" tecnologici indispensabili al raggiungimento dell'obiettivo finale con particolare riguardo agli aspetti di sicurezza.

4) Identificare i segmenti di mercato delle applicazioni energetiche, che offrono prospettive di penetrazione in relazione agli alti costi dell'unità di energia convenzionale oggi usata e/o agli alti costi ambientali indotti (mercato intermedio es. elettricità nelle zone isolate, trasporto nei centri urbani).

5) Fornire gli elementi quantitativi tecnici ed economici da porre a base della pianificazione della successiva fase del Progetto tendente al conseguimento dell'obiettivo finale.

L'obiettivo industriale

Accanto agli obiettivi tecnici sopra elencati, il Progetto si prefigge anche di realizzare il seguente obiettivo industriale in relazione alle notevoli prospettive sia del mercato energetico interno, che di quello internazionale:

- Mettere a punto un prodotto commerciale da inserire in catalogo, costituito da un insieme di componenti, sottosistemi e logiche di funzionamento per impianti fotovoltaici con accumulo di idrogeno, che in blocco (Fig. 4) realizza la seguente funzione:

- Energia solare in entrata/idrogeno e/c energia elettrica in uscita con garanzia di continuità di erogazione e di economicità d'uso.

Il sistema è composto da:

- Campo fotovoltaico
- Elettrolizzatore
- Serbatoi dell'idrogeno e dell'ossigeno
- Cella a combustibile
- Inverter elettronico
- Gruppo elettrogeneratore di riserva alimentato ad idrogeno
- Serbatoio acqua deionizzata
- Sistema di recupero dell'acqua di combustione.

Linee di strategia e d'azione del Progetto

Gli obiettivi strategici di riferimento del progetto sono:

- consentire una maggiore penetrazione del fotovoltaico (e in generale delle fonti rinnovabili di tipo discontinuo) nel mercato dell'energia a mezzo dell'accumulo di energia sotto forma di idrogeno elettrolitico.
- ridurre le emissioni inquinanti che de-

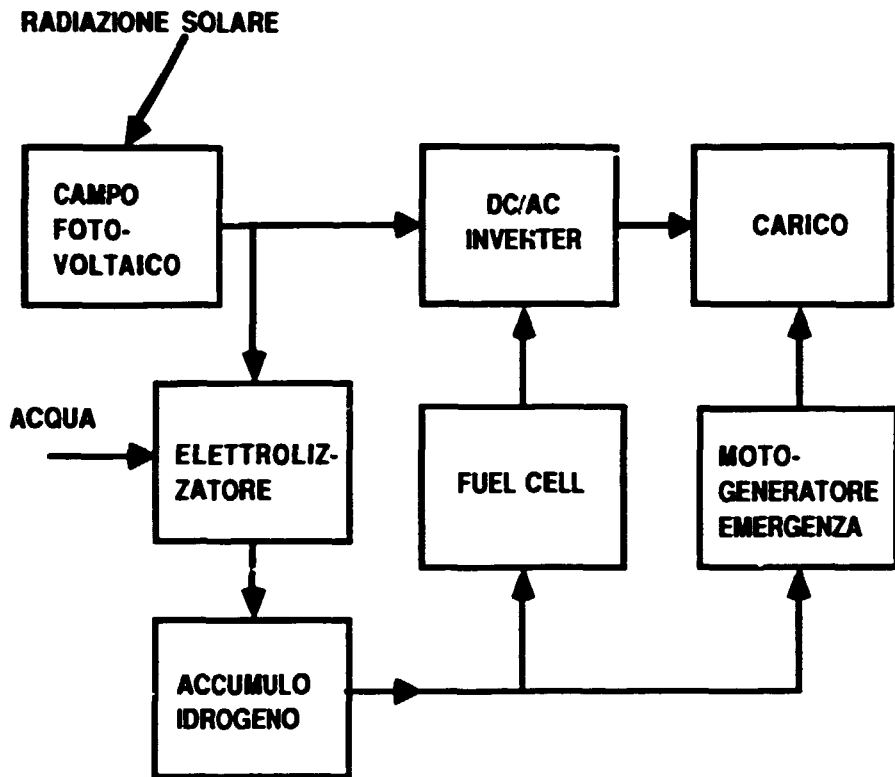


Figura 4 - Centrale elettrica autonoma ad idrogeno fotovoltaico

rivano dalla combustione dei combustibili fossili sostituendoli con un combustibile (idrogeno da fotovoltaico) non inquinante inesauribile distribuito sulla Terra non criticamente e disponibile in quantità praticamente illimitata.

- consentire un maggior utilizzo delle fonti nazionali riducendo la dipendenza energetica dall'estero

Il Progetto si sviluppa secondo le seguenti linee di intervento

1) Puntare alla sostituzione graduale dei combustibili fossili a partire dalle applicazioni energetiche per il mercato intermedio

2) Sviluppare prioritariamente i prodotti sostitutivi concentrando gli sforzi su quelli che permettono via via la penetrazione nel segmento di mercato accessibile più vicino

3) Ampliare gradualmente la quota occupata dal mercato dell'energia mediante la messa a punto di sistemi per la produzione ed il consumo dell'idrogeno a costi decrescenti fino alla competitività completa del kWh

4) Portare la tecnologia dell'idrogeno fotovoltaico fino alle condizioni tecnico-economiche adeguate a rendere disponibile per il Paese una opzione che consenta in tempi lunghi la sostituzione dei idrocarburi fossili

Tempi

Le crisi energetica ed ambientale non hanno ancora dimensioni tali da imporre

drastiche misure immediate. Tuttavia poiché la necessità di ricerca e sviluppo e la diffusione delle applicazioni sono argomenti che richiedono tempi lunghi, si ritiene opportuno impostare fin da adesso un deciso programma di attività. L'obiettivo finale dipende dai conseguimenti degli obiettivi intermedi tra i quali spicca quello della competitività del costo del fotovoltaico. Questo obiettivo si colloca nella prima decina degli anni 2000. Quindi il conseguimento dell'obiettivo strategico del Progetto idrogeno dovrebbe collocarsi necessariamente nella seconda decade dei 2000. Gli obiettivi intermedi descritti hanno scadenze più ravvicinate e distribuite nel tempo tra la partenza del Progetto e la fine degli anni 90.

RISULTATI PREVISTI A MEDIO TERMINE

Condizione essenziale per il successo del Progetto è costituita dalla forte riduzione del costo dell'energia fotovoltaica fino al livello di competitività con il costo dell'energia primaria dei combustibili fossili.

Tutte le stime tecniche e le proiezioni dei costi del fotovoltaico concordano nel prevedere nel lungo periodo il conseguimento della competitività del kWh in riferimento al settore della produzione di energia secondaria come quello elettrico. Infatti l'estrapolazione delle attuali tendenze di sviluppo del mercato e della tecnologia dei materiali e delle celle fotovoltaiche consente di fissare un traguardo di costo situato intorno alle attuali 100 L/kWh.

La contabilizzazione dei benefici ambientali indotti rispetto ai combustibili fossili o ciò che è lo stesso la quantificazione del danno socio-ambientale provocato da questi, consente agevolmente di recuperare la differenza di costo nei confronti dell'energia primaria. Si può in modo conservativo dimostrare il recupero di un fattore circa 3, con il quale il costo stimato dovrebbe attestarsi intorno alle 30 L/kWh.

Tale valore del costo è ritenuto sufficiente per ottenere la competitività in molti settori d'uso dell'energia secondaria (elettrica e/o meccanica) generata con l'idrogeno prodotto per elettrolisi e accumulato dagli impianti fotovoltaici.

LE COMPETENZE ENEA

Le attività di ricerca e sviluppo nel settore dell'idrogeno fotovoltaico sono iniziate alla Casaccia alla fine del 1990. Inizialmente è stata svolta una ricognizione della tecnologia e delle principali problematiche scientifiche e tecnologiche della produzione, accumulo ed utilizzo di idrogeno fotovoltaico, contribuendo alla definizione degli obiettivi e delle competenze scientifiche da impegnare e realizzare presso l'ENEA. Le attività si sono quindi concentrate sulle seguenti linee di attività:

- sviluppo dei processi sia dal punto di vista modellistico sia per quanto riguarda lo studio e sperimentazione di componenti di impianti in particolare di tipo elettrochimico.

- ingegneria sperimentale rivolta alla realizzazione e sperimentazione di impianti pilota e allo sviluppo di dispositivi di utilizzo sull'idrogeno.

Successivamente verranno rafforzate e coinvolte nello sviluppo di elettrolizzatori e celle a combustibile alimentate ad idrogeno le competenze di tecnologie elettrochimiche già formate ed attualmente impegnate nello sviluppo di celle alimentate a gas naturale.

Attività di sviluppo processi

Le attività di ricerca e sviluppo sul processo dell'idrogeno fotovoltaico sono attualmente concentrate sulla realizzazione di un impianto (CIF Ciclo dell'Idrogeno Fotovoltaico) di piccola potenza (2,5 kWp) per la produzione, accumulo e consumo di idrogeno prodotto mediante un campo fotovoltaico, già presente presso l'area della Casaccia.

L'impianto utilizzerà l'energia solare convertita dal campo fotovoltaico per alimentare un elettrolizzatore bipolare alcalino prodotto commercialmente. L'idrogeno accumulato in serbatoi contenenti idruri metallici verrà quindi erogato per alimentare una cella a combustibile ad elettrolita polimerico. Le infrastrut-

ture saranno comunque in grado di ospitare altri elettrolizzatori ed accumulo gassoso in pressione.

Sono già state approvvisionate tutte le apparecchiature principali (elettrolizzatore accumulatore di idruri metallici, cella a combustibile ad elettrolita polimerico) costituenti l'impianto. E' in corso infine la prassi autorizzativa verso le autorità competenti per la realizzazione ed esercizio dell'impianto nel pieno rispetto delle norme di sicurezza.

Attività di ingegneria sperimentale impiantistica

Le attività nel settore dell'Ingegneria Sperimentale degli impianti ad idrogeno vengono attualmente svolte secondo due linee principali:

- studi preliminari di fattibilità e metodologie per il dimensionamento di impianti per la produzione di idrogeno;

- approfondimento delle problematiche legate all'introduzione dell'idrogeno come combustibile per l'autotrazione e modifica di un veicolo commerciale per trasporto urbano al fine di renderlo compatibile con l'alimentazione con idrogeno.

Per quel che attiene alla prima linea di attività, è già stato considerato il caso di un impianto fotovoltaico isolato da 100 kW determinando la taglia ottimale degli altri componenti (elettrolizzatore sistema di accumulo dell'idrogeno e cella a combustibile). Tale attività è prepedica a quella relativa alla realizzazione dell'impianto pilota da 100 kW.

In prospettiva, infatti, tale attività evolverà verso la definizione dettagliata dell'impianto prendendo in considerazione anche diverse forme di accumulo a breve ed a lungo termine, e valutando in particolare cicli avanzati di liquefazione dell'idrogeno ed i problemi correlati alla purezza del gas da liquefare.

Circa la seconda attività è stata condotta un'ampia indagine sullo stato dell'arte in campo internazionale, che ha evidenziato il prevalere di diverse linee di tendenza, sia per la soluzione dei problemi di alimentazione, sia per quelli di stoccaggio a bordo dell'idrogeno. A seguito di questa indagine, per la trasformazione all'alimentazione a idrogeno di un veicolo commerciale sono state considerate due alternative: l'iniezione diretta interna alla camera di combustione, o quella indiretta temporizzata esterna, per lo stoccaggio dell'idrogeno sembrano prevalere due strade: l'idrogeno liquido o quello gassoso in pressione, con serbatoi in materiali composti. L'analisi del costo finale di trasporto per l'utente, tenendo conto dei diversi pesi e ingombri delle due soluzioni di stoccaggio, ha poi portato alla determinazione dei campi di economicità in funzione dell'autonomia

richiesta al veicolo. Individuato un settore di convenienza per questa tecnologia nel trasporto urbano si è così arrivati a definire il progetto di massima del veicolo ed i principali problemi relativi.

Utilizzando quindi anche risorse esterne (Università e industrie) verrà coordinata in Casaccia la progettazione e la realizzazione di un prototipo, che incorporerà un sistema di iniezione indiretta temporizzata, da svilupparsi con competenze interne a questo fine verrà realizzato presso i laboratori ENEA un apposito banco di prova iniettori. Sarà anche effettuata in Casaccia un'attività di acquisizione dati, al banco ed a bordo del veicolo per permettere la messa a punto ed avere il necessario ritorno di conoscenze.

Sono in corso contatti con il Centro Superiore Ricerche del Ministero dei Trasporti per l'analisi comparata degli inquinanti e l'autorizzazione alla circolazione del veicolo.

Attività sulle tecnologie elettrochimiche

Le attività nel settore delle Tecnologie Elettrochimiche sono incentrate sullo sviluppo delle celle a combustibile per la produzione di energia elettrica.

Le attività riguardano:

- tecnologie elettrochimiche dedicate alla caratterizzazione ed alla ottimizzazione dei materiali funzionali per sistemi elettrochimici. In particolare sono state sviluppate alcune tecniche di misura, sia in corrente continua (voltammetria ciclica, curve di Tafel, ciclaggio galvanostatico), sia in corrente alternata (spettroscopia di impedenza elettrochimica).

- tecnologia di fabbricazione di precursori e polveri di ossidi ceramici mediante la tecnica dello "spray dryer" per materiali da impiegare come elettrodi catalitici per celle a combustibile. Le stesse tipologie di materiali potranno essere utilizzate per realizzare, con opportune tecniche strati catalitici attivi, sugli ossidi per la evoluzione di ossigeno sugli elettrolizzatori alcalini.

- tecnologie di caratterizzazione dei materiali per componenti funzionali attivi (elettrodi, matrici elettrolitiche) e passive. In particolare le competenze riguardano la chimica analitica strumentale (assorbimento atomico, spettrofotometria gascromatografia termogravimetrica, analisi termica differenziale), la microscopia (ottica ed elettronica con microanalisi), la caratterizzazione chimico-fisica delle superfici (area superficiale, porosità, distribuzione volumetrica dei pori).

In collaborazione con l'industria ed altri Enti verranno sviluppati:

- celle a combustibile alimentate con idrogeno puro, del tipo a membrane po-

limeriche (SPEFC) ed alcaline (AFC). Tali celle consentono un uso dell'idrogeno come combustibile con elevato rendimento.

- elettrolizzatori con caratteristiche adatte all'accoppiamento con sistemi fotovoltaici. Nello sviluppo della tecnologia si punterà ad ottenere elevate efficienze di voltaggio a forti densità di corrente, massima resistenza alla corrosione degli elettrodi durante le ore di arresto notturno del funzionamento, bassa permeabilità dei resti porosi alla metadiffusione dei gas analitici e catodici.

- elettrolizzatori invertibili, si tratta di sistemi elettrochimici che potendo invertire il processo elettromotore sono in grado di funzionare sia come cella a combustibile che come elettrolizzatori per la produzione di idrogeno.

LE COLLABORAZIONI

Collegamenti con l'industria e l'università

Le attività descritte verranno eseguite in modo concertato, sia presso i laboratori ENEA, sia presso università e industrie nazionali, sfruttando e valorizzando le competenze già esistenti, anche con lo scopo di facilitare e ottimizzare il trasferimento delle conoscenze acquisite dal livello di laboratorio a quello della produzione industriale. Dato, poi, il carattere multidisciplinare del progetto, la sua valenza strategica e l'ampio arco temporale in cui si collocano gli obiettivi finali, sono previste anche collaborazioni con organizzazioni impegnate sulle stesse tematiche.

Per quanto riguarda le università, è prevista una collaborazione con l'Università di Pisa sulla trasformazione di veicoli per trasporto urbano alla alimentazione ad idrogeno. Presso la facoltà di Ingegneria di questo ateneo, infatti, sono in corso già da alcuni anni esperienze relative al comportamento di motori a combustione interna quando alimentati da idrogeno gassoso, sia relativamente alle prestazioni, sia agli aspetti di sicurezza. Inoltre, è allo studio una collaborazione avente l'obiettivo di sviluppare prototipi di serbatoi per idrogeno ad alta pressione (300-400 bar contro i 200 dei serbatoi oggi disponibili commercialmente). Il raggiungimento di questo risultato consentirebbe di ridurre in maniera drastica il peso e/o l'ingombro dovuto alla presenza dei serbatoi a bordo dei veicoli, con benefici sensibili in termini di autonomia e di prestazioni dei veicoli stessi.

Il coinvolgimento di società e industrie nazionali è in fase di definizione.

Il criterio guida per l'individuazione dei partner è quello di sfruttare le sinergie riscontrate tra i programmi dell'ENEA e le competenze esistenti presso le diver-

se industrie impegnate su tecnologie affini o contigue a quelle relative a produzione, accumulo e uso dell'idrogeno.

In tale prospettiva è già in corso di definizione un programma comune tra l'ENEA e le industrie del settore. Tale programma dovrebbe condurre in una prima fase alla ottimizzazione degli elettrolizzatori disponibili industrialmente in termini di rendimento energetico e di vita media. La fase successiva del programma prevederà lo sviluppo ex novo di un elettrolizzatore concepito per essere alimentato direttamente da un campo fotovoltaico e per produrre idrogeno di qualità adeguata agli usi previsti.

Sono in corso contatti con l'industria motoristica specializzata nella progettazione e costruzione di motori a combustione interna, con lo scopo di elaborare un programma comune per la costruzione di una flotta di autoveicoli a combustione interna alimentati a idrogeno. Scopo della collaborazione è innanzitutto dimostrare la fattibilità tecnica della auto-trazione a idrogeno in special modo utilizzando veicoli di media taglia destinati al trasporto pubblico. La prima fase di questa attività dovrebbe condurre alla già citata modifica di un veicolo commerciale, adattandolo alla alimentazione con idrogeno. Successivamente, si passerà alla progettazione di un veicolo ottimizzato per l'alimentazione a idrogeno, la cui struttura tenga conto dei problemi di stoccaggio a bordo dell'idrogeno e della sicurezza durante il trasporto. La costituzione e l'esercizio della flotta di autoveicoli avrà come obiettivo finale la valutazione dei limiti tecnici ed economici derivanti dall'uso di veicoli ad idrogeno, tenendo conto dei grandi benefici ambientali dovuti all'impiego di questo combustibile pulito.

La realizzazione dell'impianto pilota da 100 kW coinvolgerà per diversi aspetti di competenza, varie industrie. L'impianto, infatti, si configurerà come una vera e propria stazione sperimentale di prova, nella quale verranno provati componenti, architetture di sistema e logiche di gestione. Pertanto, si prevede una collaborazione con le industrie italiane che operano nel settore dei componenti e dei sistemi fotovoltaici.

Collegamenti internazionali

In questa fase di pianificazione e di avvio delle attività è stata effettuata una rassegna dei programmi similari in svolgimento in altri stati, soprattutto in Germania, paese ove è in corso un grosso sforzo per valutare la fattibilità tecnica ed economica dell'idrogeno fotovoltaico. I contatti avviati hanno condotto alla disponibilità di massima di varie organizzazioni - e in particolar modo le già descritte EuroQuebec e SWB - a indivi-

duare temi specifici su cui instaurare collaborazioni tecniche. Attualmente, sono allo studio meccanismi che coinvolgono l'ENEA nel progetto EuroQuebec: oggetti della collaborazione potrebbero essere l'ottimizzazione del ciclo di liquefazione dell'idrogeno e la progettazione di opportuni contenitori, nonché la realizzazione di celle a combustibile funzionanti a idrogeno puro.

PROSPETTIVE L' MERCATO

L'idrogeno è oggi uno degli elementi chimici più trattati: esso viene prodotto usando diverse tecniche e usato per lo più per la preparazione di composti per usi chimici. Si può ragionevolmente affermare, quindi, che oggi non esiste un mercato dell'idrogeno visto come combustibile. A causa delle motivazioni esposte, sul sempre più pressante problema ambientale e sulla conseguente diffusione delle fonti rinnovabili, è prevedibile a medio termine che l'idrogeno tenda progressivamente ad entrare in diversi settori del mercato energetico. A più lungo termine, poi, è prevedibile che, da una parte per lo sviluppo della tecnologia di produzione e la riduzione dei costi, dall'altra parte per i decisivi vantaggi ambientali, l'idrogeno si porrà come candidato per la sostituzione graduale degli idrocarburi fossili in tutte le loro applicazioni, sia come combustibile, sia come vettore energetico.

Breve termine: produzione di energia elettrica

A breve termine, l'obiettivo di mercato consiste nell'occupazione del segmento delle applicazioni costituite dall'uso dell'idrogeno come sistema di accumulo per impianti isolati a energie rinnovabili. Il conseguimento di tale obiettivo favorirà la diffusione delle fonti rinnovabili e, in particolare del fotovoltaico - soprattutto in quelle condizioni in cui il costo dell'energia da fonti convenzionali risulta particolarmente elevato e i vincoli ambientali maggiormente sentiti. E' questo il caso delle località isolate, dove l'energia elettrica presenta, già oggi, un costo molto più grande di quello riscontrabile per le utenze collegate alla rete nazionale. Per esempio, sulle isole minori italiane il costo di produzione dell'energia elettrica arriva ad essere anche quattro volte maggiore di quello del continente e, quindi, su tali isole si potrebbe sperimentare, in scala ridotta, l'efficacia del sistema energetico fotovoltaico-idrogeno. La dimostrazione tecnico-economica di queste applicazioni aprirebbe all'idrogeno un segmento di mercato già di per sé significativo per l'Italia, ma soprattutto molto più vasto per quei paesi della fascia ad alta insolazione (quali i paesi in via di sviluppo in genere e i paesi latino-americani in particolare).

non coperti da una rete elettrica e che potrebbero optare vantaggiosamente per un differente modello di elettrificazione.

Medio termine: trasporto urbano

Fra i diversi settori nei quali l'idrogeno potrebbe trovare impiego come combustibile primeggia quello del trasporto urbano. In questo caso, infatti, l'impatto ambientale derivante dall'uso dei combustibili fossili è amplificato dalla concentrazione di grandi masse di autoveicoli in spazi ridotti, densamente popolati, e spesso preziosi per il patrimonio civile e artistico che vi si ritrova. Tenendo conto dei costi sociali dovuti alla attuale struttura del sistema dei trasporti, il conseguimento di questo obiettivo di mercato è situabile in una prospettiva di medio periodo.

Lungo termine: mercato energetico

Infine, come si è già accennato, nel lungo periodo si colloca l'obiettivo finale - più ambizioso, e di cui, restano da verificare le possibilità tecniche ed economiche di conseguimento - che consiste nella sostituzione dell'attuale sistema energetico, basato essenzialmente sui combustibili fossili, con un nuovo sistema che faccia uso prevalente di fonti rinnovabili. Tali fonti, usate per produrre energia elettrica e idrogeno, hanno le potenzialità per garantire il totale soddisfacimento dei fabbisogni energetici nel pieno rispetto dei sempre più stringenti vincoli ambientali.

Bibliografia

1. D. COIANTE

La produzione fotovoltaica dell'idrogeno

Notiziario dell'ENEA "Energia e Innovazione", Novembre/Dicembre 1990, pp. 24-41.

2. J.M. OGDEN, R.H. WILLIAMS

Solar Hydrogen: Moving Beyond Fossil Fuels"

World Research Institute Report - October 1989

3. C.J. WINTER, J. NITSCH

Hydrogen as an Energy Carrier

Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York - 1988