ASPETTI DI MERCATO PER PANNELLI FOTOVOLTAICI

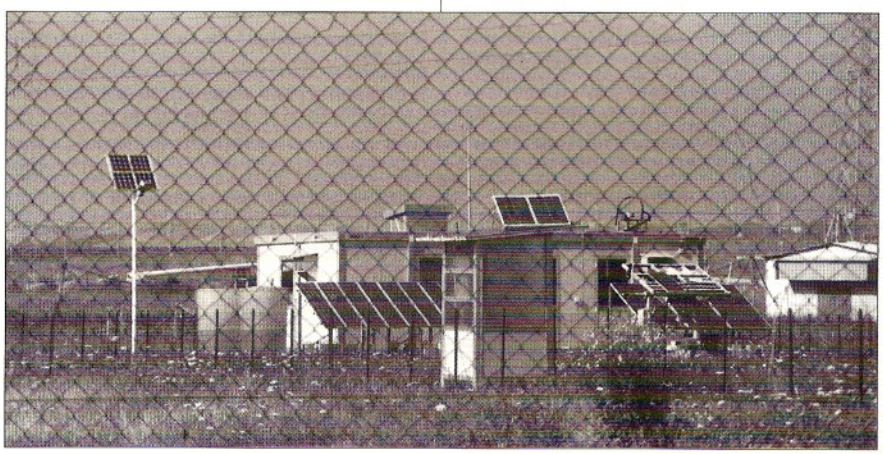
Viene presentata la sintesi di una ricerca su alcuni aspetti tecnico-economici riguardante l'attuale mercato (locale) dei pannelli fotovoltaici per applicazioni energetiche di piccola potenza.
Il ruolo della ricerca e degli impianti sperimentali, da un lato appare, nel lungo periodo, come propulsore per significativi mutamenti tecnologici ed economici del settore. D'altro canto, invece, nel breve periodo, detto ruolo si prospetta come possibile elemento accentuatore della segmentazione del mercato e quindi come fondamento di politiche discriminatorie del prezzo in funzione delle varie applicazioni cui i pannelli fotovoltaici sono destinati.
Attraverso l'analisi dei dati rilevati, mediante tecniche di correlazione, vengono determinate le funzioni del costo dei pannelli solari ed alcuni parametri caratteristici dell'attuale tecnologia.
Inoltre, viene elaborato un metodo per computare il costo del kilowattora prodotto per via fotovoltaica. Ne emerge, complessivamente, un modello di analisi utilizzabile come strumento ripetitivo per indagare le evoluzioni del mercato.

ROCCO MORELLI

POSSIBILE ACCENTUAZIONE DELLA SEGMENTAZIONE DEL MERCATO COMPLESSIVO: RUOLO DELLA RICERCA E DEI GRANDI IMPIANTI SPERIMENTALI.

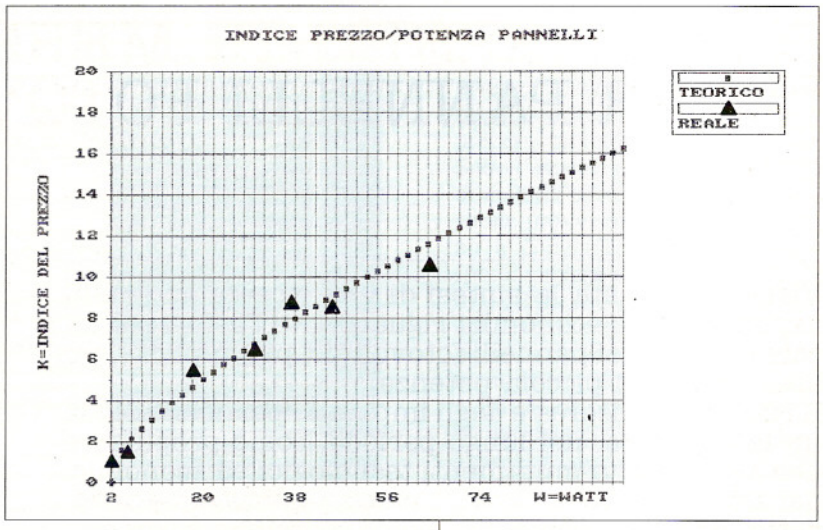
È difficile dire, al momento attuale, se il mercato del fotovoltaico, in netta ripresa dopo una stasi verificatasi a partire dalla prima metà degli anni '80, è destinato ad avviarsi verso una accentuazione della segmentazione, che già lo caratterizza, in funzione delle diverse applicazioni oggigiorno possibili.
L'indagine che segue, seppure del tutto preliminare e modesta sotto molti punti di vista, sembra fornire argomenti a quelle tesi che prospettano, per il futuro, una persistente differenza di prezzo dei pannelli fotovoltaici, a seconda che essi siano destinati ad applicazioni di piccola potenza (da pochi W a qualche decina di kW) o di grande potenza (da qualche MW in su).
Eppure gli impianti, attrezzature e componentistiche di piccola potenza, da un lato, e i mega-impianti sperimentali od operativi per la produzione di energia elettrica su scala industriale, dall'altro, nonostante siano diversissimi per finalità, problematiche e prospettive, affondano - almeno per ora - radici nelle stesse tecnologie fotovoltaiche.
Ma, se da un lato la costruzione di grandi centrali elettriche solari non è ancora conveniente, in termini di puro costo, rispetto ai convenzionali impianti termoelettrici, l'acerba tecnologia fotovoltaica viene ritenuta molto promettente e particolarmente appetibile per l'assenza di emissioni inquinanti, quantomeno in fase di conversione dell'energia.
L'impatto sull'ambiente, poi, che eventuali grandi impianti solari di questo "filone" dovessero comportare, in termini di superfici occupate, non è certo tra i più irresolubili, tanto che la moderna architettura e l'ingegneria urbanistica "d'avanguardia" si sono già sbizzarrite a trovare soluzioni, che non sempre sono solo "fantasiose".
Certo è che, a parte l'impiego nella componentistica elettronica, oggigiorno, a torto o a ragione, il fotovoltaico viene ritenuto, quasi unanimemente, relegabile o all'alimentazione di utenze isolate di piccola e media potenza - per le quali i costi di impianto e di distribuzione dell'energia elettrica prodotta per altra via sarebbero proibitivi - oppure ad

Impianto sperimentale installato dall'Enea presso il centro di ricerche della Casaccia in prossimità di Bracciano (Roma).

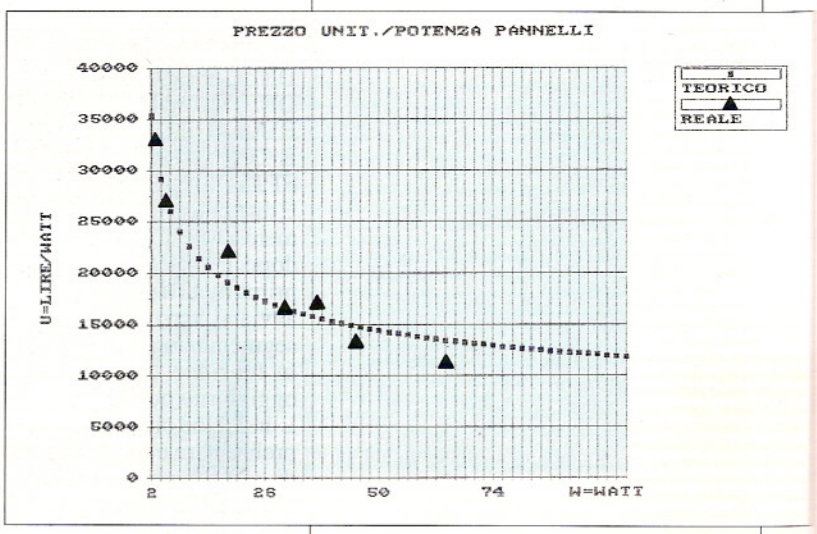


R. Morelli, Roma.

applicazioni sperimentali. Quest'ultime, già per proprio conto, costituiscono una più che cospicua quota del mercato complessivo (alcune fonti indicano circa il 50%) e quindi si configurano come un discreto incentivo al sostegno e sviluppo delle tecnologie produttive in via di affinamento.
Nel nostro Paese sono da ricordare, a proposito di applicazioni sperimentali, il progetto "Delphos" in cui si è impegnato l'Enea e i progetti "Eolie", "Adrano-fotovoltaico" e "Case sparse", che l'Enel ha promosso insieme ad un progetto per la costruzione di una centrale fotovoltaica da 3 MW, approvata dal Consiglio di amministrazione dello stesso ente. Tuttavia l'attività di ricerca svolta sino ad oggi nel Paese è stata essenzialmente finanziata da Cnr ed Enea, sebbene l'Enel, tramite uno dei suoi istituti di ricerca, il Cise, abbia promosso studi sia su celle fotovoltaiche all'arseniuro di gallio (con rendimento del 20% circa), sia sulle concrete possibilità applicative dei "concentratori", il cui effetto ultimo è in definitiva un aumento del rendimento di conversione dell'energia, da solare ad elettrica. Vi sono, infine, una fervida partecipazione di molti istituti universitari agli studi sui vari filoni di ricerca e un contributo che viene anche dall'Eni, sia attraverso studi condotti da un proprio organismo, sia attraverso una società del gruppo, l'Italsolar, destinata secondo alcuni a divenire (con il consorzio Anit recentemente costituito con Ansaldo) il più grande produttore nazionale del settore. Né manca, tra le imprese produttrici, una presenza nazionale privata - cioè al di fuori delle partecipazioni statali - in quanto tale ruolo è rivestito dalla Helios Technology.
Va comunque sottolineato che recenti ricerche sembrano indicare una produzione nazionale di pannelli fotovoltaici non superiore a 1,5 MW di picco all'anno, che rappresenta circa un ventesimo della produzione mondiale annuale complessiva, ove sono ovviamente leaders gli Stati Uniti ed il Giappone.
A questo punto s'incomincia a delineare chiaramente come la domanda di fotovoltaico per motivi sperimentali, proprio per la sua entità, può rappresentare un possibile rafforzativo della segmentazione già caratteristica del mercato, sia per fenomeni di discriminazione del prezzo in funzione delle applicazioni e delle quantità richieste per una certa "commessa", sia per possibili effettive differenziazioni tecnologiche determinate dai diversi utilizzi.
Accanto alle tecnologie sperimentali per futuribili mega impianti vi è, e vi sarà in ogni caso, un mercato del fotovoltaico per applicazioni energetiche di piccola potenza, ovvero per applicazioni con potenze comprese tra pochi W e qualche decina di kW. Secondo alcuni operatori del settore questo mercato è promettente per caratteristiche intrinseche alle tecnologie utilizzate e per i possibili impieghi del fotovoltaico. Non a caso lo stesso mercato è particolarmente rivolto a soddisfare una domanda che nasce dalla hobbistica, dagli impieghi domestici per caravanning e dall'alimentazione di utenze isolate specie nei paesi sottosviluppati o in via di sviluppo, come ben sanno alcuni missionari o tecnici che in essi spendono la propria esistenza.
In detti paesi, infatti, si registrano normalmente in modo concomitante un'alta insolazione media annua e l'assenza di una adeguata rete di distribuzione dell'energia elettrica, che talora obbligano, non solo in nome della convenienza economica, ma più spesso per fattibilità tecnica o affidabilità e continuità di funzionamento, all'impiego di un impianto fotovoltaico (si rammenti che i pezzi di ricambio per un diesel-generatore o il combustibile per la sua alimentazione non sono sempre "quotidianamente disponibili in loco"; la luce solare invece lo è, poco importa se offuscata da nuvole!).



1. Il grafico mostra l'accostamento tra funzione di correlazione calcolata per l'indice dei prezzi ed i dati reali di detto indice.



2. Il grafico mostra l'accostamento tra funzione di correlazione calcolata per i prezzi unitari ed i dati reali di detti prezzi.

OBIETTIVO: UN'ISTANTANEA SU ALCUNI ASPETTI DEL MERCATO

È proprio a questo mercato per le applicazioni di piccola potenza che, con il presente lavoro si è rivolta l'attenzione,

W = Potenza (Watt)	P = Prezzo Reale (Lire)	P = Prezzo Teorico (Lire)	P = Prezzo Errore (%)	U = Prezzo unitario Reale (L./Watt)	U = Prezzo unitario Teorico (L./Watt)	U = Prezzo unitario Errore (%)	Indice del prezzo Reale (Val. ass.)	Indice del prezzo Teorico (Val. ass.)	Indice del prezzo Errore (%)
2,25	74,120	76,742	+3,5	32,942	34,108	+3,5	1,000	1,035	+3,5
5,00	130,800	136,480	+4,3	26,160	27,296	+4,3	1,765	1,841	+4,3
18,00	403,300	343,686	-14,8	22,406	19,093	-14,8	5,441	4,637	-14,8
30,00	490,500	496,725	+1,3	16,350	16,557	+1,3	6,618	6,702	+1,3
37,00	654,000	577,809	-11,6	17,676	15,616	-11,6	8,823	7,796	-11,6
45,00	610,400	655,391	+9,0	13,564	14,786	+9,0	8,235	8,977	+9,0
64,00	773,900	857,762	+10,8	12,092	13,402	+10,8	10,441	11,573	+10,8

Tabella 1 - A fronte delle diverse potenze dei pannelli, sia per il prezzo, sia per il prezzo unitario, sia per l'indice dei prezzi, vengono riportati in tabella i valori dei dati reali (rilevati sul mercato), i valori teorici (calcolati mediante funzione di correlazione), lo scostamento tra i due valori (errore).

al fine di cogliere e valutare alcuni aspetti, anche di eventuale scala, su parametri tecnico-economici.
Nonostante, poi, l'obiettivo prefissato fosse quello di ottenere un'istantanea del mercato a fine '89, si è cercato, in via preliminare, di delineare anche un metodo di indagine che offrisse da un lato spunti didattici per razionalizzare i problemi affrontati e dall'altro l'opportunità di predisporre un quadro di riferimento facilmente aggiornabile in epoche successive.
È notorio che un gran numero di impianti industriali consentono economie di scala, ovvero consentono costi unitari decrescenti all'aumentare della "capacità" (in senso lato) degli impianti stessi. Ciò è dimostrato da una molteplice serie di indagini empiriche in cui, ponendo i costi di svariati processi economico-produttivi, oppure quelli di macchine ed impianti, in funzione della "capacità" degli stessi si giunge sempre a funzioni del tipo $y = a \times x^b$, dove ovviamente i coefficienti (a) e (b) variano da caso a caso.
Così, ad esempio, negli anni 70 è stato trovato che la funzione, a quell'epoca, del costo di una centrale termoelettrica convenzionale di taglia 50 ÷ 600 MW, senza considerare gli impianti di desolforazione e di denitrificazione che le recenti normative ambientali vanno sempre più imponendo, era $C_o = 1,3 \times W_o^{0,7}$, dove C_o è espresso in milioni di dollari e W_o in MW.
In realtà "la funzione del costo secondo la capacità" di un impianto qualsiasi risente non solo di effetti inflattivi e dell'innovazione tecnologica, per cui quasi mai è stabile nel medio e lungo periodo, ma risente anche nel breve periodo di effetti connessi ai mercati locali, non ultimi, tra tali effetti, quelli di commercializzazione, distribuzione, stoccaggio ed eventualmente di import/export. Ciononostante, allorché si disponga della funzione del costo per un certo impianto, essa diviene utile in molti problemi estimativi, comparativi e previsionali. Tale funzione, inoltre, può essere efficace anche a parecchio tempo di distanza dal momento in cui è venuta a rendersi disponibile, se si utilizzano accorgimenti opportuni per tener conto degli effetti dell'inflazione sui costi e se gli impianti o processi cui la funzione si riferisce non sono soggetti ad un elevatissimo tasso di innovazione tecnologica. Inoltre, la disponibilità della funzione del costo consente una più dettagliata analisi dei costi unitari decrescenti, con possibilità di individuare approssimativamente "asintoti" o, comunque, limiti fisici, tecnologici od economici che non autorizzino a presumere una tendenza asintotica al di là di un certo valore.
Insieme alle funzioni e del costo unitario, nel caso specifico dei pannelli solari-fotovoltaici, si è voluto rilevare anche qualche altro parametro tecnico, quale ad esempio la potenza specifica (ovvero la potenza ottenibile per unità di superficie impegnata), in modo tale da proporre un quadro di riferimento complessivo e una metodologia ripetibile facilmente ad ogni momento per monitorare le effettive variazioni sia economiche, sia tecniche, cui può essere soggetto il mercato. Infine, integrando i risultati ottenuti con i motori risultati di altre e ben più autorevoli ricerche condotte sull'argomento, è possibile giungere a proporre una funzione per la determinazione del costo complessivo di un impianto fotovoltaico di piccola potenza, mediante la quale si può risalire indicativamente al costo di ogni kWh di energia elettrica prodotta attraverso questa via "solare", alternativa ai processi convenzionali. Con ciò si spera di contribuire a fornire una base oggettiva di valutazione del costo del kWh fotovoltaico, che spesso, proprio su riviste specializzate in temi di ecologia, è oggetto di controversie fantasiose o "di parte".

RACCOLTA DEI DATI E ALCUNI ASPETTI TECNICO-COMMERCIALI

Trattandosi di una indagine di primo approccio, i dati raccolti, per la verità, sono stati abbastanza limitati, seppure in maniera sufficiente a fornire le basi per un primo orientamento. Tali dati, riportati nelle prime due colonne delle tabelle 1 e 2 (potenza-prezzo-superficie) sono stati estratti da cataloghi tecnici e costituiscono "elementi originari" di partenza per ogni sviluppo che segue. Tutti gli altri dati riportati nelle stesse tabelle 1 e 2 (prezzo unitario reale - indice reale del prezzo - potenza reale specifica) derivano, quindi, da quegli stessi "elementi originari" e sono stati ricavati attraverso rapporti tra quest'ultimi.
L'indagine è stata condotta a fine 1989 e pertanto tutti i valori economici sono riferiti a questo periodo.
Sono stati oggetto di indagine soltanto i moduli fotovoltaici di importazione, a cella di silicio semicristallino, di forma quadrangolare e tensione nominale di 6 o 12 V, commercializzati da ditte presenti nell'area romana.
Le celle, che in funzione della loro forma consentono un alto grado di riempimento della superficie captante del modulo, sono usualmente fornite con garanzia di efficienza reale pari al 13% (nonostante quella teorica sia reputata essere pari al 15%). Per i moduli composti con tali celle, sebbene venga nominalmente offerta una garanzia per oltre 25 anni, di fatto viene poi data copertura in termini commerciali per i soli primi 10 anni di funzionamento, a partire dal momento dell'installazione. Nel contempo viene specificatamente indicato che in un simile arco temporale l'efficienza può decadere a valori non al di là del 90% del valore iniziale. Non ancora è chiaro, però, se il decadimento di efficienza sia comunque dovuto, come sembra che avvenga nel caso di celle al silicio amorfo, alla prolungata azione della radiazione solare che altera parzialmente il materiale base, oppure sia dovuta a variazioni che i raggi ultravioletti in particolare possono causare nei valori di transmittanza di alcuni tipi di materiali di rivestimento delle celle, talvolta impiegati in sostituzione del vetro.
È opportuno, infine, precisare che: i dati presentati nelle tabelle 1 e 2 sono valori medi di mercato per moduli (e pannelli con essi composti) del genere descritto;

W = Potenza (Watt)	S = Superf. Reale (m^2)	Teorica (m^2)	Errore (%)	Z = Potenza specifica Reale (Watt/m^2)	Teorica (Watt/m^2)	Errore (%)
2,25	–	–	–	–	–	–
5,00	0,1156	0,0993	+3,7	43,25	45,81	+5,9
18,00	0,2200	0,2174	-1,2	81,82	75,20	-8,1
30,00	0,3050	0,3074	+0,8	98,36	91,64	-6,8
37,00	–	–	–	–	–	–
45,00	0,4320	0,4199	-2,8	104,17	107,21	+2,9
64,00	0,5550	0,5624	+1,3	115,31	122,86	+6,5

Tabella 2 - A fronte delle diverse potenze dei pannelli, sia per la superficie, sia per la potenza specifica, vengono riportati in tabella i valori dei dati reali (rilevati sul mercato), i valori teorici (calcolati mediante funzione di correlazione), lo scostamento tra i due valori (errore).

le funzioni che da tali dati si ricavano sono denominate funzioni dei costi (e non funzioni dei prezzi) perché si è pensato ai costi che si dovrebbero sostenere per disporre di un impianto fotovoltaico. In sostanza viene usato il termine "prezzo" allorché ci si riferisce all'entità quantitativa secondo cui il mercato si esprime; viene usato, invece, il termine "costo" allorché ci si riferisce all'entità della spesa di un eventuale acquirente.

ELABORAZIONE DEI DATI E PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

I soli dati reali relativi all'indice del prezzo in tabella 1 e tutti i dati reali presenti in tabella 2 (superficie-potenza specifica) sono stati sottoposti a correlazione statistica assumendo la potenza (W) come variabile indipendente. Sono state, così, trovate le funzioni teoriche (tra cui le funzioni del costo e del costo unitario) che rappresentano i dati rilevati sufficientemente bene, ovvero entro margini di errore accettabili. Gli scostamenti cui danno luogo le funzioni teoriche trovate, rispetto ai dati disponibili, sono stati anch'essi tabulati, in termini di "errore percentuale", nelle stesse tabelle 1 e 2.

Così, ad esempio, assumendo in luogo dei prezzi effettivi di mercato i valori risultanti dalle funzioni teoriche dell'indice del costo, trovate mediante correlazione, per un modulo da 45 W si commette un errore del +9%, rispetto agli effettivi prezzi di mercato.

Si può notare, dai valori in tabella, che in nessun caso, mediante le funzioni teoriche di costo, verrebbero indotti errori più ampi del +10,8% e -14,8%, entro il campo di variazione dei dati rilevati.

I calcoli di correlazione sono stati effettuati con l'ausilio di un personal computer, utilizzando il metodo che in statistica è noto sotto il nome di "minimi quadrati". In altri termini è stato "minimizzato" lo scostamento quadratico medio tra i dati disponibili e i valori che le funzioni teoriche forniscono in corrispondenza degli stessi valori della variabile indipendente cui i dati si riferiscono. Le formule ed i programmi di calcolo impiegati per la correlazione non vengono qui riportati in quanto esulano dagli scopi prefissati.

La simbologia di riferimento per l'interpretazione dei risultati è la seguente:

W = potenza di picco del modulo o del pannello (W);

P = costo (ovvero prezzo di mercato) del modulo o del pannello (lire);

U = costo unitario (ovvero prezzo unitario di mercato) del modulo o del pannello (lire/W);

K = indice del costo (ovvero indice del prezzo), dato dal rapporto tra il prezzo di un modulo o pannello e il più piccolo dei moduli oggetto di indagine (adimensionale);

S = superficie "totale" (cioè captante e non, ottenuta dalla proiezione della sagoma su un piano orizzontale) del modulo o del pannello (m^2);

Z = potenza specifica, data dal rapporto tra la potenza di picco del modulo o del pannello considerato e la sua superficie "totale" (W/m^2);

u = lim w → ∞ U (lire/W).

I risultati ottenuti direttamente dalle correlazioni sono riepilogati di seguito in forma tabulare (vedi grafico in basso a sinistra), ponendo in evidenza accanto ad ogni funzione ottenuta: il coefficiente di correlazione relativo; il campo di escursione dell'errore, calcolato rispetto ai dati disponibili; il corrispondente numero di figura del grafico che rappresenta visivamente sia i dati reali disponibili che la stessa funzione teorica calcolata.

Dalla funzione dell'indice del costo $K = 0{,}577 \times W^{0{,}721}$ si possono anche desumere le funzioni del costo (P) e del costo unitario (U), secondo il modello delle economie di scala, cui (K) si adegua, essendo una funzione del tipo $y = a \times X^b$. Nel far questo, però, occorre tener conto delle modalità in cui i valori reali di (K) sottoposti a correlazione sono stati ricavati (ponendo K = 1 allorché P = 74120) e tener conto, altresì, che U = P/W. In tal modo si avrebbe che secondo il modello delle economie di scala:

$$K = 0{,}577 \times W^{0{,}721} \quad = \text{(adimensionale)}$$

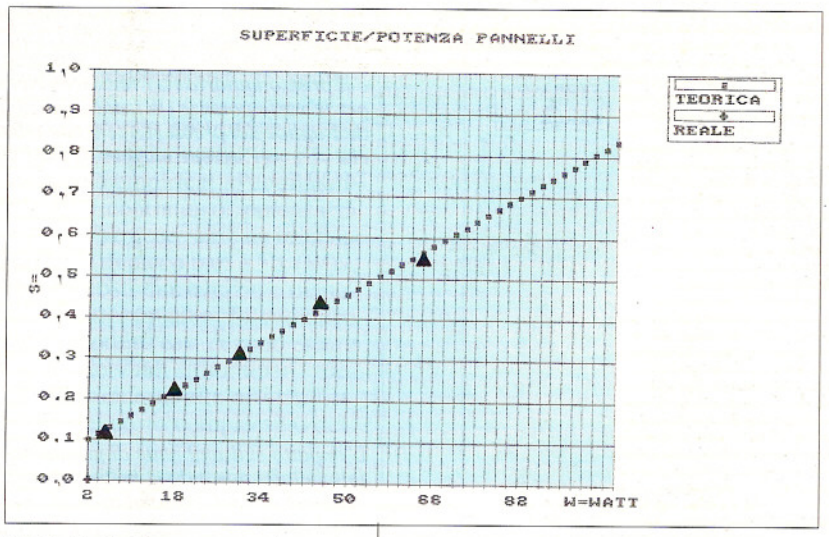
$$P = 0{,}577 \times W^{0{,}721} \times 74120 \quad = \text{(lire)}$$

$$U = \frac{0{,}577 \times W^{0{,}721} \times 74120}{W} \quad = \text{(lire/W)}$$

Ovviamente, nell'ipotesi che (P) ed (U) venissero ricavati nel modo su esposto varrebbero per essi lo stesso coefficiente di correlazione e lo stesso campo di escursione dell'errore validi per (K) (a tale proposito occorre precisare che gli errori percentuali indicati in tabella 2 per

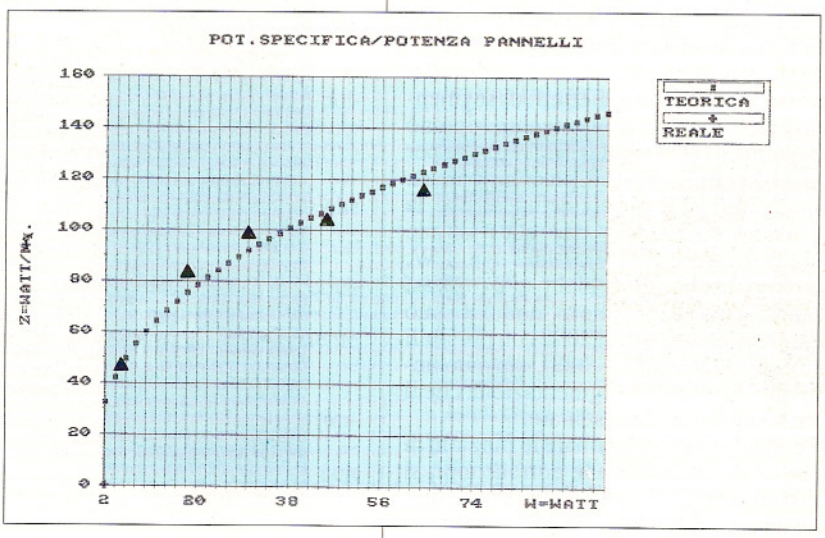
Rappresentazione grafica dei dati disponibili, e funzione teorica calcolata.

Grafico di figura n.	Funzione teorica calcolata	Coefficiente di correlazione	Campo di escursione dell'errore
1	$K = 0{,}577 \times W^{0{,}721}$	0,976	+10,8% ÷ -14,8%
2	U = 15565,19 + (40379,92/W)	0,915	da calc.
3	S = 0,0824 + 0,0075 x W	0,999	+3,7% ÷ -2,8%
4	$Z = 24{,}572 \times W^{0{,}387}$	0,974	+6,5% ÷ -8,1%



3. Il grafico mostra l'accostamento tra funzione di correlazione calcolata per le superfici totali captanti ed i dati reali di dette superfici.

4. Il grafico mostra l'accostamento tra funzione di correlazione calcolata per le potenze specifiche ed i dati reali di dette superfici.



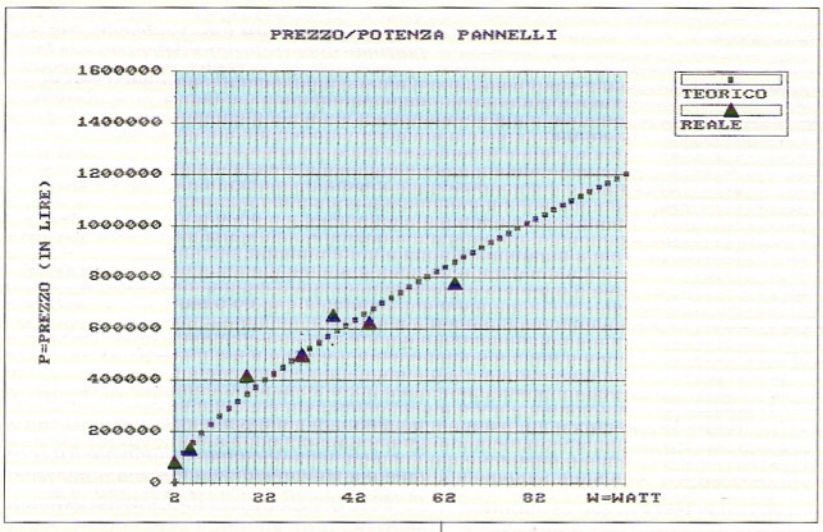
(P) ed (U) si riferiscono proprio a tale ipotesi). In questo caso anche la forma grafica di (P) ed (U) non saranno altro che una replica del grafico di figura 1 con una diversa scala delle ordinate, come mostra ad esempio il grafico di figura 5.
In realtà le funzioni ricavate secondo il modello delle economie di scala rappresentano bene il fenomeno da esse descritte soltanto entro un campo di potenze (W) che non supera qualche centinaio di W, mentre sono del tutto inadeguate ad essere estrapolate a situazioni ove sono richieste potenze (W) più alte, anche se contenute nell'ordine di qualche decina di kW.
Ci si può convincere della validità di tutto ciò prendendo in considerazione la funzione U = 15565,19 + (40379,92/W), ricavata direttamente dai dati reali di (U) riportati in tabella 1, utilizzando, per la correlazione, una funzione iperbolica del tipo y = a + (b/x). L'andamento iperbolico di (U) rende evidente il concetto economico secondo cui all'aumentare indefinitivamente della potenza richiesta, il prezzo unitario, pur decrescendo, non tende a zero.
Infatti:

$\lim w \to \infty U = u = \lim w \to \infty$ 15565,19 + (40379,92/W);
da cui:
u = 15565,19 (lire/W);

ovvero: in generale, (U) tende asintoticamente ad un valore (U) ben determinato, che agli effetti pratici viene pressoché raggiunto già con potenza di 300 W circa, valore a cui cessa quindi ogni effetto di scala, almeno per ciò che riguarda i pannelli solari costituenti un impianto fotovoltaico. Il valore asintotico di (U), così ricavato, resta naturalmente valido sino a quando non intervengono sul mercato novità tecnologiche in grado di far sentire sensibilmente il loro effetto sui costi di produzione delle celle e quindi capaci di influire sui prezzi di mercato dei moduli. Sino a quel momento, però, (u) resta inalterato e può essere attualizzato, in epoche successive al momento in cui è stato ricavato, tenendo opportunamente conto degli effetti inflattivi cui sono soggette le entità economiche nel tempo. Se comunque si volge lo sguardo alla letteratura per applicazioni industriali e sperimentali di grande potenza, si trova a fine '89 un corrispondente valore di (u) pari a circa 6000÷8000 lire/Watt, dipendentemente dal tipo di cella impiegata. Ritornando invece al campo delle applicazioni per piccola potenza, si può dire, estrapolando, che da 300 W sino a qualche decina di kW, la funzione del costo è la seguente:

P = [u + (40379,92/W)] x W;
da cui:
P = 40379,92 + u x W;

ove quest'ultima espressione sta ad indicare una funzione del costo, di tipo lineare, in cui non è presente alcun effetto di scala.
In realtà, il rilievo dei dati di mercato indica già oggi un valore effettivo di (u) che è inferiore a 12092 e quindi inferiore a 15565,19, rappresentando quest'ultimo valore non un concreto limite, ma semplicemente il risultato di una correlazione statistica.
La dipendenza, poi, cui è stato sino ad oggi soggetto il mercato del fotovoltaico per applicazioni di piccola potenza, rispetto al mercato per le applicazioni



5. Il grafico mostra come si avrebbe una replica del grafico della figura 1, con diversa scala, nel caso in cui il prezzo (P) o il prezzo unitario (U) venissero ricavati, per le varie potenze (W), dalla funzione dell'indice dei prezzi (K) tenendo conto che (U) = (P)/(W) e che per (K) = 1 (P) = 74120 lire.

industriali e i grandi impianti sperimentali, lascia sperare che, con una espansione della domanda, a breve scadenza si possa giungere, se gli effetti di segmentazione si attenueranno o scompariranno del tutto, a 6000 ÷ 8000 lire/W anche per le stesse applicazioni di piccola potenza.
In definitiva si può concludere che la funzione del costo per quest'ultime applicazioni è P = 40379,92 + u x W, ovvero dipende essenzialmente (o quasi unicamente) da (u) che al momento può essere ritenuto pari a 12092 con possibili ribassi verso 6000 ÷ 8000, dipendentemente da effetti di segmentazione che il mercato dovesse presentare.
Passando ora ad esaminare le funzioni di (S) e (Z) ottenute dalle correlazioni, si deduce che per le piccole potenze, sino ad un centinaio di W, esiste un effetto di scala, legato molto probabilmente al rapporto fra superficie effettivamente captante e superficie totale. Il fatto, quindi, che per i dati rilevati la potenza specifica (Z) assuma un andamento crescente, ma con concavità rivolta verso il basso, può essere denotativo della minore incidenza, all'aumentare di (W), degli "spazi morti" sul totale della superficie captante.
Dall'attuale tecnologia e teoria fotovoltaica sappiamo, però, che non è possibile superare, per celle del tipo in questione, valori di 130 W/m^2. Tale valore è il limite massimo di (W) entro cui assume validità la funzione $Z = 24{,}572 \times W^{0{,}387}$.
Più idonea, invece, ad assumere validità sino a valori di (W) pari a qualche decina di kW è la funzione di (S). Essa, infatti, a parte il rendere conto di un legame fisico-intuitivo di proporzionalità diretta tra potenza e superficie, mostra di essere basata su una potenza specifica $W/S = (1 - 0{,}0824)/0{,}0078 \cong 122$ W/m^2, caratteristica media dei moduli sottoposti ad indagine.

IL COSTO DEL kWh PRODOTTO DA SISTEMI FOTOVOLTAICI DI PICCOLA POTENZA

Una analisi per individuare se piccoli sistemi fotovoltaici possano essere convenientemente usati per alimentare elettricamente utenze isolate, in luogo dei convenzionali sistemi (per esempio diesel-generatori), deve passare necessariamente - per via diretta o indiretta - attraverso la determinazione del costo del kWh prodotto.
Per giungere però a determinare, seppure in modo indicativo, il costo del kWh prodotto per via fotovoltaica, bisogna prima considerare i seguenti aspetti:
a - Si ritiene (vedasi anche Economia delle Fonti di Energia n. 32/1987 - Caldon e Gottardi - Conversione Fotovoltaica - Un modello di diffusione della tecnologia) che il costo di un impianto fotovoltaico di media e grande potenza, specie se con caratteristiche industriali e di elevata affidabilità, non è dato in maniera prevalente dal solo costo dei pannelli, ma sul costo complessivo incidono, in maniera quasi analoga ai pannelli stessi, le indispensabili apparecchiature di accumulo, regolazione, inseguimento del punto di massima potenza e i gruppi di inversione necessari all'alimentazione di utenze in alternata.
Alcuni dati di massima della presente ricerca, condotta per gli impianti di piccola potenza, indicano che l'incidenza della componentistica, in termini percentuali sul costo complessivo, è maggiore di quella che si registra per i grandi impianti (talvolta anche > 60% ÷ 70%).
Superato, però, il limite di qualche centinaio di W, la regola che attribuisce il

L'impatto sull'ambiente di grandi impianti fotovoltaici non è da considerarsi tra i più problematici ed irresolubili.

costo complessivo 50% ai pannelli e 50% alla restante componentistica) si può assumere validamente per valutazioni indicative.
b - È buona pratica costruttiva, sperimentata alle nostre latitudini, seguire la seguente regola empirica: «Per alimentare un carico continuo di potenza di picco pari a (W) è necessario un impianto con potenza di picco pari a 5 x (W)».
c - Sebbene i costi di esercizio e manutenzione di un impianto fotovoltaico siano molto modesti essi devono essere assunti, per interventi straordinari, specie lì dove è richiesta alta affidabilità, pari al 10% del costo complessivo dell'impianto.
d - La quota annua posticipata (c) di ammortamento di un capitale (Co) in (n) anni, comprensiva di capitale ed interessi, ad un tasso di interesse reale (i) - cio di un tasso al netto di fenomeni inflattivi è la seguente:

$$c = Co \times \frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1}$$

e - I criteri progettuali di un impianto, ad elevata affidabilità, con potenza di picco pari a 5 x (W), per alimentare con continuità un carico pari a (W), non possono consentire di prendere in considerazione alcun "fattore di indisponibilità" dell'impianto stesso. Pertanto, la producibilità annua (p) in kWh è data da:

p = (W x 24 ore x 360 giorni)/1000 = 8,640 x W.

f - Il costo (h) del kWh per un impianto fotovoltaico - ove non esistono ovviamente costi per combustibili - può essere assunto pari al rapporto tra la quota annua di ammortamento (c) del costo complessivo dell'impianto e la producibilità annua (p) dell'impianto stesso:

$$h = \frac{c}{p} = (\text{lire/kWh}).$$

Ciò posto, considerando la funzione del costo, di cui al precedente paragrafo (Elaborazione dei dati e presentazione dei risultati), P = 40380 + u x W, che in via approssimativa si può ritenere valida anche per impianti di qualche kW, è possibile giungere ad affermare che il costo del kWh prodotto da impianti fotovoltaici per applicazioni energetiche di piccola potenza è il seguente:

$$h = \frac{c}{p} = \frac{1{,}1 \times 2 \times 5 \times (40380 + u \times W) \times \frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1}}{8{,}640 \times W}$$

da cui:

$$h = \frac{11 \times (40380 + u \times W)}{8{,}640 \times W} \times \frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1} = (\text{lire/kWh})$$

È da segnalare che, a rigore i costi di esercizio e manutenzione non dovrebbero essere inseriti nel costo di impianto come se essi fossero erogati complessivamente all'atto dell'installazione dell'impianto stesso. Inoltre, salvo che per bassissime potenze il termine (40380) è ininfluente e può essere trascurato.
A titolo di esempio si può calcolare che per:

W = 10 kW (potenza di un ipotetico carico continuo da alimentare);
u = 12092 lire/W, come attualmente indica il mercato;
i = 5%;
n = 10 anni (ipotesi di vita media d'impianto sviluppata anche in base all'estensione temporale della garanzia con cui i moduli fotovoltaici vengono commercializzati);

si ottiene un costo del kWh pari a 1994 lire.
Nell'ipotesi, invece, che anche per impianti di piccola potenza si riuscisse, eliminando effetti di segmentazione, ad ottenere un prezzo unitario sul mercato pari a 6000 lire/W, si avrebbe un costo del kWh pari a 990 lire.
I valori del costo del kWh calcolati mediante le ipotesi e la metodologia sopra riportate si manterrebbero, per conformazione stessa della struttura del costo complessivo, sostanzialmente inalterati in tutto il campo di applicazioni che vanno da pochi W a decine di kW di picco e subirebbero rilevanti modificazioni solo per altrettanto rilevanti diminuzioni del costo unitario dei pannelli o diminuzioni della incidenza delle restanti apparecchiature sul costo complessivo.