

IMPIANTO SPERIMENTALE PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA FOTOVOLTAICA CON SISTEMA DI ACCUMULO AD IDROGENO

Domenico Casadei, Gabriele Grandi, Claudio Rossi, Mario Paolone

° Dipartimento di Ingegneria Elettrica - Università di Bologna
via Risorgimento, 2 40136 Bologna
claudio.rossi@unibo.it www.die.unibo.it

SOMMARIO

Si esamina un impianto di produzione ed accumulo di energia destinato al soddisfacimento integrale del fabbisogno energetico elettrico di un utenza residenziale. In questo impianto, la produzione primaria di energia elettrica avviene mediante conversione fotovoltaica. L'accumulo di energia avviene mediante produzione e stoccaggio di idrogeno elettrolitico. La produzione secondaria di energia elettrica avviene utilizzando un sistema di celle a combustibile. L'utenza è definita mediante diagrammi di carico relativi alla composizione media della famiglia italiana in funzione dell'area geografica di appartenenza. Lo strumento presentato in questo articolo consente simulare su base giornaliera, mensile ed annuale il comportamento energetico del sistema, consentendo quindi di valutare sotto il profilo energetico la fattibilità di questa tipologia di impianti. Il sistema proposto è stato realizzato come prototipo presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Bologna. L'installazione prototipale fa parte del laboratorio ERG finanziato dalla Regione Emilia Romagna per lo studio dei sistemi e delle tecnologie energetiche innovative.

1. INTRODUZIONE

La produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile (eolica o solare) è caratterizzata da una disponibilità energetica variabile e non prevedibile nel tempo. Le fonti rinnovabili, inoltre, sono spesso localizzate in luoghi distanti dagli utenti finali. Queste caratteristiche intrinseche delle fonti rinnovabili ne limiteranno l'espansione anche quando i costi di produzione dell'energia rinnovabile saranno competitivi con i costi dell'energia prodotta da fonti tradizionali.

L'energia rinnovabile può essere convenientemente impiegata come fonte primaria per la produzione di idrogeno mediante elettrolisi. L'idrogeno prodotto costituirebbe un mezzo per accumulare energia nei momenti e nei luoghi in cui

si ha un esubero di produzione, e successivamente utilizzato come combustibile per produrre energia elettrica nei momenti o nei luoghi in cui si verifichi un picco della domanda o si abbia scarsità dell'offerta. In questo modo il vettore energetico idrogeno consentirebbe di sfruttare appieno il potenziale energetico ambientale, che altrimenti andrebbe perduto.

Tra tutti i processi impiegabili per la produzione di idrogeno, l'elettrolisi dell'acqua è l'unico processo che evita emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera e che, combinato allo sfruttamento di energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili, ne garantisce la produzione ad "emissione zero".

Esistono tuttavia due concezioni sul modo di produrre il vettore energetico idrogeno.

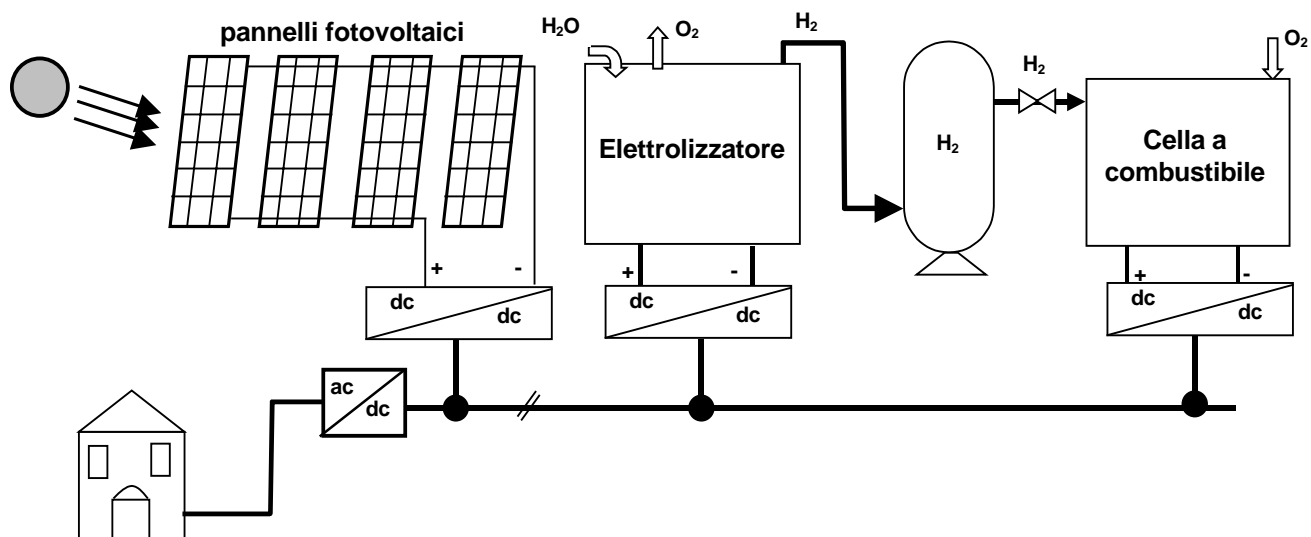


Fig. 1 Schema di impianto combinato fotovoltaico - idrogeno per la produzione e l'accumulo di energia.

La prima ipotesi prevede la realizzazione di grandi impianti, localizzati in aree dove l'energia da fonti rinnovabili è più abbondante e può essere più convenientemente sfruttata; da qui l'idrogeno prodotto può essere veicolato fino al punto di utilizzo finale. La seconda prevede la distribuzione sul territorio di piccole unità di generazione che, sfruttando il potenziale energetico ambientale presente localmente, producano idrogeno il più vicino possibile al punto d'uso finale. Entrambe le soluzioni presentano impatto ambientale nullo, ma hanno caratteristiche tecnologiche, prestazioni, problematiche di realizzazione e di gestione completamente differenti.

Con riferimento alla seconda tipologia di impianto, in questo articolo saranno presentati i risultati ottenuti con un sistema di simulazione realizzato allo scopo. L'impianto esaminato è costituito da un sistema di produzione primaria di energia elettrica mediante pannelli fotovoltaici, da un elettrolizzatore per la produzione di idrogeno, da un serbatoio a bassa pressione per lo stoccaggio dell'idrogeno prodotto, da una cella a combustibile per la produzione secondaria di energia elettrica, e dai necessari sistemi elettronici e di interfacciamento [1]- [2].

Presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Bologna è stata installata una stazione sperimentale contenente tutti i sottosistemi di conversione in scala ridotta. Con questo sistema sperimentale è possibile studiare le problematiche connesse sia con gli aspetti tecnologici, sia con le tecniche di gestione dell'impianto. I dati relativi al bilancio energetico, dell'impianto sperimentale, potranno essere poi utilizzati per validare i risultati del modello descritto nel capitolo seguente.

2. DESCRIZIONE IMPIANTO

L'impianto che si intende analizzare deve soddisfare il fabbisogno energetico elettrico di un complesso di unità residenziali, utilizzando esclusivamente, come sorgente primaria, l'energia solare.

A questo scopo il sistema di conversione tradizionale dell'energia fotovoltaica è combinato ad un più innovativo sistema di accumulo dell'energia basato su produzione, stoccaggio ed utilizzo dell'idrogeno.

Come rappresentato in Fig. 1, ciascun componente che realizza una conversione della forma di energia è collegato ad un dedicato convertitore statico. In questo modo, si controlla ciascun elemento nel modo ottimale e si rende disponibile un bus comune mediante il quale l'energia può essere scambiata tra i diversi componenti sotto forma di energia elettrica.

I pannelli fotovoltaici convertono parte del contenuto energetico della radiazione solare in energia elettrica. Il

processo è possibile per le proprietà fisiche dei materiali semiconduttori impiegati. Attualmente i semiconduttori impiegati per la realizzazione di pannelli fotovoltaici sono di tipo inorganico (silicio) ed ottenuti mediante processi industriali derivati dall'industria elettronica. Il materiale di base utilizzato per la realizzazione dei wafer in silicio è generalmente, un prodotto di scarto della stessa industria elettronica. Molte sono le tecnologie attualmente in uso per la realizzazione delle celle fotovoltaiche (monocristallino, policristallino, amorfo) e molte quelle in via di sviluppo (film sottile, materiali semiconduttori polimerici, fotovoltaico a concentrazione, ecc..). L'attività di ricerca e sviluppo in questo settore è mirata alla realizzazione di celle fotovoltaiche con efficienze sempre maggiori, e costi decrescenti. Un importante obiettivo della ricerca è quello di ridurre la dipendenza dell'industria fotovoltaica dall'industria del silicio e di ridurre la quantità di energia necessaria al processo di fabbricazione della cella.

Con le celle fotovoltaiche attualmente in commercio, l'efficienza della conversione energetica è intorno al 12-13%, ciò significa che in condizioni di irraggiamento, temperatura ed orientamento ottimale dei pannelli è possibile produrre al massimo circa 120 W di energia elettrica per ogni m² di superficie effettiva delle celle. I pannelli fotovoltaici forniscono una caratteristica d'uscita del tipo di quella mostrata in Fig. 2. Esiste una caratteristica per ciascun valore di irraggiamento e temperatura di funzionamento della cella. Al fine di estrarre dalla cella la massima potenza in ciascuna condizione di esercizio è indispensabile collegare il pannello ad un convertitore statico che imponga tensione o corrente ai capi del pannello corrispondenti al punto di massima potenza (MPPT: Maximum Power Point Tracking).

Le celle a combustibile costituiscono un sistema per la conversione elettrochimica dell'energia contenuta nel combustibile idrogeno con le quali sono alimentate.

Le celle a combustibile più idonee ad essere utilizzate nel sistema proposto sono le celle di tipo PEM (Proton Exchange

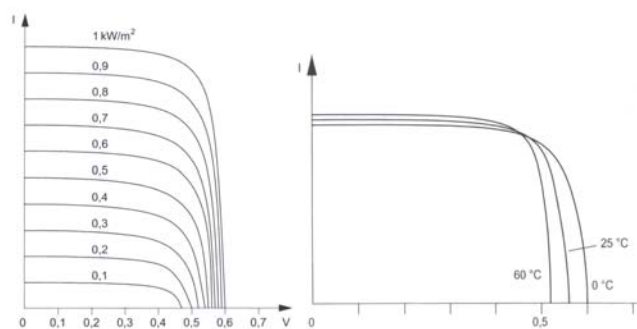


Fig. 2 Caratteristica d'uscita di una cella fotovoltaica in funzione dell'irraggiamento e della temperatura

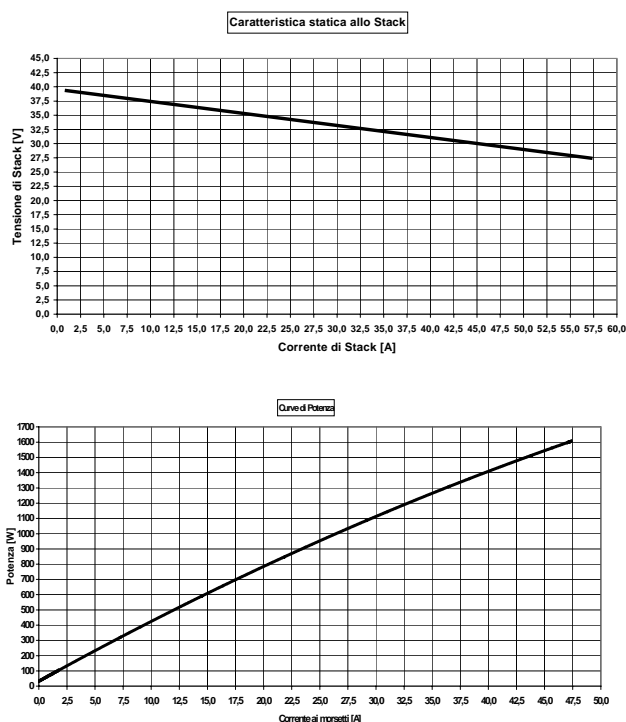


Fig. 3 Caratteristica d'uscita di una cella a combustibile di tipo PEM

Membrane). Questo per diversi fattori:

- Devono essere alimentate ad idrogeno purissimo (impurità di CO inferiori a 5 ppm). In questo impianto l'idrogeno è prodotto per elettrolisi dell'acqua, ed è quindi puro.
- Le celle PEM operano a temperatura relativamente bassa (<80°), hanno tempi di avviamento brevi (< 1 min.) e non presentano problemi alle variazioni di carico.
- La cella a combustibile presenta in uscita una caratteristica tipo quella mostrata in Fig. 3. Normalmente la tensione di uscita dallo stack di celle è bassa (< 100V). Per raggiungere potenze elevate diversi stack di celle devono essere collegati in parallelo.

La tecnologia delle celle a combustibile in questo momento non è sufficientemente matura da consentirne una commercializzazione per applicazioni sul campo. Notevoli sono i limiti della tecnologia per gli elevati costi di produzione e per la durata di vita troppo breve. Attualmente è possibile utilizzare questa tecnologia esclusivamente a fini di ricerca o dimostrativi. Nonostante la notevole attività di ricerca in corso a livello mondiale, non è programmata a medio termine alcuna massiccia immissione sul mercato di sistemi a celle a combustibile per applicazioni stazionarie o veicolari.

L'elettrolizzatore è un convertitore elettrochimico in grado di scindere la molecola dell'acqua nei suoi due componenti fondamentali: idrogeno ed ossigeno. L'idrogeno prodotto diventa quindi un vettore di energia che può quindi essere immagazzinato in forma gassosa o liquida. Attualmente solo una minima parte dell'idrogeno prodotto al mondo proviene da processi elettrolitici. Nonostante ciò, questa tecnologia è sufficientemente matura e diffusa. Esistono sul mercato sistemi di produzione elettrolitica dell'idrogeno di diverse taglie, dai pochi l/h alle centinaia di Nm³/h. Attualmente l'efficienza energetica degli elettrolizzatori è intorno al 60% (comprensiva dell'energia necessaria ad una pressurizzazione modesta (<5 bar). L'attività di ricerca in questo settore è volta ad ottenere efficienze più elevate mediante il miglioramento delle tecnologie membrane, elettrolita ed elettrodi.

3. MODELLO DEL SISTEMA

Il sistema di produzione, accumulo ed utilizzo dell'energia è stato interamente modellato, sotto il profilo energetico, in ambiente Simulink di Matlab [3]. Il principio di funzionamento del sistema modellato è il seguente.

I pannelli fotovoltaici sono collegati ad un convertitore dc/dc che è in grado di far funzionare il pannello stesso nel punto di massima potenza. In ogni istante, in uscita dal convertitore collegato ai pannelli fotovoltaici è disponibile una potenza che dipende unicamente dall'irraggiamento solare e dalle condizioni di esercizio dei pannelli (temperatura, orientamento). Questa potenza corrisponde al valore massimo che i pannelli fotovoltaici possono erogare in una data condizione. Il livello di potenza non è controllabile, e quindi tutta la potenza solare convertita è trasferita al bus elettrico comune.

In funzione della domanda di potenza sull'utenza, la cella a combustibile sarà controllata in modo da poter erogare la quota di potenza corrispondente alla differenza tra la potenza richiesta e la potenza prodotta dai pannelli fotovoltaici. Essendo la produzione fotovoltaica pari a zero, in assenza di irraggiamento solare, la cella a combustibile sarà dimensionata per poter alimentare l'intero carico. In ogni istante, qualora la potenza prodotta con i pannelli fotovoltaici superi la potenza richiesta del carico, l'eccesso di produzione è assorbita dall'elettrolizzatore e si va quindi a costituire la riserva di

energia, sotto forma di idrogeno .

3.1 Cella a combustibile ed elettrolizzatore

Attualmente le celle a combustibile presentano rendimenti soddisfacenti (40-45 %) solo a pieno carico. A carichi inferiori, il processo di combinazione elettrochimica all'interno della cella richiede portate di idrogeno in ingresso pressoché costanti indipendentemente dal carico. Al fine di conservare rendimenti soddisfacenti anche a bassi carichi è necessario prevedere sistemi di ricircolazione dell'idrogeno non utilizzato. Nel modello si farà comunque riferimento ad un'efficienza di conversione costante nella cella a combustibile, indipendentemente dal carico.

Nel primo caso di studio, l'elettrolizzatore è dimensionato per poter assorbire tutta la potenza corrispondente alla massima differenza tra valore massimo dell'energia fotovoltaica prodotta e valore minimo della potenza consumata dall'utenza.

In questo modo tutta l'energia fotovoltaica prodotta è utilizzata per alimentare i carichi o per alimentare l'elettrolizzatore e formare una riserva di idrogeno.

L'uscita dell'elettrolizzatore è collegata ad un serbatoio nel quale l'idrogeno è stoccato alla stessa pressione con il quale è prodotto nell'elettrolizzatore. L'efficienza di conversione dell'elettrolizzatore è comprensiva anche dell'energia per la sua pressurizzazione, non sono quindi associate perdite energetiche al processo di stoccaggio dell'energia. L'energia elettrica per l'alimentazione dell'elettrolizzatore è prelevata dal bus comune.

3.2 Utenza

Nei seguenti casi di studio si sono utilizzati diagrammi di carico ottenuti da uno studio DIE-CESI [4] relativo ad utenze domestiche localizzate in Italia. I diagrammi di carico possono essere determinati per ciascuna famiglia in basi a metodi statistici dipendenti dai seguenti dati: ubicazione della residenza, numero di persone residenti, dati sociali, numero di elettrodomestici presenti. I risultati di questo studio sono qui utilizzati in forma aggregata. Si è cioè creato un complesso residenziale costituito da 40 famiglie di caratteristiche diverse. A titolo di esempio in fig. 4a,b) si riportano gli andamenti

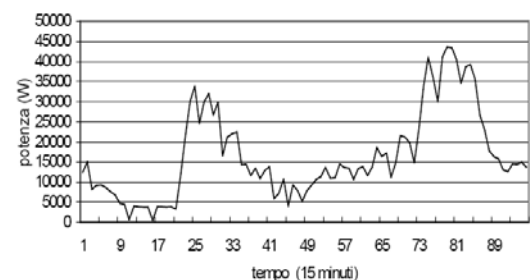


Fig.4a Carico elettrico per 40 famiglie residenti al Nord in un giorno feriale

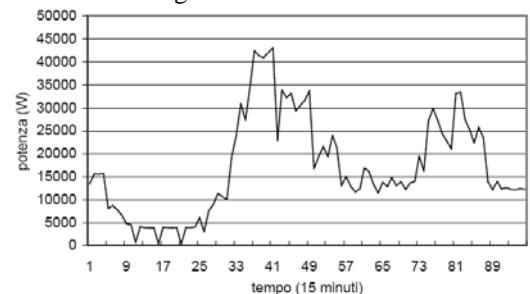


Fig. 4b Carico elettrico per 40 famiglie residenti al Sud in un giorno feriale

della curva di carico elettrico per due complessi residenziali costituiti da 40 unità abitative localizzati uno al Nord e l'altro al Sud Italia, in un giorno ferialo.

3.3 Il sistema fotovoltaico

Il modello del sistema fotovoltaico è in grado di calcolare l'irraggiamento in kWh/m² sulla superficie dei pannelli fotovoltaici in base ai dati geografici (localizzazione dell'impianto), geometrici (orientamento dei pannelli) e statistici (copertura nuvolosa, trasparenza dell'aria, ecc.).

Il modello utilizza il procedimento di calcolo fornito dalle norme UNI 8477 ed UNI 10349 per calcolare l'irraggiamento giornaliero medio mensile su una superficie comunque orientata in funzione delle coordinate geografiche e dei dati climatologici locali (copertura nuvolosa). Il metodo tiene conto inoltre dell'interazione della radiazione solare con l'atmosfera (assorbimento, riflessione, diffusione della radiazione solare).

Nota l'energia che colpisce la superficie su base giornaliera, il modello utilizza le curve di Liu-Jordan, per calcolare l'irraggiamento medio orario sulla superficie e quindi l'andamento orario della potenza media (radianza) che è catturata dal pannello.

Il modello utilizza un parametro, denominato 'indice di soleggiamento', che tiene conto della riduzione dell'irraggiamento per effetto della copertura nuvolosa. L'indice di soleggiamento K_t è un parametro che scaturisce dall'analisi sperimentale dei dati acquisiti sul territorio. L'indice di soleggiamento è inserito come valore medio mensile. Questo parametro può essere variato in modo da prevedere scostamenti positivi o negativi del soleggiamento rispetto al valore medio mensile. In Fig. 5a,b) è rappresentato, a titolo di esempio, l'andamento della radianza sui pannelli fotovoltaici in mesi diversi dell'anno.

Il modello consente quindi di determinare l'andamento dell'irraggiamento medio giornaliero durante il corso dell'anno (vedi Fig. 6) e quindi l'irraggiamento solare annuale sui pannelli fotovoltaici.

Noti i valori orari, giornaliero, mensile ed annuale dell'irraggiamento solare sui pannelli, per valutare la produzione energetica dei pannelli fotovoltaici è necessario conoscere il profilo della temperatura delle celle fotovoltaiche. In Fig. 7, ad esempio, è rappresentato l'effetto della temperatura delle celle sul rendimento di conversione di un pannello fotovoltaico.

Il modello prevede una stima del valore medio della temperatura nelle ore diurne delle celle fotovoltaiche. Questa

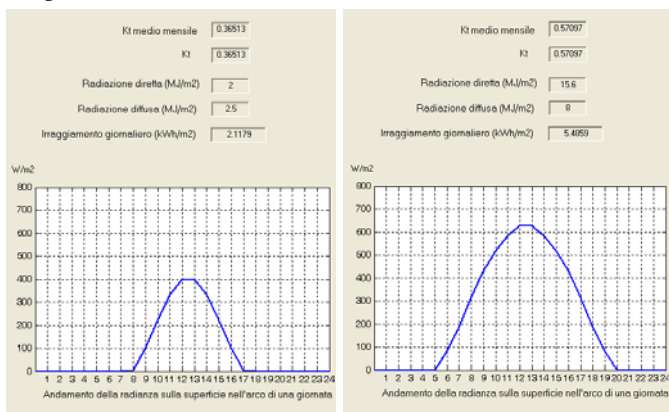


Fig. 5a,b) Andamento della radianza [W/m²] in funzione dell'ora solare a Bologna nei mesi di gennaio e giugno. Indice di soleggiamento pari alla media mensile $\Delta K_t=0$. Inclinazione pannelli $\beta=45^\circ$.

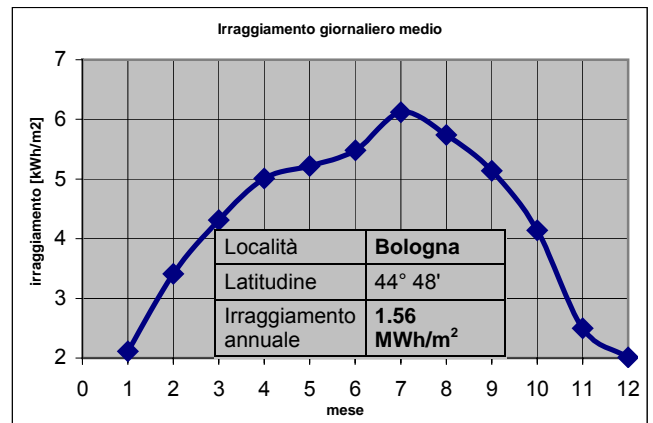


Fig. 6 Andamento dell'irraggiamento giornaliero medio [kWh/m²] nei diversi mesi dell'anno. Indice di soleggiamento pari alla media mensile $\Delta K_t=0$. Inclinazione pannelli $\beta=45^\circ$.

stima utilizza dati sperimentali, trattati statisticamente, relativi alle temperature medie nelle ore diurne in diverse località italiane. Nota la temperatura ambiente, la potenza incidente sul pannello, le sue caratteristiche fisiche e geometriche si calcola la temperatura finale delle celle. Il metodo assume una velocità del vento pari a zero. I risultati ottenuti con il modello sono stati poi verificati sull'installazione fotovoltaica sperimentale.

Il modello presentato riesce quindi a prevedere su base oraria sia il valore della radianza che della temperatura media sui pannelli fotovoltaici. Con questi elementi è quindi possibile, per il tipo di pannello considerato, stimare su base oraria il valore medio della potenza elettrica prodotta. Utilizzando questo valore si calcola su base giornaliera, mensile ed annuale il contributo energetico fornito dai pannelli fotovoltaici al sistema energetico considerato.

4. RISULTATI

Tab. I Valori medi giornalieri nelle ore diurne della temperatura ambiente e della temperatura delle celle a Bologna, per un valore di irraggiamento di 600 W/m ² .			
mese	città	T amb. diurna °C	T cella °C
giugno	Bologna	27.5	46.9
gennaio	Bologna	2.1	24.1

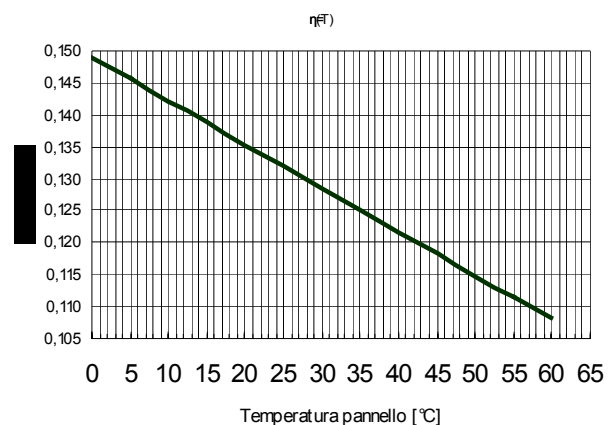


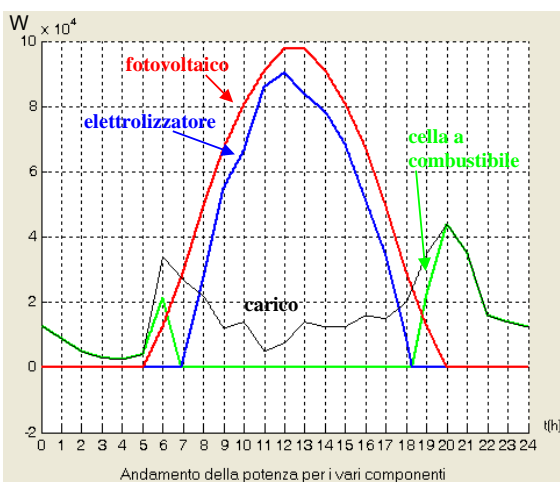
Fig. 7 Efficienza di conversione di un pannello fotovoltaico in funzione della temperatura. (Pannello Shell Solar SQ 150 -C. Irraggiamento 800 W/m²).

Tab. II Caratteristiche dell'impianto esaminato	
Campo fotovoltaico	
località	Bologna
latitudine	44°48'
tipo pannelli	Shell Solar SQ 150 -C
estensione pannelli	1200 m ²
inclinazione pannelli	45° (fissa)
coefficiente di Albedo	0.2
Carico	
tipo di utenza	- residenziale, - 40 famiglie - composizione media del Nord Italia
diagrammi di carico	- distinti per giorno feriale, sabato, festivo - distinti per stagione
elettrolizzatore - cella a combustibile	
rendimento elettrolizzatore	70 %
rendimento cella a combustibile	45 %
serbatoio idrogeno	
stoccaggio iniziale	200 kg

Al fine di analizzare l'andamento della produzione, del consumo e dell'accumulo di idrogeno su diverse basi temporali si fa riferimento ad un'installazione localizzata nella città di Bologna il cui dimensionamento è riportato in Tab. II. I risultati delle simulazioni sono riportati nelle Fig.8-10.

In Fig. 8 sono indicati l'andamento giornaliero dei valori medi orari delle potenze: prodotta dai pannelli fotovoltaici, consumata dall'utente, assorbita dall'elettrolizzatore ed erogata dalla cella a combustibile. In Fig. 9a,b, sono rappresentati gli andamenti giornalieri della produzione, del consumo e del livello di idrogeno stoccato nel serbatoio. In Fig. 10 sono rappresentati gli andamenti mensili della riserva di idrogeno per i mesi rispettivamente di giugno e gennaio.

Dall'andamento mensile è poi possibile passare alla



potenza elettrica giornaliera - giugno - BO	
Consumo giornaliero utenze:	392 kWh
Produzione fotovoltaica:	856 kWh
Consumo elettrolizzatore	648 kWh
Produzione cella combustibile	184 kWh

Fig. 8 Andamento giornaliero della potenza media oraria nei diversi sottosistemi in un giorno del mese di giugno.

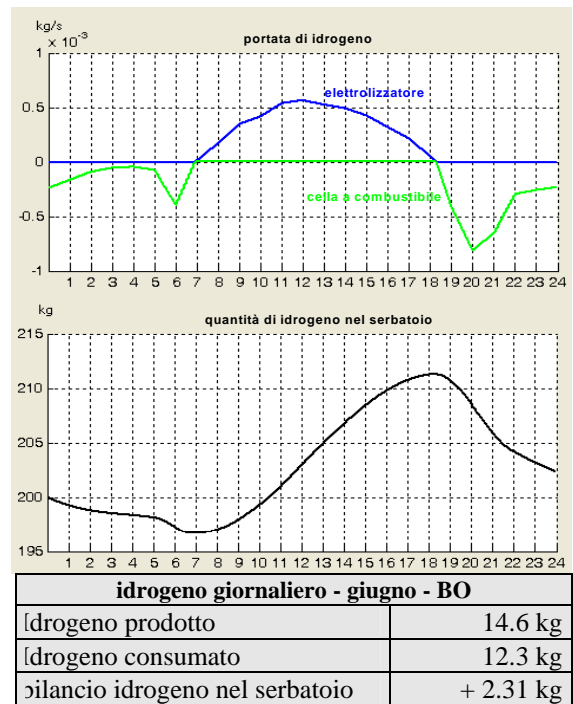


Fig. 9a,b Andamento giornaliero della produzione e del consumo di idrogeno. Andamento della quantità di idrogeno immagazzinata nel serbatoio.

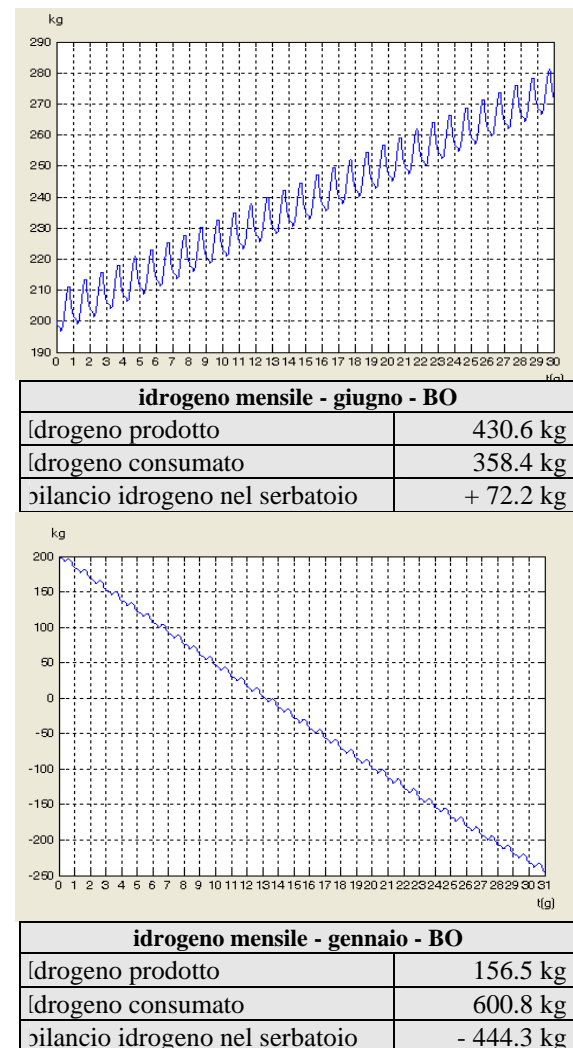
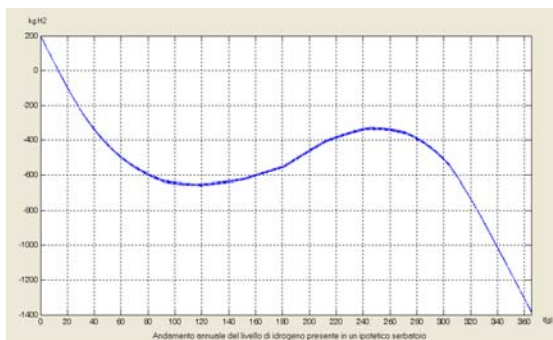
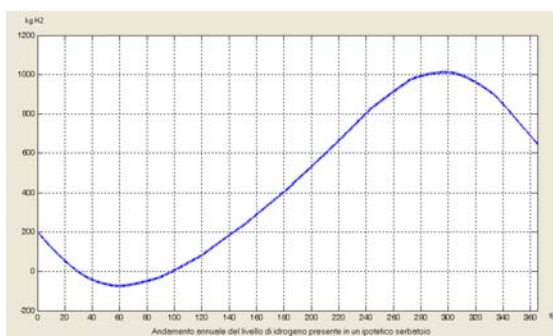


Fig. 10a,b Andamento mensile della quantità di idrogeno immagazzinata nel serbatoio nei mesi di giugno e gennaio



Riepilogo annuale idrogeno -BOLOGNA	
Idrogeno prodotto	5703 kg
Idrogeno consumato	4120 kg
Bilancio idrogeno nel serbatoio	- 1583 kg



Riepilogo annuale idrogeno -PALERMO	
Idrogeno prodotto	4565 kg
Idrogeno consumato	4100 kg
Bilancio idrogeno nel serbatoio	+ 1565 kg

Fig. 11a,b Andamento della quantità di idrogeno immagazzinata nel serbatoio per lo stesso sistema installato a Bologna ed a Palermo

valutazione annuale del bilancio energetico del sistema che è rappresentata in Fig. 11a. Dall'andamento del livello dell'idrogeno immagazzinato nel serbatoio si rileva che il bilancio tra idrogeno prodotto e consumato nell'arco di un anno nell'installazione di Bologna è negativo di 1585 kg. A fronte di questo risultato, si utilizza il modello per valutare il comportamento dello stesso sistema energetico nella città di Palermo. Le prestazioni del sistema in questa città sono riassunte dal diagramma di Fig. 11b dove l'andamento del livello di idrogeno durante l'anno porta ad un surplus di produzione pari a 1560 kg. Questo risultato è incoraggiante in quanto il bilancio positivo tra produzione e consumo annuale di idrogeno suggerisce una fattibilità, sotto il profilo energetico, di questo sistema.

5. STAZIONE SPERIMENTALE

La stazione sperimentale installata presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica è costituita dai seguenti sottosistemi di conversione illustrati in Fig.1: pannelli fotovoltaici, elettrolizzatore, cella a combustibile e dai relativi convertitori elettronici di potenza. In Tab. III sono riportate le caratteristiche principali dell'impianto sperimentale, ed in Fig. 12, 13 le fotografie dei principali sistemi di conversione.

6. CONCLUSIONI

La fattibilità pratica del sistema proposto è attualmente condizionata dal livello di sviluppo delle tecnologie cella a combustibile, elettrolizzatore, pannello fotovoltaico. Qualora

Tab. III Caratteristiche dell'impianto realizzato	
Campo fotovoltaico	
località	Bologna
latitudine	44°48'
tipo pannelli	Shell Solar SQ 150 -C
estensione pannelli	30 m ²
inclinazione pannelli	45° (fissa)
Cella a combustibile	
marca	Ballard - Nexa power module
tipo	(PEM) Proton Exchange Membr.
potenza d'uscita	1200 W
elettrolizzatore	
marca	CLAIND HG 2400
portata H ₂	24 Nm ³ /h
serbatoio idrogeno	
pressione operativa	4 bar
capacità	0.3 Nm ³



Fig. 12 Cella a combustibile Ballard Nexa 1200W ed elettrolizzatore Claind HG2000



Fig. 13 Pannelli fotovoltaici e serbatoi di idrogeno

queste tecnologie saranno sufficientemente mature da poter essere economicamente utilizzate su ampia scala, occorrerà valutare soluzioni diverse per l'accumulo dell'idrogeno, diverse dal contenimento in serbatoi in pressione di quantità di idrogeno rilevanti nelle immediate vicinanze degli utilizzatori.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Goetzberger, A.; Bopp, G.; Griesshaber, W.; Stahl, W. "The PV/hydrogen/oxygen-system of the self-sufficient solar house Freiburg " Photovoltaic Specialists Conference, 1993., IEEE , Page(s): 1152 -1158
- [2] Rahman, S.; Tam, K.S. "A feasibility study of photovoltaic-fuel cell hybrid energy system" Energy Conversion, IEEE Transaction on , Volume: 3 Issue: 1 , March 1988 Page(s): 50 -55
- [3]Khallat, M.A.; Rahman, S. "A model for capacity credit evaluation of grid-connected photovoltaic systems with fuel cell support" Power Systems, IEEE Transactions on, Volume: 3 Issue: 3, Aug. 1988 Page(s): 1270 -1276
- [4]A. Contri C. Rossi, A. Borghetti " Simulazione dell'utenza residenziale elettrica e termica per la gestione di un impianto di micro-cogenerazione" DIE, rapporto interno, Bologna 2002.