

● PROVE CONDOTTE SOTTO COPERTURE FOTOVOLTAICHE COSTRUITE CON DIVERSI MODULI

# Con il fotovoltaico sul tetto la serra raddoppia la sua utilità

Serre fotovoltaiche realizzate con moduli meno ombreggianti consentono di integrare il reddito con la vendita dell'energia generata senza compromettere la qualità richiesta dal mercato per il prodotto agricolo

di **G. Minuto, F. Tinivella, C. Bruzzone, A. Minuto**

**N**egli ultimi anni le nuove opportunità offerte dal mercato dell'energia, le incentivazioni collegate alla realizzazione di impianti fotovoltaici, nonché la progressiva riduzione dei costi di acquisto della maggior parte dei materiali (AA. VV., 2011; Danny *et al.*, 2009) hanno favorito la realizzazione di impianti fotovoltaici montati sul tetto delle serre in sostituzione totale o parziale degli elementi che compongono la loro copertura.

L'accelerazione del mercato fotovoltaico ha fatto però emergere problemi



**Foto 1** Nelle serre fotovoltaiche, distanziando le celle di silicio dei moduli, è possibile regolare la quantità di radiazione solare intercettata

di convivenza tra la produzione elettrica e quella agricola (Parker, 1991; Yano *et al.*, 2005).

## Verso serre fotovoltaiche più luminose

Nelle coltivazioni protette la luce è, per la maggior parte delle colture, un fattore critico e limitante al pari di altri, come la temperatura o l'umidità relativa (Stanghellini e Heuvelink, 2007). **Progettista e imprenditore agricolo devono quindi porre estrema attenzione alla forma e alla dimensione dei coni d'ombra che la pannellatura fotovoltaica proietta a terra, cioè alla quantità di radiazione foto-**

**sinteticamente attiva (PAR) che arriva sulla coltura. L'intensità della PAR non può dipendere soltanto dai limiti imposti dall'impianto fotovoltaico, ma anche dall'effettivo interesse che la coltura ha per il mercato e dalla qualità del prodotto che si può ottenere (Kozai *et al.*, 1999; Stanghellini e Heuvelink, 2007).**

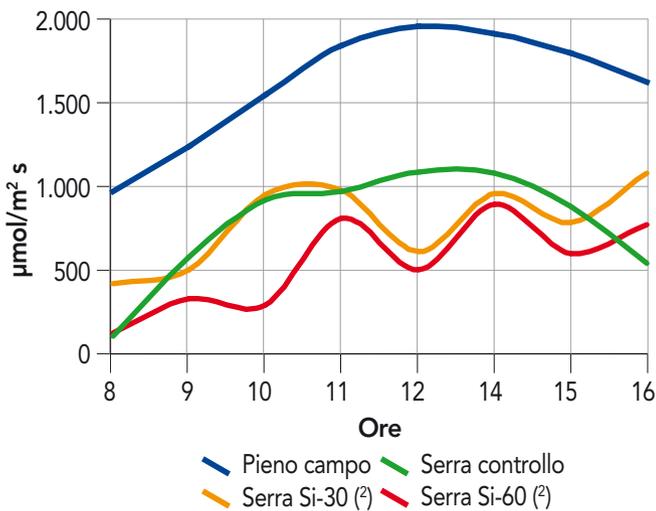
**L'evoluzione dei materiali e più ancora la normativa imposta per l'accesso all'incentivazione (conto energia) hanno prodotto il progressivo cambiamento delle installazioni fotovoltaiche sulle coltivazioni protette e la forma stessa delle serre su cui esse vengono realizzate. Si è passati da strutture rea-**

**TABELLA 1 - Caratteristiche delle serre fotovoltaiche realizzate per le prove**

Ambiente di coltivazione	Materiale della cella fotovoltaica	Porzione di luce intercettata dal modulo (%)	Porzione di suolo ombreggiata dall'impianto (%)	Caratteristiche dei moduli fotovoltaici					
				lunghezza e larghezza (cm)	spessore (mm)	orientamento	inclinazione <sup>(1)</sup> (gradi)	potenza (Wp)	produttore
Serra Si-60	Silicio (Si) policristallino	60	30	200 x 60	5	est-sudest <sup>(2)</sup>	30	90	Solarkey
Serra Si-30	Silicio (Si) policristallino	30	15	200 x 60	5	est-sudest <sup>(2)</sup>	30	45	Solarkey
Serra CIS-50	Diseleniuro di rame e indio (CIS)	50	25	120 x 60	7	AUTORE	30	37,96	Würth Solar
Serra CIGS-50	Diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS)	50	50	182 x 108	50	est-ovest <sup>(3)</sup>	5	100	Solyndra
Ombraio CIGS-50	Diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS)	50	50 <sup>(4)</sup>	182 x 108	50	est-ovest <sup>(3)</sup>	0	100	Solyndra

(1) Rispetto al piano orizzontale. (2) Moduli montati solo su una delle due falde di copertura della serra. (3) Modulo formato da cilindri fotovoltaici con asse principale orientato in direzione nord-sud. (4) Al di sotto dell'impianto è stato montato un telo bianco; moduli e telo intercettano complessivamente circa l'80% della radiazione totale.

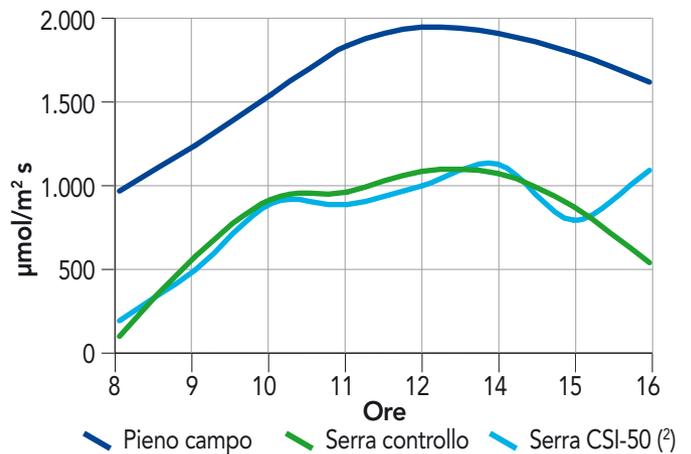
**GRAFICO 1 - PAR misurata in serre fotovoltaiche realizzate con moduli di silicio (1)**



(1) PAR: radiazione fotosinteticamente attiva; media dei giorni del mese di luglio 2011. (2) Le caratteristiche dell'ambiente di coltivazione sono riportate in *tabella 1*.

Nelle serre fotovoltaiche con moduli in silicio, rispetto alla serra convenzionale, si è rilevata un sensibile riduzione della radiazione fotosinteticamente attiva, soprattutto in corrispondenza del «passaggio» dei coni d'ombra.

**GRAFICO 2 - PAR misurata in serra fotovoltaica realizzata con moduli CIS (1)**



(1) PAR: radiazione fotosinteticamente attiva; media dei giorni del mese di luglio 2011. (2) Le caratteristiche dell'ambiente di coltivazione sono riportate in *tabella 1*.

Utilizzando i moduli CIS, la riduzione della radiazione fotosinteticamente attiva risulta molto contenuta rispetto a quella rilevata nella serra convenzionale.

l'impianto fotovoltaico, con tetto monofalda o bifalda coperto al 100% da pannelli fotovoltaici totalmente oscuranti, fino a realizzazioni via via più attente alle necessità delle coltivazioni agricole e frutto di una progettazione integrata tra costruttori di serre e produttori di moduli fotovoltaici. **Tale tipo di progettazione sta conducendo alla realizzazione di strutture di serra più luminose di quelle attualmente disponibili sul mercato** e ha introdotto soluzioni efficienti per la circolazione dell'aria e il raffreddamento dei pannelli fotovoltaici, fino alla realizzazione di pannelli fotovoltaici componibili con le strutture del tetto della serra, dal montaggio rapido e sicuro e integrabili anche su strutture per ombrai (Minuto, 2010).

### Coperture fotovoltaiche a confronto

A partire dal 2007 il Cersaa (Centro regionale di sperimentazione e assistenza agricola) della Cciaa di Savona ha svolto sperimentazioni volte a dare risposte alle imprese agricole che esprimevano la necessità di integrare il reddito agricolo con quello derivante dalla vendita di energia da fotovoltaico. In particolare, l'obiettivo delle prove sperimentali è stato quello di comprendere fino a che punto è possibile ridurre la radiazione entrante all'interno di una serra senza pregiudicare la qualità e la quantità delle produzioni agricole sottostanti.

Dovendo verificare l'effetto sulle colture

**Foto 2**  
La serra fotovoltaica realizzata con moduli CIS composti da celle rettangolari distanti tra loro 5 cm



dell'ombreggiamento causato dai pannelli, presso il Cersaa sono stati realizzati impianti fotovoltaici montati su preesistenti serre a campata larga e su serre e ombrai costruiti *ex novo*. Gli impianti fotovoltaici, realizzati con materiali diversi (*tabella 1*), sono stati completamente integrati nelle coperture delle serre e degli ombrai in densità tale da realizzare una percentuale di suolo direttamente ombreggiato compresa tra il 15 e il 50%. Per maggiori dettagli sugli impianti e su come sono state impostate le prove si rimanda agli *approfondimenti* pubblicati in internet all'indirizzo riportato a fine articolo.

I risultati produttivi conseguiti sotto gli impianti fotovoltaici sono stati quindi confrontati con quelli ottenuti in tre ambienti di coltivazione convenzionali: il pieno campo, una serra a campata larga (costruttivamente identica alle serre su cui sono stati installati gli impianti), e un ombraio dotato di rete ombreggiante all'80%.

### Valori di radiazione ed effetti sulle colture rilevati nelle serre

#### Serre con moduli in silicio e moduli CIS

Nelle serre realizzate con moduli in silicio policristallino (*foto 1*), **la misura della radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) ha messo in evidenza la sua sensibile riduzione, rispetto alla serra di confronto, sotto i moduli oscurati al 60% dalle celle fotovoltaiche (serra Si-60, grafico 1).**

In particolare, una notevole riduzione della PAR è stata rilevata quando il sensore, nel corso della giornata, viene investito dal cono d'ombra prodotto dalle celle fotovoltaiche.

**Sotto la copertura fotovoltaica della serra realizzata con moduli al disele-**

**TABELLA 2 - Effetto della copertura fotovoltaica su piante di basilico per la produzione di pesto (1)**

Ambiente di coltivazione (2)	Peso fresco (3) (g/m <sup>2</sup> )	Curvatura del fusto (4)
Serra Si-30	1.475 a	no
Serra Si-60	1.490 a	
Serra CIS-50	1.515 a	
Serra convenzionale	1.495 a	

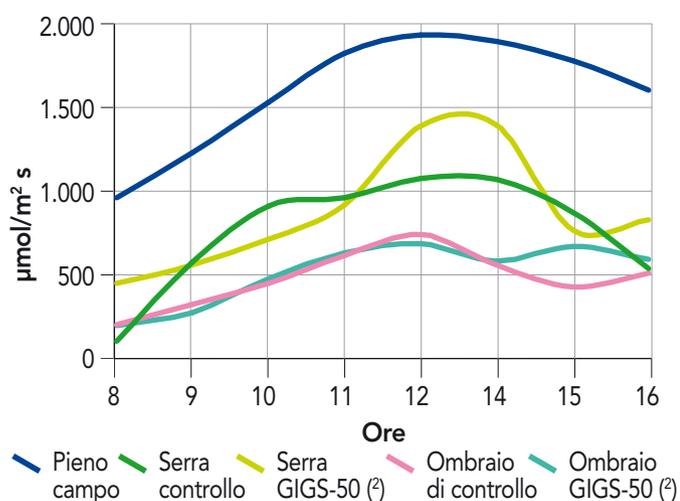
(1) Dati aprile 2011 su basilico seminato il 16-3-2011 alla densità di 5 g di seme/m<sup>2</sup>. (2) Le caratteristiche degli ambienti di coltivazione sono riportate in *tabella 1*. (3) I valori seguiti dalla medesima lettera non differiscono tra loro statisticamente secondo il test di Duncan (P = 0,05). (4) Curvatura della pianta verso la porzione di tetto libera da pannelli fotovoltaici.

Sul basilico nelle serre fotovoltaiche non si sono rilevate, rispetto alla serra convenzionale, differenze significative sia di peso sia di curvatura del fusto.



**Foto 3** L'ombraio fotovoltaico realizzato presso il Cersaa con i moduli prodotti da Solyndra aventi celle CIGS poste in cilindrici distanti tra loro 8 cm (vedi *dettaglio*)

**GRAFICO 3 - PAR misurata in serre e ombrai fotovoltaici realizzati con moduli CIGS (1)**



(1) PAR: radiazione fotosinteticamente attiva; media dei giorni del mese di luglio 2011. (2) Le caratteristiche dell'ambiente di coltivazione sono riportate in *tabella 1*.

Sia su serra sia su ombraio, con la copertura realizzata con moduli fotovoltaici CIGS i livelli della radiazione foto-sinteticamente attiva sono risultati non dissimili rispetto a quelle delle analoghe strutture convenzionali.

**niuro di rame e indio (CIS) (foto 2) la riduzione della PAR, misurata nell'arco temporale di un mese, è stata invece molto contenuta (serra CIS-50, grafico 2), circa il 3% in meno di quella misurata nella serra convenzionale utilizzata come confronto.**

Pur con riduzioni di PAR così limitate, alcune delle piante coltivate in quella serra hanno mostrato cambiamenti sia morfologici sia fisiologici.

**Gli effetti su basilico.** Nelle condizioni di ombreggiamento presenti sotto le coperture realizzate con moduli in silicio e CIS **non sono state osservate variazioni significative su basilico destinato alla produzione di pesto (tabella 2),** sia in termini di peso sia di un'eventuale curvatura della pianta verso la porzione di tetto libera dai pannelli.

### Serre e ombrai con moduli CIGS

La particolare forma dei pannelli realizzati con celle in diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS) (vedi *dettaglio* in *foto 3*) ha consentito di ottenere risultati positivi per molte colture. Infatti, **i valori di PAR sotto queste coperture (serra CIGS-50 e ombraio CIGS-50, grafico 3) sono risultati non dissimili da quelli misurati sotto la serra e l'ombraio convenzionali utilizzati per confronto.** Come nel caso della copertura fotovoltaica della serra realizzata con moduli CIS, la riduzione della PAR nell'arco di 12 mesi non è mai stata superiore al 3% rispetto alle stesse coperture di confronto.

**Gli effetti su fragola.** In queste condizioni, per la coltivazione della fra-

**TABELLA 3 - Effetto della copertura fotovoltaica sulla produzione di fragola cv Mara de Bois (1)**

Livello di coltivazione	Ambiente di coltivazione (2)	Frutti raccolti (3) (n.)	Peso frutti (3) (g)
Piano alto	Ombraio CIGS-50	165 b	1.019,8 b
	Ombraio convenzionale	185 b	1.049,5 b
	Serra CIGS-50	231 a	1.614,1 a
	Serra convenzionale	268 a	1.597,0 a
Piano terra	Ombraio CIGS-50	168 b	910,5 bc
	Ombraio convenzionale	177 b	793,8 c
	Serra CIGS-50	199 b	1.222,1 b
	Serra convenzionale	183 b	1.136,0 b

(1) Inizio della prova: 31-3-2011. Piante frigoconservate a radice nuda, trapiantate al germogliamento. Dimensione delle parcelle: 10 m<sup>2</sup>/replicazione, tre repliche.

(2) Le caratteristiche degli ambienti di coltivazione sono riportate in *tabella 1*.

(3) I valori seguiti dalla medesima lettera non differiscono tra loro statisticamente secondo il test di Duncan (P = 0,05).

Per la fragola, in entrambi i livelli di coltivazione (alto e terra), si sono ottenute produzioni confrontabili in termini sia di numero sia di peso dei frutti raccolti.

**gola, allevata su due livelli, sono state ottenute produzioni confrontabili con quelle ricavate sotto strutture convenzionali (tabella 3).** Nelle condizioni della prova appare evidente la riduzione della fruttificazione delle piante coltivate sul piano più vicino a terra che, sotto la serra convenzionale come in quella di controllo, ha risentito della riduzione della luce dovuta al piano di coltivazione superiore e alla copertura della serra. A causa del decorso stagionale, caratterizzato da temperature particolarmente fresche, le produzioni sotto ombraio sono state piuttosto ridotte.

**Gli effetti su lattuga.** Un effetto che merita indagini più approfondite è stato quello osservato su lattuga, coltivata fuori suolo su due livelli, come fatto per la fragola. In questo caso **le piante**

**TABELLA 4 - Effetto della copertura fotovoltaica su piante di lattuga cv Iceberg <sup>(1)</sup>**

Ambiente di coltivazione <sup>(2)</sup>	Piano basso		Piano alto	
	durata del ciclo colturale <sup>(3)</sup> (gg.)	durata del ciclo colturale <sup>(3)</sup> (gg.)	peso al termine del ciclo colturale <sup>(4)</sup> (g/pianta)	
Serra CIGS-50	30	35	128,8 b	
Serra convenzionale	45	50	150,5 ab	
Pieno campo	60	55	162,1 a	

(1) Inizio della prova: 28-4-2011. Lattuga cv. Iceberg. Dimensione delle parcelle: 10 m<sup>2</sup>/replicazione, 3 repliche. (2) Le caratteristiche degli ambienti di coltivazione sono riportate in *tabella 1*.

(3) Il rilievo relativo all'accrescimento è stato effettuato sulla coltura ogni 5 giorni. (4) I valori seguiti dalla medesima lettera non differiscono tra loro statisticamente secondo il test di Duncan (P = 0,05).

In serra fotovoltaica la lattuga ha completato prima il ciclo colturale e i cespi sono risultati più leggeri di quelli raccolti in pieno campo o in serra convenzionale.

allevate sotto la serra fotovoltaica hanno completato prima il proprio ciclo colturale rispetto a quelle coltivate negli altri ambienti e in particolare sotto la serra convenzionale (*tabella 4*). Tale osservazione è stata accompagnata dalla misura del peso delle piante a maturità commerciale. Come si può notare, a fronte di un apparente accorciamento del ciclo colturale, identificato dal momento in cui il cespo della lattuga raggiunge le dimensioni idonee per il mercato, i cespi delle piante coltivate sotto la serra fotovoltaica sono risultati più leggeri di quelli raccolti sotto la serra convenzionale. A parità di impressione visiva, le piante coltivate sotto la serra fotovoltaica hanno quindi risentito della pur limitata riduzione della radiazione fotosinteticamente attiva: questa ha favorito una rapida distensione della lamina fogliare che ha fatto raggiungere alle piante le dimensioni mercatali finali, ma senza il necessario incremento di peso.

### Culture possibili in serre fotovoltaiche

Considerando le numerose prove effettuate a partire dal 2007 presso il Cersaa, in buona parte già pubblicate (Minuto *et al.*, 2010) o discusse in questo lavoro, e le osservazioni compiute nel corso di indagini eseguite all'interno di serre fotovoltaiche realizzate in alcune regioni italiane, si è redatta una tabella di sintesi (*tabella 5*) nella quale viene indicato, in relazione alla copertura fotovoltaica posta sul tetto della serra, quali culture possono essere coltivate in modo redditizio, ovvero quali sono capaci di fornire produzioni che rientrano negli standard di qualità richiesti dal mercato.

La riduzione della radiazione solare totale, e di quella fotosinteticamente at-

tiva in particolare, viene avvertito dalla maggior parte delle culture poste all'interno di serre fotovoltaiche. In alcuni casi le alterazioni sono limitate, in altri casi appare grave la difformità di produzione tra le piante coltivate nelle aree più costantemente investite dalla radiazione solare diretta e quelle coltivate sotto le falde del tetto completamente tamponate con pannelli fotovoltaici totalmente oscuranti.

### Vantaggi dei moduli a celle distanziate

Dai risultati ottenuti su numerose culture appare quindi evidente l'effetto negativo della pannellatura fotovoltaica quando questa viene disposta in maniera continua e totalmente oscurante su una delle due falde del tetto, cioè occupando il 50% della copertura della serra. Al contrario, un valore di intercettazione della radiazione solare pari al 50% è ampiamente tollerato da molte specie quando i coni d'ombra proiettati dai pannelli a terra, e quindi sulle culture, sono di piccole dimensioni e in rapido spostamento, in conseguenza del movimento relativo del sole rispetto alla terra.

Questo effetto è particolarmente evidente nel caso di pannelli in cui le celle di silicio vengono allontanate tra loro, oppure nel caso dei materiali fotovoltaici amorfi (CIS e CIGS), disposti a strisce o all'interno di cilindri di vetro tra loro adeguatamente distanziati. Relativamente a questi ultimi, l'ostacolo principale alla loro industrializzazione all'uso anche in campo agricolo è rappresentato dal costo del prodotto finito, sovente più elevato per i maggiori costi di produzione, dagli ancora ridotti volumi di vendita rispetto al silicio. Questa è stata una delle cause

**TABELLA 5 - Dati riepilogativi <sup>(1)</sup> sulla possibilità di coltivare orticole sotto serre fotovoltaiche**

Colture orticole	Percentuale di ombreggiamento del suolo		
	50% (pannelli contigui su singola falda)	20-30% (pannelli o celle non contigue, moduli silicio o CIS)	50% (pannelli o celle non contigue, moduli CIGS cilindrici)
Zucchini	No	Sì	Sì
Lattuga	Sì, difformità produttiva.	Sì, raccolta anticipata <sup>(2)</sup>	Sì, raccolta anticipata <sup>(2)</sup>
Lattughe da taglio	Produzione commerciabile in parte		
Fragola	No, eccessiva difformità produttiva. Produzione non commerciabile	Sì	Sì
Pomodoro			

(1) Risultati di prove sperimentali e rilevazioni compiute dal Cersaa dal 2007 al 2011. (2) La riduzione, anche modesta, della PAR provoca una più rapida distensione della lamina fogliare delle piante, che può essere erroneamente identificata con un più rapido completamento del ciclo colturale.

Gli effetti dell'ombreggiamento sono maggiormente tollerati dalle culture sotto coperture realizzate con moduli le cui celle sono adeguatamente distanziate tra loro.

principali della recente sospensione della produzione di moduli CIGS cilindrici da parte di Solyndra, in una fase di mercato in cui il prezzo di vendita della cella di silicio si è fortemente ridotto. L'auspicio è che moduli come quelli prodotti da Solyndra possano rapidamente tornare sul mercato, avendo dimostrato, nei saggi effettuati anche presso il Cersaa, la validità della soluzione per serre e ombrai.

**Giovanni Minuto, Federico Tinivella, Cinzia Bruzzone, Andrea Minuto**

*Cersaa - Centro regionale di sperimentazione e assistenza agricola - Azienda speciale della Cciaa di Savona - Albenga (Savona)*

*Lavoro svolto con un contributo della Regione Liguria e dell'Istituto regionale per la floricultura di Sanremo (progetto «Fotovoltaico»), del Ministero delle politiche agricole, alimentari e forestali (progetto «Florenere»), del progetto Life+ «Sunflower», della Cciaa di Savona (progetto perequativo «Energy for farms»).*

*Gli autori desiderano ringraziare, inoltre, Würth Solar, Solarkey, Solyndra e Gome per lo sviluppo e la messa a punto degli impianti fotovoltaici, Solar refeel e il Consorzio Ingauno energia pulita per la consulenza sui prodotti e lo sviluppo degli impianti, e lo Studio Napoletano per la progettazione esecutiva della parte elettrica.*

**GLOSSARIO. Per le definizioni dei vocaboli tecnici presenti in questo articolo si veda il Glossario pubblicato a pag. XX**

Per commenti all'articolo, chiarimenti o suggerimenti scrivete a: [redazione@informatoreagrario.it](mailto:redazione@informatoreagrario.it)

Per consultare gli approfondimenti e/o la bibliografia: [www.informatoreagrario.it/rdLia/11ia24\\_5091\\_web](http://www.informatoreagrario.it/rdLia/11ia24_5091_web)

## Come sono state impostate le prove

Gli effetti del parziale ombreggiamento sulle colture sono stati misurati simulando in successione la coltivazione di specie orticole (*Ocimum basilicum*, *Lycopersicum esculentum*, *Cucurbita pepo* subsp. *pepo*, *Eruca sativa*, *Diploaxis tenuifolia*, *Borago officinalis*, *Fragaria vesca*, *Lactuca sativa*) e ornamentali (risultati non riportati). Le colture orticole sono state allevate fuori suolo su un substrato organominerale adatto alla loro coltivazione.

Per valutarne gli effetti in situazioni più rappresentative della condizione media di un'azienda, in alcuni casi gli impianti fotovoltaici sono stati installati su serre già esistenti che, come normalmente accade, non sono state costruite in funzione della migliore esposizione alla radiazione solare, bensì in relazione allo spazio disponibile in azienda.

### Impianti con moduli in silicio.

Su parte della falda est-sudest del tetto di una preesistente serra del tipo a campata (9,2 m di larghezza, 24,0 m di lunghezza e 3,5 m di altezza alla gronda; inclinazione delle falde pari a 30°), realizzata in ferro e vetro, sono stati installati, in modo completamente integrato, 34 moduli fotovoltaici. I moduli, ciascuno con potenza pari a 90 Wp, sono stati realizzati con celle di silicio policristallino racchiuse tra due lastre di vetro (formando il cosiddetto «sandwich fotovoltaico») e poste tra loro a una distanza tale da intercettare il 60% della radiazione solare. Dal momento che i moduli sono stati montati solo su una delle due falde di copertura, la porzione di suolo ombreggiata dall'impianto è risultata pari al 30%. La dimensione del modulo (200 cm di lunghezza, 60 cm di larghezza e 5 mm di spessore), di lunghezza maggiore di quella del vetro giardinoiera che sostituisce (150 × 60 cm), è stata determinata dal costruttore (Solarkey e Consorzio Ingauno per l'energia pulita) in modo da ridurre al minimo gli interventi di montaggio dell'impianto sulle serre. La superficie fotovoltaica netta è risultata di 24,48 m<sup>2</sup> e la potenza complessiva dell'impianto di 3,06 kWp. La distribuzione delle celle nel pannello ha causato la proiezione a terra di coni d'ombra di forma rettangolare.

Sulla stessa serra, sempre sulla falda est-sudest, è stato installato un im-

pianto analogo al precedente, con la differenza che la distanza tra le celle è stata aumentata in modo da intercettare il 30% della radiazione totale. Dal momento che i moduli sono stati montati solo su una delle due falde di copertura, la porzione di suolo ombreggiata dall'impianto è risultata pari al 15%. Il valore della potenza di ciascun modulo è scesa in questo caso a 45 Wp. La superficie fotovoltaica netta è risultata di 12,24 m<sup>2</sup> e la potenza complessiva di 1,53 kWp. La distribuzione delle celle sul pannello ha causato la proiezione a terra di coni d'ombra di forma quadrata.

**Impianto con moduli CIS.** Su una serra costruttivamente identica alla precedente è stato realizzato, sostituendo i preesistenti vetri giardinoiera (150 × 60 cm, 4 mm di spessore), un impianto fotovoltaico completamente integrato e composto da 108 moduli fotovoltaici di dimensione (120 × 60 cm, 7 mm di spessore). Il modulo utilizzato (37,96 Wp di potenza) è stato realizzato con diseleniuro di rame e indio (CIS) da Würth Solar. All'interno del sandwich, costituito da due lastre di vetro di 3 e 4 mm di spessore, sono state poste a file 20 celle fotovoltaiche rettangolari (60 × 5 cm) distanti tra loro 5 cm, oscurando in tal modo soltanto il 50% della superficie del sandwich stesso. I moduli sono stati successivamente montati sul copertura in modo tale che la porzione di suolo ombreggiata è risultata pari al 25%. La superficie fotovoltaica netta è risultata pari a 48,6 m<sup>2</sup> per una potenza complessiva di 4,1 kWp. In questo caso la distribuzione delle celle nel modulo ha causato la proiezione a terra di sottili coni d'ombra di forma rettangolare.

**Impianti con moduli CIGS.** In questo caso le coperture degli apprestamenti protetti, costruiti *ex novo*, sono state realizzate con moduli prodotti da Solyndra: le celle fotovoltaiche al diseleniuro di rame, indio e gallio (CGIS) sono disposte all'interno di cilindri di vetro distanti tra loro 8 cm. Questi moduli sono capaci di intercettare il 50% della radiazione totale incidente sul pannello e di lasciare, per la restante parte, spazio libero al passaggio dell'aria e dell'acqua meteorica. Tali pannelli risultano pertanto adat-

ti alla realizzazione sia di impianti su serra sia di ombrai, che in questo caso sono stati entrambi frutto di una progettazione integrata con la struttura stessa della serra. Sulla serra l'impianto è composto da 96 pannelli fotovoltaici (182 × 108 cm, 50 mm di spessore), ciascuno con una potenza di 100 Wp. L'inclinazione delle due falde del tetto è pari a 5°. Sull'ombraio l'impianto è stato montato con lo stesso principio costruttivo della serra, con identici pannelli disposti su un unico piano orizzontale. Per questi impianti si è optato per un'orientamento est-ovest dell'asse maggiore della struttura (ombraio o serra), in relazione alle particolari caratteristiche dei moduli utilizzati, il cui rendimento è massimo quando l'asse dei cilindri fotovoltaici è orientato in direzione nord-sud.

Al di sotto dell'impianto installato come ombraio, sia con funzione ombreggiante sulle colture sia riflettente della luce verso i pannelli fotovoltaici (con conseguente aumento della produzione), è stato montato un telo bianco capace, assieme ai pannelli fotovoltaici, di intercettare circa l'80% della radiazione totale.

### Strumentazione e metodo di

**analisi dei dati.** I dati di luminosità interna degli ambienti protetti sono stati rilevati con il fotoradiometro Delta Hom mod. HD 2102.2, collegato a sonde fotometriche e radiometriche con modulo Sicram in grado di misurare illuminamento (lux), luminanza (cd/m<sup>2</sup>), PAR (μmol/m<sup>2</sup>s), irradiazione (RAD, UVA, UVB, UVC; W/m<sup>2</sup>). Le misurazioni all'infrarosso sono state realizzate mediante l'impiego della termocamera IR Nec Avio Infrared Tech. mod. ThermoShot F30, tarata per ogni misurazione secondo le procedure indicate dalla ditta produttrice. La gestione climatica delle serre è stata gestita dal sistema computerizzato Mcx prodotto da Agricontrol di Albenga.

I dati raccolti negli ambienti posti a confronto sono stati analizzati mediante applicazione del test t di Student, accettando una probabilità di errore del 5% e ipotizzando una distribuzione normale dei dati raccolti, utilizzando il programma di analisi statistica SPSS per Windows versione 13.0. ●