



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi comparativa e sviluppo di sistemi di distribuzione del freddo negli impianti di raffrescamento solare per serra

Giuliano Vox, Ileana Blanco, Evelia Schettini

ANALISI COMPARATIVA E SVILUPPO DI SISTEMI DI DISTRIBUZIONE DEL FREDDO NEGLI IMPIANTI DI RAFFRESCAMENTO SOLARE PER SERRA

Giuliano Vox, Ileana Blanco, Evelia Schettini

(Università degli Studi di Bari, Dipartimento di Scienze Agro-Alimentari e Territoriali)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

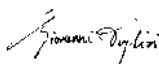
Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: Tecnologie "green" per gli edifici

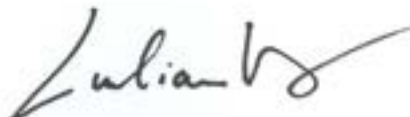
Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi comparativa e sviluppo di sistemi di distribuzione del freddo negli impianti di raffrescamento solare per serra"

Responsabile scientifico ENEA: Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Università di Bari: Giuliano Vox



SOMMARIO	4
1. INTRODUZIONE	5
2. LE ENERGIE RINNOVABILI APPLICATA AL SETTORE DELLE PRODUZIONI AGRICOLE IN SERRA.....	20
2.1 ENERGIA EOLICA	20
2.2 ENERGIA SOLARE FOTOVOLTAICA	21
2.3 ENERGIA SOLARE TERMICA.....	22
2.4 L'ENERGIA GEOTERMICA.....	23
2.5 BIOENERGIE.....	25
3. SOSTENIBILITÀ ENERGETICA NEL CONTROLLO CLIMATICO DELLE SERRE	26
3.1 IL CONDIZIONAMENTO ESTIVO DELLE SERRE	27
3.1.1 OMBREGGIAMENTO	29
3.1.2 VENTILAZIONE.....	30
VENTILAZIONE NATURALE.....	30
VENTILAZIONE FORZATA.....	32
3.1.3 SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO AD EVAPORAZIONE D'ACQUA.....	32
SISTEMI A FILTRI EVAPORATIVI	33
FOG SYSTEMS	36
4. IL SISTEMA AD ASSORBIMENTO ALIMENTATO CON ENERGIA SOLARE PER IL CONDIZIONAMENTO CLIMATICO ESTIVO DELLA SERRA SPERIMENTALE PRESSO L'UNIVERSITÀ DI BARI	36
IL SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO	38
LE MISURE IN CAMPO	43
5. PUBBLICAZIONI	49
6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	49
7. BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	55

Sommario

Al fine di verificare l'applicabilità di sorgenti di energia rinnovabile al comparto serricolo è stata sviluppata un'attività di ricerca inerente l'applicazione di una tecnologia per il raffrescamento di una serra basata sullo sfruttamento dell'energia solare, mediante un sistema di solar cooling. A tal fine presso il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali dell'Università di Bari sono state svolte delle ricerche per individuare le soluzioni tecnologiche più idonee, in particolare sono state investigate le soluzioni più efficaci per la distribuzione del freddo alle piante.

Il test sperimentale è stato realizzato presso una serra sita al Centro sperimentale P. Martucci dell'Università di Bari A. Moro, in località Valenzano (BA).

Sono stati realizzati 2 diversi sistemi di distribuzione del freddo in serra: un sistema composto da tubi installati in posizione centrale sui vasi di coltivazione e un sistema di distribuzione posizionato in corrispondenza del bordo dei vasi. Nel caso di sistema di distribuzione del freddo installato a bordo dei vasi, sono state posizionate delle superfici disperdenti poste a contatto con la serie di tubi disperdenti, realizzate con piastre in alluminio non verniciate; le piastre sono state coibentate con pannelli di polistirolo sulla parte opposta rispetto all'area di coltivazione.

I dati rilevati sperimentalmente durante il funzionamento del sistema di solar cooling hanno mostrato che le temperature dell'aria nella zona raffrescata si sono mantenute prossime a 30 °C, quindi in un range di sicurezza per quanto riguarda le piante.

I dati rilevati per il periodo di accensione del solar cooling nel periodo estivo hanno registrato in media valori della potenza frigorifera erogata di circa 312.5 Wm^{-2} , riferito all'unità di superficie della zona di coltivazione.

I dati di temperatura misurati per i tubi delle linee di coltivazione hanno rilevato una maggiore dissipazione frigorifera nel caso del sistema composto da tubazione e superfici metalliche di dispersione rispetto al caso di presenza della sola tubazione centrale.

1. Introduzione

Nell'ambito delle produzioni mondiali agro-alimentari si è osservata una crescente richiesta di prodotti di qualità disponibili in tutti i periodi dell'anno. In quest'ottica si inserisce il crescente interesse per sistemi di coltivazione realizzati in serra che consentono la realizzazione di un ambiente di coltivazione in cui i parametri climatici possono essere controllati, consentendo quindi di ottenere prodotti salubri e freschi per tutto l'anno. L'esigenza di un elevato controllo microclimatico comporta nel contempo elevati consumi energetici, oggi in gran parte soddisfatti mediante l'uso di fonti fossili non rinnovabili. I consumi del settore sericolo mondiale contribuiscono quindi al complesso dei consumi energetici con effetti negativi sulla sostenibilità globale.

Un problema critico della società mondiale è rappresentato dagli altissimi consumi energetici legati allo svolgimento delle diverse attività umane, quali attività produttive, commerciali, economiche, trasporti, comunicazioni, ecc. In base ai dati dell'International Energy Agency (IAE, 2017), un terzo del consumo mondiale di energia è rappresentato dai consumi della Cina e degli Stati Uniti; se ai consumi di questi due paesi si aggiungono i consumi dell'India e della Federazione Russa, i consumi complessivi di soli 4 paesi rappresentano la metà del consumo mondiale di energia (figura 1 e Tabella 1).



Figura 1: Consumi mondiali di energia nel 2015 (fonte: International Energy Agency, 2017)

Tabella 1: Consumo mondiale di energia dei paesi più energivori nel 2015
(fonte: International Energy Agency, 2017)

Paesi	Consumi di energia nel 2015 (Mtoe)
Repubblica popolare della Cina	1910
Stati Uniti d'America	1520
India	578
Federazione Russa	457
Giappone	291
Brasile	227
Germania	220
Canada	193
Repubblica islamica dell'Iran	176
Corea	174
Indonesia	163
Francia	148
Arabia Saudita	145
Gran Bretagna	125
Nigeria	120

Messico	120
Italia	119

L'incremento del fabbisogno energetico di una nazione è funzione dell'aumento della popolazione e della crescita economica; una crescente industrializzazione e urbanizzazione si sta manifestando negli ultimi anni nei Paesi emergenti e in quelli in via di sviluppo.

L'Organizzazione delle Nazioni Unite (ONU) stima che, a fronte degli attuali 7,6 miliardi, la popolazione mondiale sia destinata ad arrivare nel 2050 a 9,8 miliardi in particolar modo nei paesi in via di sviluppo (Tabella 2) (United Nations, 2017).

Tabella 2: Proiezione dell'aumento della popolazione mondiale (fonte: United Nations, 2017).

	Popolazione (milioni)		
	2017	2030	2050
Mondo	7550	8551	9772
Africa	1256	1704	2528
Asia	4504	4947	5257
Europa	742	739	716
America Latina e Caraibi	646	718	780
America del Nord	361	395	435
Oceania	41	48	57

L'International Energy Agency (IAE, 2017) ha valutato la dipendenza o l'autosufficienza energetica di un paese dividendo il valore della fornitura totale di energia primaria del paese in esame con la sua produzione energetica (figura 2). Nel mondo i paesi mondiali energeticamente autosufficienti (cioè quei paesi che sono in grado di produrre il 100% dell'energia necessaria per portare avanti il proprio sistema economico senza dover importare nessuna risorsa energetica) sono pochi, tra questi la Norvegia, l'Australia, la Russia e il Canada. L'Arabia Saudita, il Venezuela e il Brasile, invece, pur dotati di idrocarburi, importano parte della loro energia sotto forma di prodotti petroliferi raffinati a causa della loro scarsa capacità di raffinazione. I paesi che hanno una percentuale di autosufficienza superiore al 100%, possono esportare energia verso altri paesi. L'Italia ha una dipendenza energetica da fonti esterne di circa il 76%, al di sopra della media europea (53,2%).

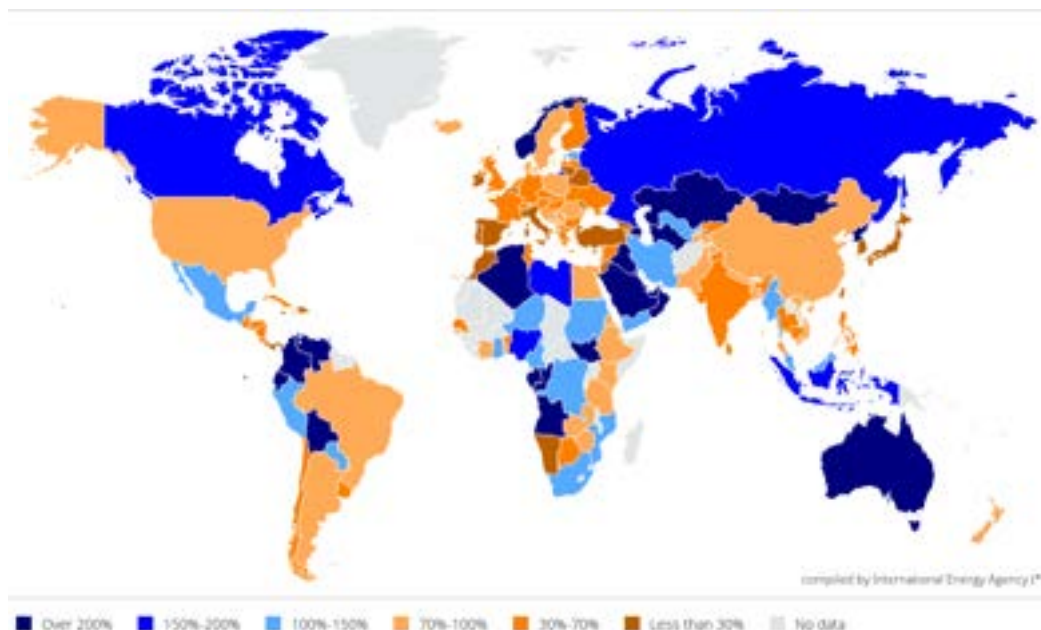


Figura 2: Autosufficienza o dipendenza energetica dei diversi paesi nel mondo nel 2015
(fonte: International Energy Agency, 2017)

Il consumo energetico pro capite nel mondo è rappresentato per il 2015 nella figura 3 (IAE, 2017) e per il periodo 1970-2015 nella figura 4 (IAE, 2017). Nel nostro Paese nel 2015 il consumo di energia è stato pari a 2,5 toe pro capite, valore inferiore alla media dei paesi dell'Ue e a quello degli altri paesi di grandi dimensioni. I consumi energetici pro capite in Italia hanno subito una contrazione verificatasi a causa della crisi economica che ha investito il paese dal 2005 ad oggi, contrazione dopo un trend positivo dal 1970 al 2005 (figura 4).

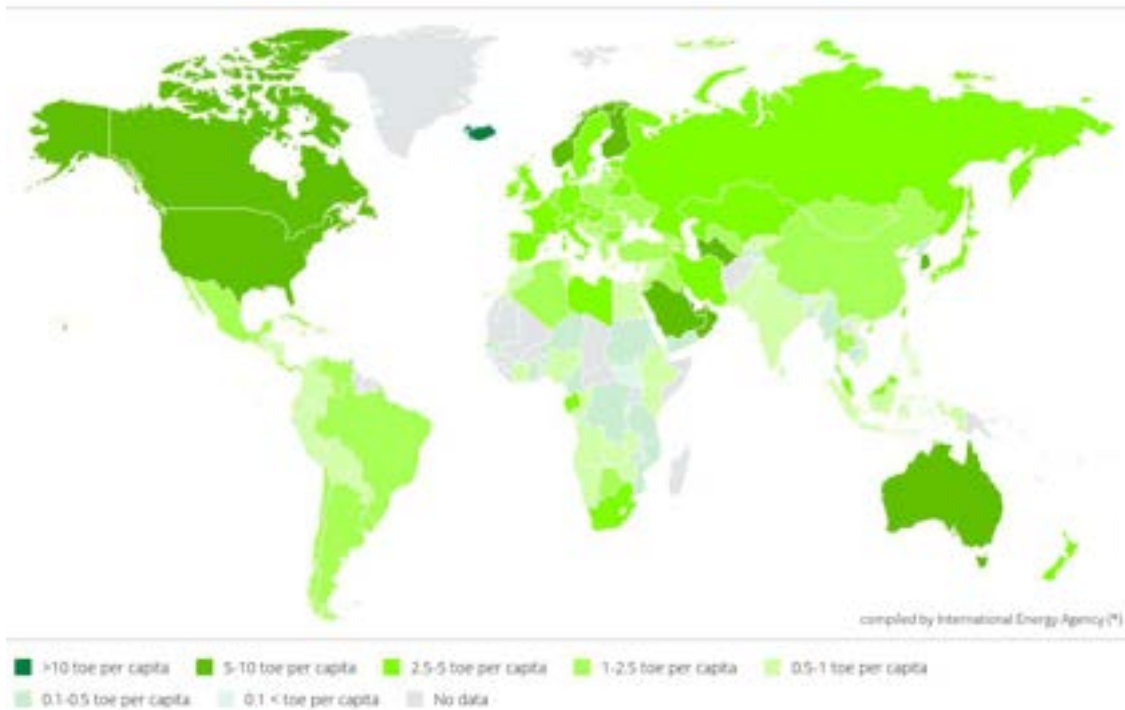


Figura 3 : Consumo energetico pro capite nei diversi paesi nel 2015
(fonte: International Energy Agency, 2017).

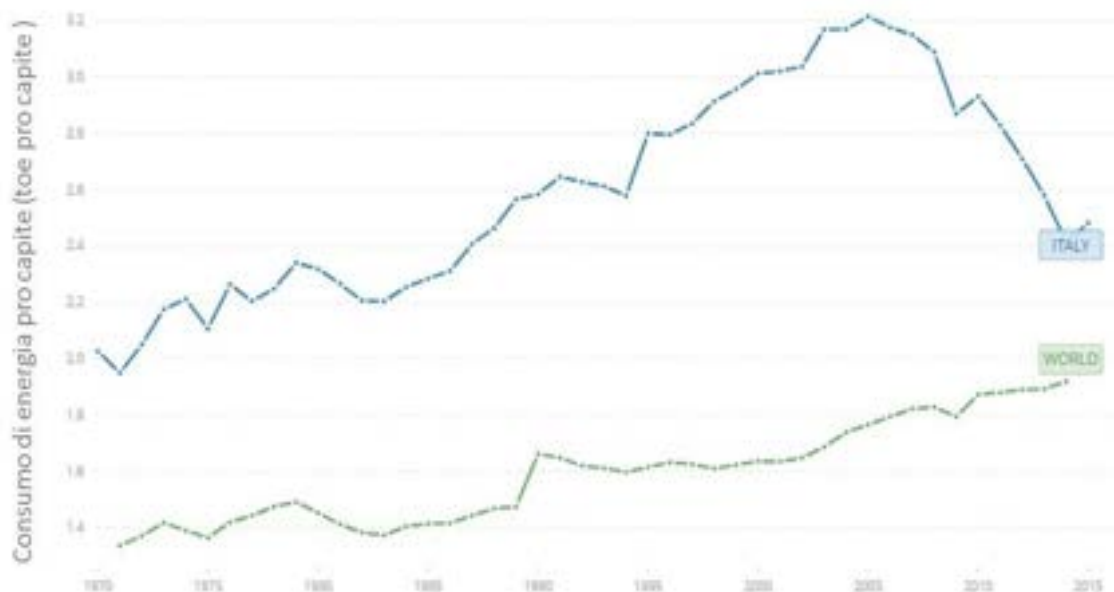


Figura 4: Consumo di energia pro capite nel mondo e in Italia dal 1970 al 2015 (fonte: International Energy Agency, 2017).

La figura 5 evidenzia le fonti utilizzate per la generazione di energia in Italia dal 1970 al 2015 (IAE, 2017); negli ultimi anni, le fonti rinnovabili di energia (FER) stanno avendo un notevole sviluppo e diffusione per la produzione di energia elettrica, per la produzione di calore e come biocarburanti per autotrazione.

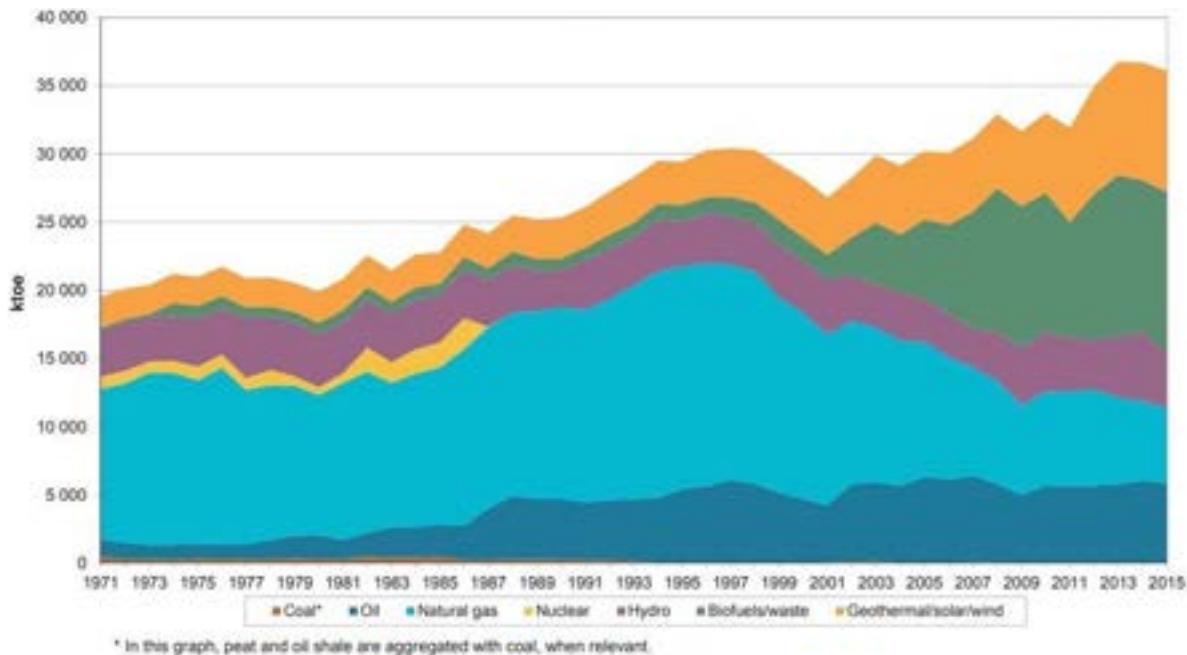


Figura 5: Le fonti di produzione di energia in Italia dal 1970 al 2015 (fonte: International Energy Agency, 2017).

L'utilizzo di fonti rinnovabili insieme alla promozione dell'efficienza energetica sicuramente contribuirà all'ottimizzazione, alla razionalizzazione e alla riduzione dei consumi energetici in tutti i settori produttivi (Allouhi et al., 2015; Al-Alili et al., 2012; Chidambaram et al., 2011; Ghaddar et al., 1997; Ghafout e Munir, 2015; Puglisi et al., 2015; Hasanuzzaman et al., 2016; Hwang et al., 2008; Kalkan et al., 2012; Mussard, 2017). Le fonti di energia rinnovabile, quali fotovoltaico ed eolico, caratterizzate da un'intrinseca variabilità ed intermittenza nella produzione di energia, possono richiedere l'utilizzo di idonei sistemi di back-up di energia per poter garantire continuità nella fornitura all'utenza ed essere, quindi, utilizzate in maniera attendibile in zone remote dove non risulti conveniente e affidabile utilizzare la rete elettrica di distribuzione come serbatoio con capacità infinita di accumulo energetico.

Il sistema agricolo e agroindustriale comprende l'agricoltura (produzione primaria), l'industria agroalimentare di trasformazione (produzione secondaria) e la rete di distribuzione dei prodotti alimentari. Il comparto agricolo e agroindustriale, dunque, richiede calore ed elettricità per la produzione, trasformazione, conservazione e distribuzione dei prodotti di origine animale e vegetale, per il funzionamento delle macchine e la climatizzazione degli ambienti di produzione, trasformazione e distribuzione.

Nel 2014 il consumo di energia diretta nell'Unione Europea nel settore dell'agricoltura e della silvicoltura è stato pari a 26.6 Mtep ed ha rappresentato circa il 2.2% del consumo energetico globale finale EU (Tabella 3; European Commission, 2016b). Tuttavia in questo conteggio non è inclusa l'energia indiretta impiegata in agricoltura per fertilizzanti, pesticidi, mangimi e macchine agricole. In

Italia il consumo di energia diretta è stato pari a 2.6 Mtep nel 2014 (Tabella 3).

Il settore agricolo e agroindustriale consuma in Italia circa il 13% dell'energia totale, valore inferiore al valore europeo che è pari al 26% dei consumi (Capiotti et al., 2013; Capiotti et al., 2016).

Tabella 3: Utilizzo di energia in agricoltura e silvicoltura (fonte: European Commission, 2016b).

Indicator	C.44 - Energy use in agriculture, forestry and food industry			
Sub-indicator	Direct use of energy in agriculture and forestry		Direct use of energy in agriculture and forestry	
Measurement	Total in kilotonnes (1000 tonnes) of oil equivalent, kToe	kg of oil equivalent per ha of UAA+forestry area	% of total final energy consumption	difference in kg of oil equivalent per ha of UAA+forestry area 2008-2014
Source	Eurostat - Energy Statistics		Eurostat - Energy Statistics	
Year	2014		2014	2008-2014
Unit	kilotonnes	kg	%	kg
Country				
Belgium	645	320	1.9	-108
Bulgaria	191	22	2.1	0
Czech Republic	595	96	2.6	12
Denmark	628	192	4.6	-26
Germany	:	:	:	0
Estonia	130	41	4.6	10
Ireland	224	43	2.1	-15
Greece	256	28	1.6	-100
Spain	2,656	63	3.4	-1
France	4,237	92	3.0	0
Croatia	206	65	3.3	-5
Italy	2,585	117	2.3	-9
Cyprus	37	133	2.3	6
Latvia	144	28	3.7	4
Lithuania	104	20	2.2	-3
Luxembourg	25	116	0.6	3
Hungary	593	80	3.9	12
Malta	5	407	0.9	n.a.
Netherlands	3,383	1,527	7.2	1
Austria	537	82	2.0	5
Poland	3,434	144	5.6	-3
Portugal	338	49	2.1	-2
Romania	421	20	1.9	6
Slovenia	74	43	1.6	-1
Slovakia	137	36	1.4	-1
Finland	687	28	2.8	-2
Sweden	360	12	1.2	-10
United Kingdom	975	48	0.8	6
EU-28	23,608	70 excl. DE	2.2	-5
EU-15	17,537	70	2.0	-7
EU-N13	6,071	68 excl. DE	3.7	1

I consumi energetici in agricoltura in Italia, che mostrano un marcato aumento dal 2004 ad oggi, presentano come fonte dominante il petrolio, ed una lenta penetrazione dell'energia elettrica, del gas metano e per ultimo delle rinnovabili (figura 6; MISE, 2005). Nel 2014 le emissioni di gas a effetto serra nel settore dell'agricoltura nell'Unione Europea ammontavano a 436 milioni di tonnellate di CO₂, ovvero al 10.2% delle emissioni globali nel 2014. Il contributo dell'Italia nell'ambito delle emissioni dell'agricoltura nell'Unione Europea è risultato pari a circa il 7% (Tabella 4; EEA, 2016).

L'uso di fonti rinnovabili e opportuni interventi di efficientamento tecnologico in agricoltura, e nel comparto serricolo in particolare, potrebbero ridurre le emissioni di gas a effetto serra e ridurre del 25% i consumi di energia nell'irrigazione e fino al 70% nei sistemi di riscaldamento e raffrescamento, a

livello nazionale, con un ritorno degli investimenti compreso tra 5 e 7 anni.

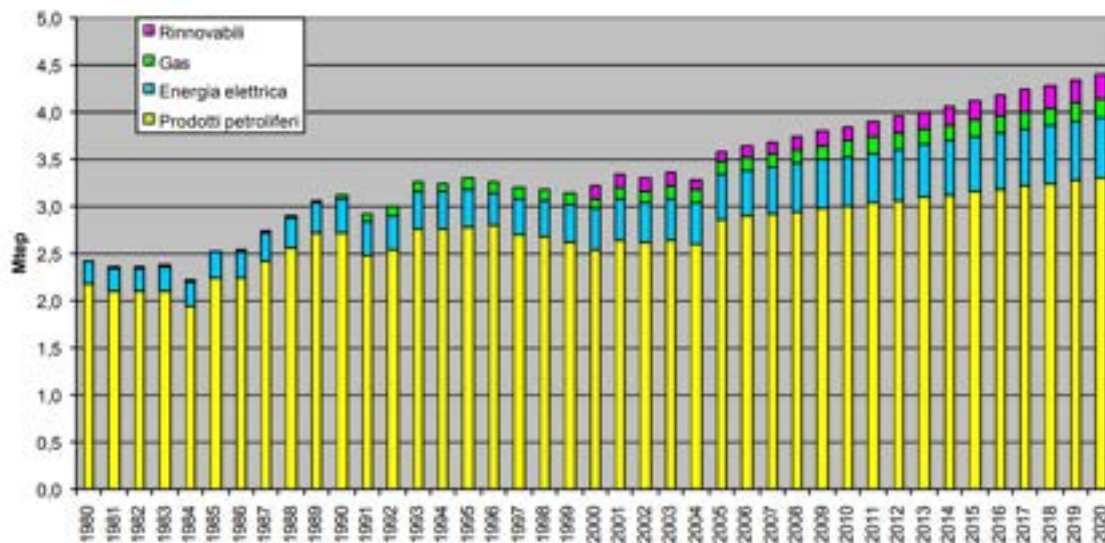


Figura 6: Dati storici e previsionali dei consumi dell'agricoltura per fonte in Italia (fonte: MISE, 2005).

Tabella 4: Emissioni di gas a effetto serra (Greenhouse gas emissions – GHG) nel settore dell'agricoltura nell'Unione Europea per stato membro e gas, 1990-2014 (fonte: EEA, 2016).

Greenhouse gas emissions in the EU agricultural sector from 1990 – 20230* by member states and gases (in 1000 tons of CO ₂ eq)												
	Enteric ferm	Man Man	Soils	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	Total GHG emissions					Change (Total GHGs)
	2014	2014	2014	2014	2014	2014	1990	2005	2014	2025*	2030*	2005-2030*
Denmark	34%	28%	38%	42%	55%	2%	12728	10966	10570	11057	11248	2.6%
Germany	38%	15%	45%	46%	49%	4%	77698	62920	66070	61161	60826	-3.3%
Greece	46%	13%	40%	42%	58%	0%	10186	8770	8743	8712	8946	2.0%
Spain	31%	27%	40%	43%	55%	2%	34856	38087	37406	38221	39387	3.4%
France	43%	11%	47%	47%	51%	2%	83101	78403	78783	75123	74283	-5.3%
Ireland	57%	9%	34%	35%	63%	2%	20124	19192	18754	20665	21367	11.3%
Italy	45%	17%	37%	38%	61%	1%	36200	33124	30338	30244	29005	-12.4%
Netherlands	45%	27%	28%	31%	68%	0%	25264	18746	18395	18425	18402	-1.8%
Austria	58%	12%	29%	34%	64%	2%	8104	7017	7074	6795	6787	-3.3%
Portugal	48%	19%	33%	33%	66%	1%	7528	7298	7202	8069	7976	9.3%
Sweden	44%	8%	48%	51%	48%	2%	8004	7229	7143	6503	6567	-9.2%
Finland	32%	11%	56%	57%	39%	3%	7467	6414	6475	5979	5972	-6.9%
UK	54%	11%	35%	36%	61%	3%	52985	45813	44556	41235	40367	-11.9%
Cyprus	42%	37%	22%	34%	65%	0%	536	630	560	722	780	23.7%
Czech Rep.	34%	25%	41%	54%	43%	3%	17616	8335	8287	7820	7792	-6.5%
Estonia	43%	12%	46%	50%	49%	1%	2683	1083	1318	1321	1359	25.5%
Hungary	31%	17%	52%	57%	41%	2%	10108	6128	6533	6015	5907	-3.6%
Lithuania	42%	10%	47%	51%	48%	1%	7939	3747	3887	3920	3885	3.7%
Latvia	32%	7%	61%	63%	36%	1%	5454	2271	2726	2612	2640	16.2%
Malta	40%	29%	31%	45%	55%	0%	82	103	89	88	89	-13.4%
Poland	40%	12%	47%	51%	46%	3%	46848	29322	30410	32823	32941	12.3%
Slovenia	53%	20%	27%	32%	68%	1%	1931	1782	1699	1792	1839	3.2%
Slovakia	34%	12%	54%	58%	40%	2%	6654	3114	3112	2796	2769	-11.1%
Croatia	41%	14%	45%	48%	49%	3%	4171	2952	2300	2518	2560	-13.3%
Bulgaria	29%	14%	56%	63%	37%	1%	12954	5023	5092	6007	6015	19.7%
Romania	57%	13%	27%	32%	68%	0%	34661	19757	17522	17875	17670	-10.6%
Belgium	45%	20%	35%	41%	58%	1%	12164	10244	9942	9473	8886	-13.3%
Luxemburg	62%	14%	24%	28%	71%	1%	715	637	672	593	564	-11.5%
EU28	43%	15%	41%	43%	54%	2%	548762	439105	435639	428565	426830	-2.8%

Per far fronte alla crescente domanda di risorse alimentari correlata all'aumento di popolazione mondiale, alla carenza di suoli arabili ed ai crescenti standard qualitativi di vita risulta necessario utilizzare i terreni disponibili per l'agricoltura in modo sempre più efficiente. La coltivazione in serra consente il raggiungimento di una più elevata qualità del prodotto ed offre una mitigazione degli effetti negativi degli agenti atmosferici quali temperature estreme, grandine, neve, venti, siccità e pioggia e quindi un adattamento più graduale alle mutazioni delle condizioni esterne (Von Zabeltitz, 1999; Vox et al., 2010). Rispetto al pieno campo la coltivazione in serra può essere del tipo a ciclo continuo, indipendentemente da stagioni e disponibilità di terreno (Vadiee e Martin, 2014). La produttività di tali colture può arrivare ad essere venti volte più alta rispetto a quelle praticate in campo aperto per singola unità di superficie coltivata (Scarascia Mugnozza, 2001; Vadiee e Martin, 2014; Vox et al., 2010) e può portare ad abbassare del 25%-40% le perdite di acqua per evapotraspirazione (Scarascia Mugnozza, 1995; Harmanto Salokhe et al., 2005). Infatti, a fronte di una superficie esigua di aree agricole irrigate, nel 2014 tali aree hanno rappresentato circa il 51% dell'utilizzo globale di acqua in Europa; in particolare, nell'area mediterranea, l'uso di acqua per irrigazione è arrivata a rappresentare l'80% dell'utilizzo totale dell'acqua (Figura 7, European Commission, 2016a). Di particolare importanza risulta quindi la tutela anche di tale risorsa.

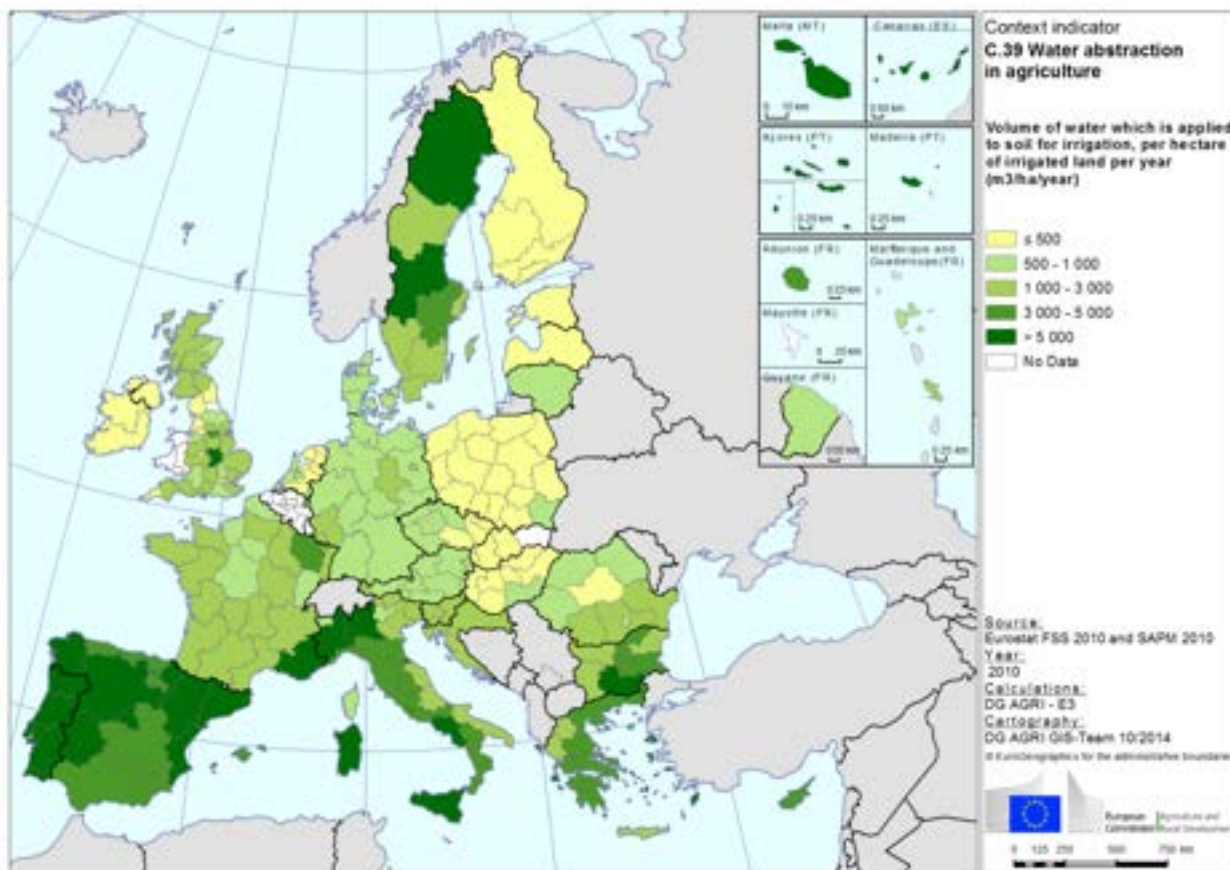


Figura 7: Utilizzo di acqua in agricoltura per irrigazione, per ettaro di area coltivata (fonte: European Commission, 2016a).

Le serre per le coltivazioni orto-floro-frutticole e vivaistiche sono diffuse nel mondo e si suppone per esse un'ulteriore incremento ed espansione in particolare nelle aree geografiche interessate dall'incremento di popolazione nei prossimi anni. L'espansione delle serre avvenuta negli ultimi decenni è il risultato di diversi fattori: l'aumento della domanda per prodotti di alta qualità, fuori stagione o esotici specialmente in Europa; i miglioramenti nei processi di trasporto e conservazione post-raccolta che hanno permesso la produzione in aree in via di sviluppo e la commercializzazione verso tutto il mondo (Pardossi et al., 2004). La coltivazione in serra può permettere lo sviluppo economico di regioni povere, come l'Almeria in Spagna, caratterizzate dall'aver inverni miti, facendo un uso efficiente di risorse (quali suolo ed acqua) tramite l'utilizzo di strutture serricole semplici strutturalmente ed economiche (Pardossi et al., 2004). Si ipotizza pertanto che le serre possano trovare sempre maggiore applicazione in futuro, in particolare nelle regioni con condizioni climatiche sfavorevoli, potendo garantire condizioni microclimatiche ottimali per lo sviluppo delle colture protette sfruttando la radiazione solare ed eventualmente il contributo di impianti di riscaldamento e raffrescamento (Scarascia Mugnozza, 2001).

I materiali di copertura delle serre attualmente utilizzati presentano scarse caratteristiche di isolamento termico, per cui attraverso la copertura della serra si verifica una perdita di energia tra il 20% e il 40%. I materiali usati per la copertura di una serra sono il vetro, i materiali plastici flessibili e materiali plastici rigidi.

La coltivazione in serra avviene in ambiente controllato e, dunque, risulta necessario impiegare mezzi tecnici, chimici, idrici ed energetici con conseguenti notevoli emissioni di gas serra in atmosfera ed effluenti inquinanti. Le serre commerciali richiedono un alto input energetico per il funzionamento di sistemi impiegati per ottenere le condizioni microclimatiche interne idonee allo sviluppo vegetativo

(Figure 8-10) e quindi buone rese e alta qualità dei prodotti, in particolare, nel settore orticolo e floricolo.



Figura 8: Interno di una serra floricola in Puglia: ventilatori dell'impianto di raffrescamento accoppiati con filtri evaporativi, presenti sul lato opposto della serra.



Figura 9: Interno di una serra floricola in Puglia: destratificatore, impianto di illuminazione, motore per l'apertura e chiusura degli schermi termici.



Figura 10: Impianto di fertirrigazione in una serra floricola in Puglia.

Se però da un lato la produzione in serra raggiunge alti livelli qualitativi e produttivi in raffronto alla coltivazione in pieno campo, occorre considerare che quello serricolo è tra i settori più energivori in agricoltura. La produttività delle colture protette può essere, infatti, fortemente influenzata anche da piccoli apporti di calore che creino un microclima ideale, pertanto le serre necessitano spesso dell'utilizzo di energia per impianti di riscaldamento in aggiunta all'energia necessaria per impianti di raffrescamento, illuminazione, irrigazione e fertirrigazione (figure 8-10).

Nel settore orticolo e floricolo, il costo dei mezzi tecnici e, soprattutto, il costo connesso a sistemi di riscaldamento fisso o di soccorso, che può arrivare a coprire il 70% dei costi di produzione, costituisce il maggiore ostacolo alla diffusione delle strutture serricole, limitando pertanto uno sviluppo ottimale delle colture (Scarascia Mugnozza e Anifantis, 2009).

I consumi energetici per il riscaldamento variano in relazione alla zona climatica presa in considerazione. Nei paesi del Sud Europa e del bacino mediterraneo, come in Italia, Grecia, Sud della Francia, Turchia, Marocco, Egitto ed aree dell'ex-Jugoslavia, i consumi correlati al funzionamento delle serre commerciali sono stimati intorno a 5-7 kgep (kilogrammi equivalenti di petrolio) all'anno per metro quadro di superficie coperta. Nei paesi del Centro-Nord Europa, come in Polonia, Olanda, Germania, si stimano consumi di circa 40-80 kgep/m²/anno. Le potenze energetiche richieste dai sistemi serra possono variare dai 30-50 W/m² per il Sud Italia ai 250-280 W/m² in Olanda e Germania.

Studi effettuati sulle specifiche colture hanno evidenziato le differenti esigenze energetiche di serre costruite in zone con differenti climi. Nell'area mediterranea le serre richiedono molta meno energia rispetto a quelle allocate nel Nord Europa. De Pascale e Maggio (2005) hanno riportato che nel Sud Italia un ettaro di serre di rose recise può richiedere circa 5.200-6.800 GJ/anno in confronto a 16.000 GJ/anno necessari per la stessa produzione in Olanda. Per ottenere una climatizzazione completa comprensiva di riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione si possono raggiungere potenze installate complessive pari anche a 400 W/m² (Campiotti et al., 2012).

In Italia, considerando una superficie dedicata a serre con strutture permanenti riscaldate in inverno pari a 6.000 ha, si stima un consumo energetico di 706.786 tep (tonnellate equivalenti di petrolio) per il riscaldamento, di 16.232 tep per il raffrescamento e di 8.598 tep per le ulteriori utenze elettriche, per un consumo totale di 0,73 Mtep (figura 11), equivalenti a 2,06 Mt CO₂ (Campiotti et al., 2011a).

La climatizzazione invernale produce non meno di 1,98 Mt CO₂/anno pari a circa 0.5% delle emissioni italiane di CO₂ in atmosfera.

La maggioranza delle serre mediterranee dipende da fonti di energie fossili quali gasolio, olio combustibile e GPL (Vox et al., 2010; Vadiée e Martin, 2012). Considerando i circa 200.000 ettari di serre presenti sul territorio europeo, il 30% è rappresentato da strutture permanenti dotate di impianti di climatizzazione basati sull'utilizzo di combustibili fossili (Campiotti et al., 2012).

Unitamente all'impiego di idonei sistemi per il controllo microclimatico e di strategie di efficientamento energetico, l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile risulta fondamentale per accrescere la sostenibilità energetica ed ambientale delle colture in ambiente protetto (Ahmed et al., 2011; Jain e Tiwari, 2002; Kumar et al., 2009; Mongkon et al., 2014; Sethi and Sharma, 2007; Cuze et al., 2016; Davies, 2005; Campiotti et al., 2016; Ghosal et al., 2004; Ghosal e Tiwari, 2006; Hassanien et al., 2016; Yildiz et al., 2012). Il crescente ricorso all'energia da fonti rinnovabili nasce inoltre da problemi di approvvigionamento delle fonti di origine fossile, in considerazione della loro esauribilità e delle fluttuazioni dei prezzi del petrolio.

Ricerca soluzioni tecnologiche che permettano un sempre maggiore impiego delle energie rinnovabili in campo agricolo e che possano essere applicate per il soddisfacimento del fabbisogno energetico delle strutture serricole, a discapito delle fonti energetiche di origine fossile, risulta essere una strategia fondamentale per lo sviluppo sostenibile del comparto stesso.

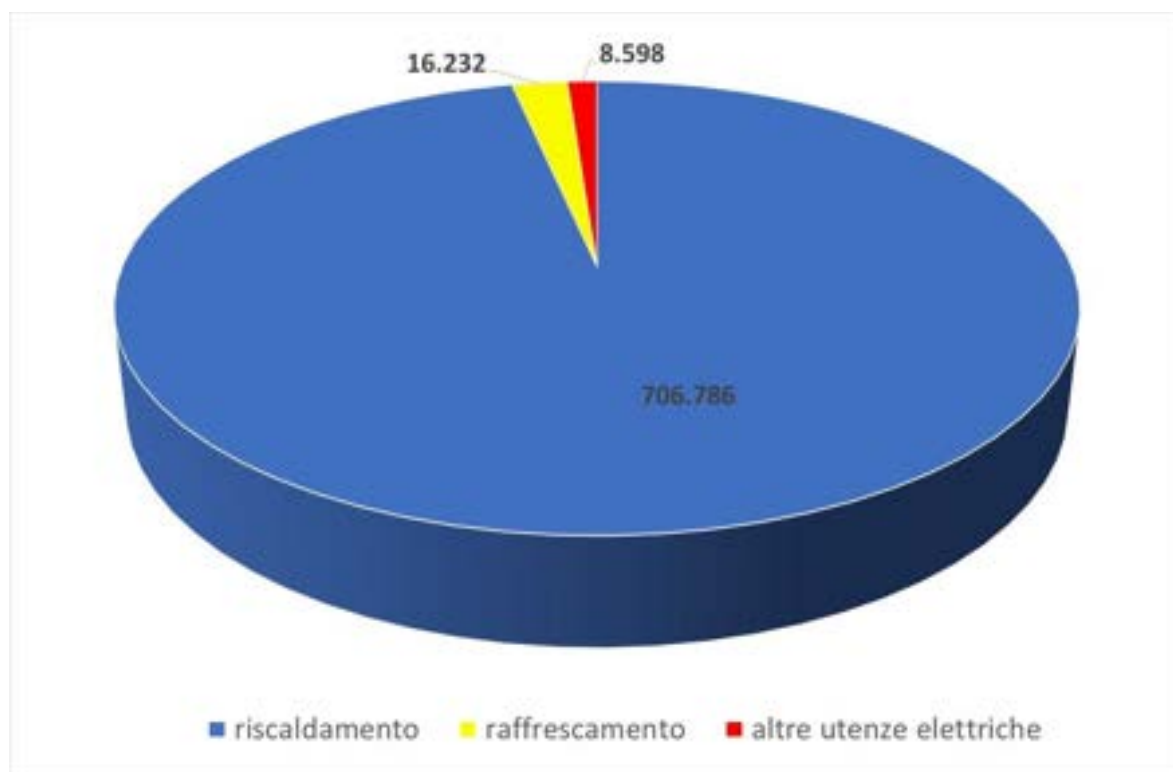


Figura 11: Consumo energetico in tep (tonnellate equivalenti di petrolio) per il riscaldamento, per il raffrescamento e per le altre utenze elettriche nelle serre in Italia.

In Italia occorre incrementare la produzione di prodotti di qualità (che richiedono una maggiore spesa energetica) e al contempo innalzare i livelli di sostenibilità ambientale del settore e ridurre i consumi energetici e le emissioni di CO₂ in atmosfera.

Tali obiettivi possono essere raggiunti tramite l'adozione di una serie di strategie (Vox et al., 2014; Farzaneh-Gord et al., 2013; Fabrizio, 2012; Al-Helal e Abdel-Ghany, 2011; Lazaar et al., 2004; Stanghellini et al., 2011; Magnani et al. 2011; Schettini et al., 2011; Vox et al., 2010) di seguito elencate:

- adozione d'idonee strategie di controllo microclimatico;
- efficientamento energetico dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento tramite l'adozione di sistemi di distribuzione del calore a bassa temperatura, sistemi con regolazione automatica, sistemi di generazione del calore ad alto rendimento;
- miglioramento dell'isolamento termico mediante l'applicazione di film e materiali con bassa conducibilità termica globale o tramite l'impiego di doppi film plastici di copertura con interposta una camera d'aria (figura 12);
- applicazione di materiali di copertura innovativi: film termici per ridurre le dispersioni termiche durante le ore notturne e per ridurre la differenza tra le temperature massime e minime nell'arco della giornata; film ad elevata efficienza energetica in termini di durata, materiali con una migliore risposta alla regolazione dell'effetto serra;
- impiego di schermi termici interni a controllo elettronico per ridurre le dispersioni energetiche per irraggiamento nell'IR lungo, per regolare la quantità di radiazione solare e ridurre il volume da riscaldare/raffrescare durante alcune fasi della giornata (figura 13);

- applicazione di fonti energetiche alternative e rinnovabili;
- introduzione di pratiche e tecnologie (film foto-selettivi, film foto-luminescenti) che conducano a una maggiore efficienza energetica dei cicli colturali (figura 14).

L'adozione delle suddette strategie può quindi contribuire in maniera sostanziale all'abbattimento delle emissioni di gas serra in atmosfera e al raggiungimento degli obiettivi legislativi in materia energetico-ambientale, migliorando le prestazioni ambientali delle serre (Scarascia Mugnozza et al., 2011) ed assicurando al contempo ottimali condizioni microclimatiche interne (Ozgener e Hepbasli, 2005; Vox et al., 2010).

Un ruolo centrale assume quindi l'utilizzo di impianti termici alimentati da fonti rinnovabili di energia per il riscaldamento e raffrescamento degli insediamenti serricoli per far fronte alla necessità di attuare una riqualificazione in chiave ecologica del settore al fine di proteggere l'ambiente, mitigare i cambiamenti climatici, tutelare la salute umana ed incrementare la sostenibilità del settore.

L'agricoltura è un settore ad alto consumo di energia ma ha anche grandi potenzialità per la generazione di energia diretta da fonti rinnovabili (energia prodotta in loco), inoltre può trarre molti benefici economici e ambientali dall'attuazione di tecnologie rinnovabili (Bardi et al., 2013; Chel e Kaushik, 2011).



Figura 12: Copertura di una serra realizzata con doppi film plastici con interposta una camera d'aria.



Figura 13: Schermo termico interno in una serra floricola in Puglia.



Figura 14: Film di copertura fotoelettrico per un appretamento protetto di ciliegi in Puglia.

Nel settore serricolo l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile può essere una strategia efficiente per ridurre le emissioni di gas serra del processo di produzione, incrementare la produzione di energia elettrica o termica da fonti rinnovabili, a discapito dell'energia derivante da fonti convenzionali, innalzando i livelli di sostenibilità ambientale del processo di coltivazione (Scarascia Mugnozza et al., 2011; Scarascia Mugnozza e Anifantis, 2009; Vox et al., 2008; Blanco et al., 2014; Campiotti et al., 2011; Castellano, 2014; Russo et al., 2014; Cuce et al., 2016; Blanco et al., 2015; Yildiz et al., 2012). Peraltro la disponibilità di ampie aree a bassa densità di popolazione rende le zone rurali molto adatte per lo sviluppo di sistemi decentralizzati per la produzione di energia rinnovabile.

In Italia meridionale la radiazione solare diretta media annua è di circa 1650 kWh/m² a Bari, 1700 kWh/m² a Napoli e Catanzaro, 1800 kWh/m² a Cagliari e 1900 kWh/m² a Palermo (Castrignanò, 2005); in queste zone la risorsa solare risulta abbondante (figura 15), motivo per cui la Puglia è dunque una delle regioni ideali per lo sviluppo e lo sfruttamento dell'energia solare, come dimostrato anche dagli ultimi dati pubblicati dal GSE che pongono la Puglia al primo posto per la potenza totale degli impianti installati (GSE, 2014).



Figura 15: Irraggiamento globale (kWh/mq) e potenziale di produzione annuale (kWh/kWp), con pannelli montati con inclinazione ideale (fonte: PVGIS © European Union, 2001-2008).

2. Le energie rinnovabili applicata al settore delle produzioni agricole in serra

2.1 Energia eolica

Un impianto eolico è costituito da uno o più aerogeneratori (turbine eoliche) che trasformano l'energia cinetica del vento in energia elettrica. Gli aerogeneratori possono essere suddivisi in classi di potenza dipendente dalle caratteristiche dimensionali: piccola taglia con potenza compresa fra 1 e 200 kW, media taglia con potenza fra 200 e 1000 kW e grande taglia con potenza superiore a 1000 kW.

Gli impianti di piccola taglia (mini-eolico) possono essere utilizzati per produrre elettricità per singole utenze o gruppi di utenze in modalità stand-alone o collegate alla rete elettrica in bassa tensione. Gli impianti di media e grande taglia vengono collegati alla rete di media oppure di alta tensione.

In Italia i siti più idonei allo sfruttamento dell'eolico si trovano al di sopra dei 600 m slm lungo il crinale appenninico, e, in misura minore, nelle zone costiere. Le regioni che esprimono una più alta potenzialità sono quelle del Sud, in particolare Campania, Puglia, Molise, Sicilia e Sardegna (ENEA, 2000).



Figura 16: Generatore eolico di piccola taglia a servizio delle utenze elettriche in insediamento serricolo.

I generatori eolici possono essere impiegati per produrre energia utile per gli impianti in serra alimentati elettricamente (figura 16), potendo convenientemente usufruire della connessione alla rete elettrica di distribuzione per lo stoccaggio energetico. L'energia elettrica prodotta dagli impianti eolici può essere utilizzata per il raffrescamento, le pompe per irrigazione e fertirrigazione, gli impianti d'illuminazione, le pompe di calore utilizzate per il riscaldamento e il raffrescamento. L'energia elettrica prodotta può inoltre essere utilizzata a servizio di impianti di solar cooling ad assorbimento alimentati con pannelli solari termici ad acqua calda.

L'impiego dei generatori eolici risulta vantaggioso in virtù della ridotta occupazione di suolo connessa alle apparecchiature ed all'assenza di emissioni di CO₂ o di altri elementi inquinanti atmosferici durante la fase di esercizio.

Dal punto di vista economico l'impiego di impianti eolici di grande taglia può risultare competitivo rispetto ad impianti di generazione elettrica alimentati con fonti fossili, tuttavia essendo caratterizzati da considerevoli costi di investimento e di mantenimento, questi sono più adatti per l'alimentazione di un parco di utenze piuttosto che per le serre. L'installazione invece di turbine di piccola taglia per essere economicamente sostenibile richiede un'attenta valutazione delle condizioni di ventosità del sito tramite l'effettuazione di misure anemometriche e dei costi di investimento e mantenimento quali fondazioni, costo dei macchinari, manutenzione ordinaria e straordinaria (Vox et al., 2010; Mahmoudi et al., 2009; Ozgener, 2010).

2.2 Energia solare fotovoltaica

La tecnologia fotovoltaica consente di trasformare direttamente l'energia associata alla radiazione solare in energia elettrica. Le principali applicazioni in ambito agricolo dei sistemi fotovoltaici riguardano impianti con sistemi di accumulo per utenze isolate dalla rete e impianti per utenze collegate alla rete di distribuzione dell'energia elettrica. La rete elettrica nazionale può fungere da serbatoio di accumulo con capacità infinita in cui riversare il surplus di energia prodotta per poi prelevarla in un momento differente da quello in cui avviene la produzione, utilizzando in Italia il meccanismo di "scambio sul posto". Tale meccanismo consente di ottenere una compensazione tra il valore economico associabile all'energia elettrica prodotta e immessa in rete e il valore economico associabile all'energia elettrica prelevata dalla rete e consumata.

L'associazione della tecnologia fotovoltaica ad un accumulo energetico è necessaria per superare il carattere d'intermittenza della produzione di energia, in maniera tale da garantire continuità di fornitura all'utenza. Infatti il fabbisogno energetico di una serra è presente anche quando la radiazione solare è bassa, tipo nei periodi invernali, o assente come durante il periodo notturno.

Come per la tecnologia eolica, gli impianti fotovoltaici possono essere impiegati per produrre energia utile per gli impianti in serra alimentati elettricamente quali i sistemi per il raffrescamento, le pompe per irrigazione e fertirrigazione, gli impianti d'illuminazione, le pompe di calore utilizzate per il riscaldamento e il raffrescamento. L'energia elettrica prodotta può inoltre essere utilizzata a servizio di impianti di solar cooling ad assorbimento alimentati con pannelli solari termici ad acqua calda.

La convenienza economica è strettamente connessa alle caratteristiche climatiche del sito d'installazione; si stima infatti, che in nazioni del Nord Europa come i Paesi Bassi la produzione annuale da fotovoltaico sia di circa 990 kWh kWp⁻¹ e di 960 kWh kWp⁻¹ in Repubblica Ceca (Šúri et al., 2007; PVGIS, 2014). In Italia, le latitudini meridionali sono ovviamente avvantaggiate sotto questo profilo; l'esposizione ottimale dei pannelli fotovoltaici è verso sud e con un'inclinazione di circa 30-40° gradi sulla superficie orizzontale in funzione del sito, la produzione annuale di energia elettrica è stimabile da circa 1.000 kWh kWp⁻¹ nell'Italia settentrionale a circa 1.500 kWh kWp⁻¹ nell'Italia meridionale.

I moduli fotovoltaici possono essere integrati nella struttura della serra con esposizione a sud, purché non producano ombra sulla superficie destinata alla coltivazione, oppure possono essere installati all'esterno o su superfici di copertura di locali accessori (figura 17), per esempio destinati al confezionamento dei prodotti, spesso presenti nelle aziende serricole (Vox e Schettini, 2009; Castellano, 2014).

L'energia fotovoltaica emerge, quindi, come una delle più promettenti risorse energetiche del futuro per la climatizzazione di serre in Italia. Negli ultimi anni, grazie a politiche di incentivi associati all'installazione di pannelli PV, il settore fotovoltaico italiano si è notevolmente sviluppato non solo nell'edilizia civile, ma anche nel settore agricolo.



Figura 17: Pannelli solari fotovoltaici installati su superficie di copertura di locali accessori in un insediamento serricolo nel Sud Italia.

2.3 Energia solare termica

I collettori solari termici permettono la conversione diretta di energia solare in energia termica. Rispetto agli impianti fotovoltaici, questi sistemi presentano un'efficienza di conversione più elevata. I pannelli solari termici più diffusi sono del tipo piani vetrati, si aggiungono poi i pannelli sottovuoto. I pannelli piani vetrati sono essenzialmente costituiti da una piastra metallica scura, inserita all'interno di un involucro isolato termicamente e che presenta una lastra di vetro sulla parte anteriore. La radiazione solare, catturata all'interno dell'involucro isolato, riscalda la piastra metallica che poi cede calore ad un serbatoio di accumulo per mezzo di un fluido vettore (generalmente acqua additivata con glicol etilenico) circolante all'interno di tubi posizionati sulla superficie della piastra metallica scura del pannello. I pannelli sottovuoto invece sono costituiti da condotti in vetro posti sottovuoto, all'interno dei quali sono presenti le tubazioni contenenti il fluido che trasferisce il calore al serbatoio di accumulo termico.

L'energia termica prodotta da collettori solari termici può essere utilizzata per il riscaldamento delle serre (figura 18) con elementi radianti presenti nell'area di coltivazione del tipo tubi in plastica percorsi da acqua a bassa entalpia (intorno ai 40°C) (Vox et al., 2008; Bargach et al., 2000; Sethi e Sharma, 2008). L'energia solare termica può essere utilizzata anche per il raffrescamento delle serre con impianti ad assorbimento, che nello specifico richiedono acqua in ingresso a temperature di 80-90 °C, che può essere generata con collettori solari termici sottovuoto.

Come per i pannelli fotovoltaici, la produzione di energia termica è affetta dall'intrinseca caratteristica di variabilità ed intermittenza della fonte solare, per cui i collettori solari termici necessitano di serbatoi di accumulo isolati termicamente; inoltre, per garantire continuità di fornitura, necessitano di essere integrati con una sorgente ausiliaria di calore come una caldaia a combustibile fossile o alimentata con biomassa, oppure una pompa di calore aria-acqua alimentata elettricamente o

una pompa di calore geotermica (Ozgener e Hepbasli, 2005). Al fine di ridurre ulteriormente l'impatto ambientale dovuto a quest'integrazione, l'alimentazione elettrica richiesta dalle apparecchiature può essere fornita da impianti fotovoltaici ed eolici. Risultati migliori dal punto di vista dell'efficienza globale del sistema si ottengono tramite l'utilizzo di sistemi passivi per incrementare l'isolamento termico delle strutture e per la parzializzazione dei volumi da riscaldare.

I moduli solari termici sono integrabili con le strutture delle serre, potendo essere posizioni su superfici verticali, o idealmente a 60° in Italia meridionale, rispetto alla superficie orizzontale, per ottenere massimi risultati durante i mesi invernali quando il sole ha un angolo di elevazione basso.



Figura 18: Pannelli solati termici installati sulla testata sud di una serra ed utilizzati a servizio di un sistema di riscaldamento dell'area di coltivazione a bassa entalpia.

2.4 L'energia geotermica

L'energia geotermica è quella contenuta, sotto forma di "calore", all'interno delle rocce e nei fluidi all'interno della crosta terrestre. Le fonti geotermiche a temperatura medio-bassa vengono impiegate in applicazioni dirette ed indirette come pompe di calore, stabilimenti termali, riscaldamento di edifici, serre per floricoltura e orticoltura, acquacoltura ecc. Le pompe di calore geotermiche sfruttano la proprietà del terreno di avere una temperatura maggiore rispetto a quella dell'aria in inverno ed inferiore durante l'estate. In dettaglio il terreno può essere visto come composto da: uno strato più superficiale, fino a circa 0,8 m di profondità, termicamente instabile in quanto influenzato dalle fluttuazioni climatiche atmosferiche giornaliere; uno strato, fino a circa 10 m di profondità, la cui temperatura varia con i mesi (Dowlatabadi e Hanova, 2007), e prevalentemente sfruttato con sistemi di scambio orizzontali, posizionati a circa 1-2 m di profondità (Sarbu e Sebarchievici, 2014); uno strato termicamente stabile, oltre i 10 m di profondità, sfruttato prevalentemente con sistemi di scambio verticali. Lo strato più profondo ha una temperatura

dipendente principalmente dal flusso geotermico e dalla presenza di falde sotterranee. La temperatura dello strato termicamente stabile si può calcolare come il valore della media annuale delle temperature dell'aria esterna, valore che aumenta in funzione della profondità in ragione di un gradiente termico pari a 0,03 °C/m (Capozza et al., 2012).

Una pompa di calore geotermica è generalmente costituita da una convenzionale pompa di calore accoppiata a scambiatori di calore in cui un fluido, quale acqua o acqua additivata con prodotti antigelo, scambia calore con il suolo; in tal caso si parla di pompa di calore geotermica a circuito chiuso. Gran parte dei costi di investimento iniziali è interessata dagli scambiatori di calore, per cui una progettazione attenta è necessaria al fine di non rendere antieconomico l'intervento, sovrastimando le dimensioni degli scambiatori, o inefficiente il sistema, sottostimandone le dimensioni (Lamarche et al., 2010).

I sistemi di scambio termico con il sottosuolo possono essere in questo caso verticali o orizzontali. Diversamente si può prevedere l'accoppiamento della pompa di calore con l'acqua di falda o con specchi di acqua superficiale; nel caso in cui si sfrutti acqua di falda come sorgente termica, l'acqua di falda viene prelevata attraverso un pozzo ed utilizzata come fluido che scorre nel circuito che scambia energia con la pompa di calore o con uno scambiatore intermedio; poi viene re-immessa nel suolo attraverso lo stesso pozzo o mediante un ulteriore pozzo posizionato diversamente. Nel caso si utilizzino specchi d'acqua superficiali, si realizzano degli scambiatori a circuito chiuso o aperto posizionati sul fondo del lago.

Riguardo agli scambiatori di calore, l'impiego di sistemi a pompa di calore con scambio termico verticale (VGSHP) è risultato più efficiente rispetto a quelli orizzontali (HGSHP) (Benli, 2013; Florides et al., 2011) grazie alla maggiore stabilità termica del terreno alle profondità raggiunte dal sistema verticale. Inoltre i sistemi con scambiatori verticali (figura 19) risultano essere molto più versatili rispetto a quelli orizzontali non essendo richieste vaste aree come nel caso dei sistemi HGSHP, essendo utilizzate le acque di falda come fluidi termici o bacini idrici come sorgenti termiche. D'altra parte i sistemi con scambiatori orizzontali presentano costi più contenuti rispetto ai sistemi di tipo verticale non essendo richiesti interventi di perforazione ma di semplice escavazione.



Figura 19: Ingresso nel suolo di sonda geotermica con scambiatori verticali presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.

La potenzialità delle pompe di calore geotermiche nel settore agricolo ed in particolare per il riscaldamento di serre (figura 20) è stata valutata positivamente (Dickson e Fanelli, 2004). Le fonti geotermiche a bassa temperatura sono compatibili con svariati sistemi di riscaldamento, tipo impianti di distribuzione forzata di aria, scambiatori di calore acqua-aria, sistemi di riscaldamento a pavimento o su bancali del tipo radiante, riscaldamento diretto del terreno (Campiotti et al., 2012).

Le pompe di calore geotermiche possono essere utilizzate per il raffrescamento delle serre e, inoltre, possono integrarsi efficacemente con i sistemi di raffreddamento del tipo solar cooling ad assorbimento.

In Italia il riscaldamento di serre derivante dallo sfruttamento diretto di risorse geotermiche rappresenta circa il 15% degli usi diretti del calore geotermico (Buonasorte et al., 2007), una bassa percentuale considerando che il settore agricolo, grazie al basso rapporto tra area costruita o edificio e superficie agricola, rappresenta un campo di applicazione per le pompe di calore geotermiche molto interessante. Gli impianti geotermici caratterizzati da capacità termiche elevate necessitano, rispetto ad impianti meno potenti, di scambiatori di calore di dimensioni maggiori che possono essere installati su aree facilmente reperibili in ambito agricolo (Chiabrando e Fabrizio, 2009). Inoltre gli impianti di riscaldamento a servizio di strutture serricole risultano vantaggiosi economicamente ed al contempo hanno un basso impatto ambientale (Benli, 2013; Chai et al., 2012; Ozgener, 2010; Kondili e Kaldellis, 2006; Adaro et al., 1999).



Figura 20: Pompa di calore geotermica all'interno di una serra presso il campo sperimentale dell'Università di Bari

2.5 Bioenergie

Con il termine bioenergie si indicano tutte quelle energie ricavate da biomasse provenienti da agricoltura, foreste, agro-industria, deiezioni animali e rifiuti o residui di origine biologica e quindi provenienti da colture dedicate o da sottoprodotti di colture.

Rispetto alle altre forme di energia rinnovabile, quali solare termico e fotovoltaico ed eolico, la produzione di energia delle biomasse presenta il vantaggio di non essere caratterizzata da intermittenza, ma è invece collegata alla disponibilità temporale per esempio di colture stagionali. La produzione di energia termica da biomassa, per la climatizzazione delle serre in Italia non ha ancora avuto larga diffusione; affinché il suo utilizzo sia economicamente sostenibile è richiesta una attenta

progettazione che consenta di massimizzare l'efficienza di filiera, dalle fasi di coltivazione, alla raccolta e trasporto della biomassa, al rendimento degli impianti e alla gestione delle utenze.

Analizzando il costo dell'energia termica prodotta con diversi combustibili emerge che le biomasse risultano attualmente più convenienti del gasolio agricolo in termini di energia primaria; tuttavia le tecnologie da utilizzare, caldaie ed impianti, richiedono investimenti maggiori rispetto ai combustibili convenzionali (Francescato et al., 2011; Campiotti et al., 2012).

L'energia termica prodotta con le biomasse può essere utilizzata, oltre che direttamente per il riscaldamento delle serre, per integrare, nei periodi di assenza della fonte solare, i sistemi basati sul solare termico, anche nel caso di solar cooling ad assorbimento.

3. Sostenibilità energetica nel controllo climatico delle serre

Al fine di verificare l'applicabilità di sorgenti di energia rinnovabile al comparto serra, nell'ambito del PAR 2016 è stata sviluppata un'attività di ricerca finalizzata all'applicazione di una tecnologia per il raffrescamento di una serra basata sullo sfruttamento dell'energia solare. L'attività di ricerca è stata condotta presso il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università di Bari A. Moro ed è stata finalizzata all'applicazione della tecnologia del solar cooling per il raffrescamento dell'area di coltivazione di una serra. In dettaglio presso il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali sono state svolte delle ricerche per individuare le soluzioni tecnologiche più idonee per applicare il sistema di solar cooling al raffrescamento dell'area di coltivazione in serra. Particolare attenzione è stata dedicata all'individuazione delle più efficaci soluzioni per la distribuzione del freddo alle piante. Le soluzioni individuate sono state applicate in un test sperimentale realizzato presso il campo sperimentale del Dipartimento. L'utilizzo di energie rinnovabili per limitare le temperature elevate in serra si inserisce nel più articolato sistema di controllo climatico in serra.

Il livello di controllo del microclima di una serra varia notevolmente in base alla tipologia di apprestamento protetto, che può andare dalla più semplice serra fredda, priva di impianti di condizionamento, alla serra completamente computerizzata e condizionata. L'obiettivo del controllo climatico delle serre è riassunto dalla citazione di Albright (2002): "La produzione vegetale in ambiente protetto ha il fine di portare ogni pianta al suo potenziale genetico". In linea di principio, nella produzione sostenibile gli sforzi compiuti per controllare il microclima dovrebbero tener conto del fatto che il tasso di consumo di risorse rinnovabili non dovrebbe superare il tasso di rigenerazione delle stesse. Inoltre, il tasso di consumo delle risorse non rinnovabili non dovrebbe superare il tasso di sviluppo delle risorse sostitutive rinnovabili e, infine, il tasso di emissioni inquinanti non dovrebbe superare la capacità ambientale di assorbirle e rigenerarle (De Pascale e Maggio, 2005).

Nell'ultimo decennio, ci sono stati notevoli sforzi per ottimizzare il microclima delle serre utilizzando approcci sostenibili; l'attenzione si è concentrata principalmente sui parametri che influenzano il microclima delle colture, quali temperatura, umidità relativa e concentrazione di CO₂.

La corretta gestione dell'ambiente interno della serra dipende fortemente dal controllo della temperatura dell'aria. Infatti il controllo della temperatura dell'aria è fondamentale per influenzare la crescita e la morfologia delle piante. La risposta delle piante all'aumento della temperatura dell'aria è ragionevolmente prevedibile; vi è un intervallo di temperatura, per la maggior parte delle piante, da 10°C a 24°C, oltre il quale c'è una risposta positiva quasi lineare in termini di aumento della crescita (Nelson, 2002).

Ogni coltura e ogni fase di sviluppo è caratterizzata da temperature dell'aria ottimali. Per temperature dell'aria elevate, al di sopra di quella ottimale, si possono verificare perdite di qualità con steli più lunghi, steli più sottili, minor numero di fiori, sviluppo più lento delle gemme; per temperature dell'aria eccessivamente elevate si verificano danni alla pianta. Anche la temperatura dell'aria al di sotto della quale non vi è crescita è importante in quanto fornisce un valore di riferimento minimo per il riscaldamento. Mantenere la temperatura ottimale per ogni stadio di crescita è l'ideale per il

controllo ambientale delle serre, anche se molte serre hanno una capacità limitata di modulare la temperatura dell'aria con precisione.

L'impostazione della temperatura dell'aria interna per i controlli del raffrescamento (temperatura di set point) è di solito un punto di compromesso tra il costo per il funzionamento degli impianti e la diminuzione dei rendimenti delle colture derivanti dalle temperature elevate.

L'uso di tecniche di modificazione ambientale per controllare la forma della pianta, piuttosto che mediante un prodotto chimico (ritardante della crescita), è un passo positivo verso la sostenibilità. Questo, ad esempio, può essere ottenuto modificando i valori DIF (temperatura diurna meno la temperatura notturna). La manipolazione dell'ambiente delle serre con l'uso della DIF richiede un monitoraggio e un controllo preciso del microclima delle serre.

Il costo spesso elevato dei combustibili fossili, unito alla sua variabilità, hanno aumentato l'interesse per il miglioramento dell'efficienza e del risparmio energetico nelle produzioni in serra. La gestione sostenibile della temperatura delle colture è una strategia in via di adozione. La risposta della coltura ai regimi termici modificati è un aspetto critico che deve essere compreso.

In ogni caso, le alte temperature diurne, che possono essere stressanti per le colture, devono essere controllate attentamente.

In Italia e nell'area mediterranea il condizionamento estivo delle serre rappresenta uno dei fattori principali di costo economico, energetico ed ambientale, infatti le tecnologie attualmente in uso prevedono lo sfruttamento di risorse preziose, quali l'acqua, e di energia elettrica.

3.1 Il condizionamento estivo delle serre

Il raffrescamento delle serre e quindi il contenimento delle elevate temperature che possono presentarsi in serra è finalizzato a:

- garantire le migliori condizioni microclimatiche delle piante;
- effettuare coltivazioni che, iniziando in primavera, si concludono in estate.

Infatti l'uso del condizionamento consente di utilizzare la serra per tutto l'anno, con successioni colturali che comprendono l'intera annata, riducendo quindi i costi di produzione e ammortamento del capitale.

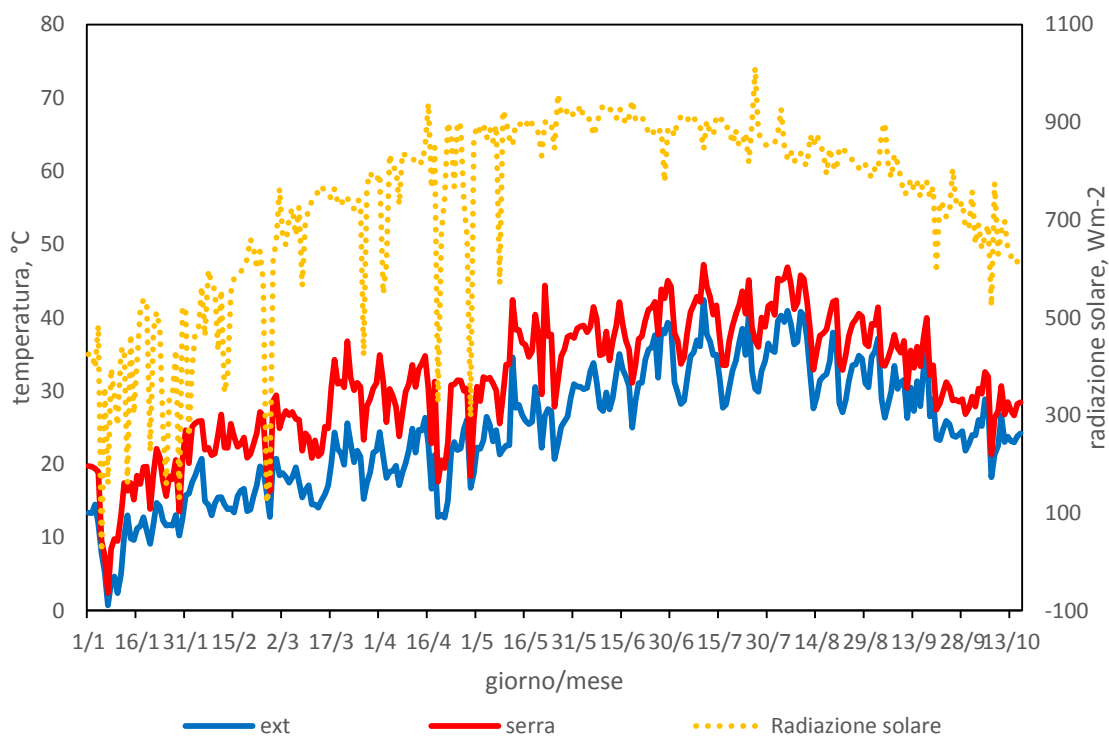


Figura 20: Radiazione massima giornaliera (asse destro), temperatura massima dell'aria esterna (ext) e della serra (serra), registrate nel 2017 presso il Centro sperimentale P. Martucci dell'Università di Bari A. Moro, sito in Valenzano (BA).

Tabella 5: Temperatura massima biologica e temperatura ottimale diurna per specie di piante orticole e floricole.

Specie	Temperatura massima biologica (°C)	Temperatura ottimale diurna (°C)
Pomodoro	26-30	22-26
Cetriolo	28-32	24-28
Melone	30-34	24-30
Zucca	30-34	24-30
Fagiolo	28-35	21-28
Peperone	28-32	22-28
Melanzana	30-32	22-26
Lattuga	25-30	15-20
Fragola		18-22
Garofano	26-32	18-21
Rosa	30-32	20-25
Gerbera		20-24
Crisantemo	25-30	20-25
Bocca di leone		14-18
Gladiolo	25-30	16-20
Tulipano		22-25
Iris e Narciso		15-20
Lilium e Fresia	30-34	18-24
Ciclamino		20-22
Calla		20-25
Azalea-Rododendro		14-20
Begonia		18-21
Poinsettia	26-28	20-25
Gloxinia		20-25
Primula, Cineraria e Calceolaria		15-25
Pelargonium	26-30	20-25
Saintpaulia		20-24
Kalanchoe		20-25
Ortensia	25-27	20-25
Gardenia		21-23
Euphorbia fulgens		20-25
Orchidee da serra calda	28-30	18-21
Orchidee da serra temperata	23-25	16-18

Orchidee da serra fredda	18-22	13-16
Croton, Ficus	35-40	23-24
Philodendron, Anthurium, Dieffenbachia	35-40	25-30
Bromeliacee	26-30	22-24

Nell'area mediterranea la climatizzazione delle serre per il contenimento delle elevate temperature risulta necessaria per diversi mesi dell'anno.

La figura 20 illustra i dati di temperatura massima registrati presso il Centro sperimentale P. Martucci dell'Università di Bari all'esterno ed all'interno di un apprestamento serricolo non condizionato con sistemi attivi. I dati mostrano come da marzo ad ottobre la temperatura in serra possa superare i 30 °C, quando i valori massimi di radiazione solare superano i 700 Wm⁻². Questo suggerisce la necessità di dotare le serre di impianti di raffrescamento efficaci, infatti il contenimento delle temperature massime in serra è importante in quanto è necessario non superare la temperatura massima biologica delle piante, cioè la temperatura al di sopra della quale la pianta comincia a manifestare squilibri fisiologici con diminuzione di accrescimento e produzione e peggioramento della qualità.

Il fine della climatizzazione delle serre è quello di ottenere una temperatura il più vicino possibile a quella ottimale, in modo da raggiungere elevati livelli di crescita e qualità delle piante.

La tabella 5 mostra i valori della temperatura massima biologica e della temperatura ottimale diurna per diverse specie orticole e floricole.

Il raffrescamento in serra per il contenimento delle elevate temperature si pratica principalmente mediante:

- Ombreggiamento;
- Ventilazione;
- Evaporazione d'acqua.

3.1.1 Ombreggiamento

L'ombreggiamento può essere sia esterno (Figura 21) sia interno e in entrambi i casi fisso oppure mobile. I sistemi fissi sono più economici ma provocano una riduzione di luminosità anche nei periodi in cui è necessaria un'elevata illuminazione.

I sistemi mobili, esterni o interni, consistono in reti, schermi, stuoie, persiane: questi possono essere comandati manualmente o per mezzo di un motore collegato a un sistema a microprocessore impostato sul controllo della temperatura e della radiazione solare.

È preferibile utilizzare impianti mobili, con percentuale variabile di trasmissione della radiazione.

L'ombreggiamento all'interno della serra può essere ottenuto anche con la tinteggiatura estiva del materiale di copertura della serra.



Figura 21: Ombreggiamento di una serra ottenuto con reti posizionate esternamente.

La tinteggiatura della copertura trasparente si effettua applicando pittura con colore bianco con riflessività alla radiazione solare maggiore dell'80%; latte di calce e gesso sono i materiali maggiormente utilizzati. I colori scuri per la tinteggiatura sono sconsigliabili perché assorbono radiazione solare e riscaldano la copertura.

Se la tinteggiatura viene posta all'esterno, l'azione delle piogge può essere utile per eliminare l'ombreggiamento nel periodo invernale, se si vuole conservare la tinteggiatura si aggiunge un collante oppure si applica all'interno.

3.1.2 Ventilazione

La ventilazione può essere naturale oppure forzata.

Ventilazione naturale

La ventilazione naturale è la forma più semplice di ventilazione: avviene tramite le sportellature laterali e di colmo a causa della differenza di temperatura e pressione tra aria interna e esterna.

Le aperture di falda vanno disposte all'altezza del colmo in modo da avere un buon effetto camino (Figura 22). Le finestrate laterali devono avere un'altezza minima dal suolo di 70 cm per evitare l'influenza diretta dell'aria fredda sulla vegetazione.

Le finestrate del tetto devono avere una superficie minima del 16%, 24%, 32% rispetto alla superficie coperta, mentre per le aperture laterali del 2%, 3%, 4%, rispettivamente per l'Italia settentrionale, centrale e meridionale.

L'uso della ventilazione naturale può consentire di asportare 50-80 W per m² di superficie coperta di serra, in funzione delle condizioni climatiche esterne e in particolare della velocità e direzione del vento. La ventilazione naturale consente di ottenere 10-12 ricambi orari del volume della serra.

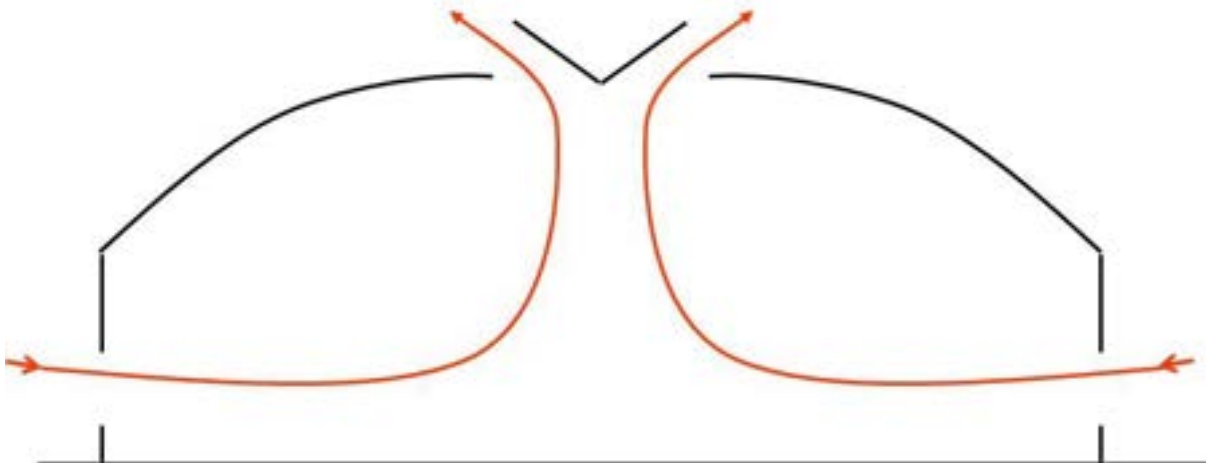


Figura 22: Schema del flusso di aria all'interno di una serra dotata di sistema di ventilazione naturale.

Nel caso della ventilazione naturale in serra la portata può essere calcolata con la seguente formula (Wang e Boulard, 2000):

$$P = A \cdot G(\alpha) \cdot v \quad [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

con:

A = area apertura ventilazione [m^2]

v = velocità del vento [m s^{-1}]

$G(\alpha) = 1.758 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha$ = coeff. di ventilazione adimensionale

α = angolo di apertura finestrazione [$^\circ$].

I ricambi orari del volume della serra ottenibili con la ventilazione naturale dipendono dai parametri citati e possono variare da 5 a 15 per ora.

L'energia asportata può essere calcolata, assimilando la serra ad un sistema aperto, con la seguente formula:

$$Q_v = P \cdot \rho \cdot (J_{ai} - J_{ae}) = P \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{ai} - T_{ae}) \quad [\text{W}] \quad (2)$$

con:

J = entalpia dell'aria [J kg^{-1}]

c_p = calore specifico dell'aria [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

ρ = massa volumica dell'aria [kg m^{-3}]

P = portata [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]

T_{ai} = temperatura dell'aria all'interno del volume della serra [K]

T_{ae} = temperatura dell'aria all'esterno del volume della serra [K].

A titolo di esempio numerico, se consideriamo i seguenti valori:

S = superficie serra = 300 [m^2]

V = volume serra = 1050 [m^3]

A = area apertura ventilazione = 30 [m^2]

v = velocità del vento = 2.8 [ms^{-1}]

α = angolo di apertura finestrazione = 25 [$^\circ$]

$T_{ai} - T_{ae}$ = 5 [$^\circ\text{C}$]

e ricordando che

c_p = 0.992 [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

$$\rho = 1.293 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$$

si ottiene un'energia totale asportata dalla serra pari a 23676 W che, per unità di superficie di serra, corrisponde a 78.9 Wm^{-2} .

Ventilazione forzata

La ventilazione forzata avviene mediante ventilatori elicoidali, generalmente posti in testata con serrande poste all'estremità della serra, funzionanti per estrazione d'aria (Figura 23).

Con la ventilazione forzata si possono garantire 40-60 ricambi orari di aria del volume della serra; l'uso della ventilazione forzata può consentire di asportare 200-230 W per m^2 di superficie coperta di serra.

In caso di ventilazione forzata la lunghezza massima di aspirazione non deve eccedere i 60-70 m. Le serrande possono essere a gravità oppure comandate con apertura automatica.

Per il calcolo dell'energia Q_v asportata dalla serra nel caso di ventilazione forzata, con le stesse condizioni imposte per l'energia asportata nel caso di ventilazione naturale e considerando lo stesso esempio numerico, ma con un numero di ricambi orari del volume della serra pari a 60, utilizzando l'equazione (2) si ottiene un valore di Q_v pari a:

$$Q_v = P \cdot \rho \cdot c_p (T_{ai} - T_{ae}) = 67\,339 \text{ W}$$

che corrisponde a 224 Wm^{-2} asportati per unità di superficie di serra.



Figura 23: Ventilatori utilizzati per la ventilazione forzata di una serra.

3.1.3 Sistemi di raffrescamento ad evaporazione d'acqua

I sistemi ad evaporazione d'acqua per il raffrescamento delle serre possono essere realizzati con filtri evaporativi o mediante Fog system.

Sistemi a filtri evaporativi

Il sistema è costituito da pannelli permeabili (Figura 24), disposti in testata o sulle pareti laterali, mantenuti imbibiti d'acqua, associati a ventilatori posti sulle pareti opposte e funzionanti in aspirazione (Figura 8).

I pannelli, di spessore 4-5 cm, sono usualmente realizzati in cartone, in fibra di legno o in materiale plastico poroso, permeabile e bagnabile.

La distribuzione dell'acqua nel pannello deve essere uniforme, l'evaporazione interessa il 5-10% dell'acqua che circola sui pannelli

I filtri si posizionano preferibilmente a nord per evitare ombreggiamento e incidenza della radiazione solare sul pannello che evapora l'acqua.

I pannelli umidificatori hanno un'efficienza dell'80-90% della differenza di temperatura tra bulbo asciutto e bulbo umido, a causa anche del fatto che il processo non è realmente adiabatico.

Inoltre nelle serre non è opportuno superare valori del 70 - 80% di umidità relativa. Il consumo di acqua per evaporazione si può stimare pari a 0.6-0.7 litri di acqua per m² di superficie coperta e per ogni ora di funzionamento.



Figura 24: Sistema a filtri evaporativi: pannelli

A titolo di esempio numerico è possibile quantificare l'energia asportata da un sistema a filtri evaporativi ed il relativo consumo di acqua:

- Dimensioni serra:
Superficie di base = $S = 3000 \text{ m}^2$

Volume = V = 10000 m³

- Condizioni dell'aria esterna (punto 1 nel diagramma di Mollier in figura 25):
 Temperatura = T_{ae} = 35 °C
 Umidità relativa = U.R._{ae} = 50%.

Dal diagramma di Mollier (figura 25) si può ottenere il titolo o umidità assoluta della miscela aria vapore per le condizioni esterne (x_{ae}) ed il valore dell'entalpia della trasformazione (J_{ae}):

x_{ae} = 17.8 g H₂O/kg_{aria}
 J_{ae} = 19.2 kcal/kg_{aria}

Spostandosi lungo una trasformazione isoentalpica fino alla linea di saturazione, cioè di umidità relativa del 100%, si possono ottenere le condizioni teoriche dell'aria dopo il passaggio attraverso il pannello evaporativo (punto 2 in figura 25):

T_t = 26 °C
 U.R._t = 100%.

Il segmento isoentalpico teorico (segmento rosso in figura 25) misura D in lunghezza sul diagramma; considerando l'80% di efficienza del sistema si ottiene la lunghezza reale della trasformazione (segmento azzurro in figura 25) che sarà: D x 0.8. In corrispondenza di tale valore (punto 3 in figura 25) possono leggersi dal diagramma di Mollier le condizioni reali di ingresso dell'aria dopo aver attraversato il pannello:

T_i = 27.5 °C;
 U.R._i = 90%;
 x_i = 21.0 g H₂O / Kg_{aria}.

La Tabella 6 riassume le condizioni esterne e le condizioni teoriche e reali di ingresso della massa di aria che attraversa il volume della serra.

Tabella 6: Parametri di funzionamento di un sistema a filtri evaporativi

	Condizioni esterne 1	Condizioni teoriche 2	Condizioni ingresso 3
Temperatura	T _e = 35 °C	T _t = 26 °C	T _i = 27.5 °C
U.R.	UR _e = 50%	UR _t = 100%	UR _i = 90%
titolo	x _e = 17.8 g H ₂ O / Kg _{aria}	x _t = 22.2 g H ₂ O / Kg _{aria}	x _i = 21.0 g H ₂ O / Kg _{aria}

La potenza frigorifera necessaria per il raffrescamento è calcolata attraverso l'equazione di bilancio termico dell'aria all'interno della serra:

$$PF = \text{Rad_Sol} \cdot \tau_{cp} \cdot (1 - \rho_s) \cdot S - K_s \cdot S \cdot \Delta T \quad [W] \quad (3)$$

I termini dell'equazione (3) hanno il seguente significato: Rad_Sol è la radiazione solare esterna alla serra ed incidente su di un piano orizzontale; τ_{cp} è la trasmittività della copertura della serra; ρ_s è la riflettanza del suolo e dello schermo ombreggiante in serra; S è l' area coperta che deve essere raffreddata; K_s è il coefficiente di trasmissione termica globale della serra, che tiene conto di tutte le dispersioni termiche per irraggiamento, ventilazione, convezione; ΔT è la differenza tra i valori di temperatura fra interno ed esterno della serra.

Nell'esempio esaminato, con un valore della radiazione solare pari a 900 Wm^{-2} ; $\tau_{cp} = 0.80$; $\rho_s = 0.5$; $S = 3000 \text{ m}^2$; $K_s = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\Delta T = 7.5^\circ\text{C}$.; il fabbisogno di energia frigorifera che l'impianto di raffreddamento deve fornire è pari a $PF=1305 \text{ kW}$, corrispondenti a 435 W per m^2 coperto di serra.

Per il calcolo dell'acqua che deve evaporare nei pannelli consideriamo che la differenza di titolo è

$$\Delta x = x_i - x_e = 21.0 - 17.8 = 3.2 \text{ gH}_2\text{O/Kg}_{\text{aria}}$$

che deve riferirsi all'unità di volume per cui si moltiplica per la densità dell'aria e si ottiene l'acqua da far evaporare per m^3 di aria $\text{H}_2\text{O}_{\text{vol}} = \rho \Delta x = 1.293 \times 3.2 = 4.138 \text{ gH}_2\text{O/m}^3 \text{ aria}$.

L'energia che si sottrae all'unità di volume di aria per l'evaporazione dell'acqua è:

$$\Delta E = \text{H}_2\text{O}_{\text{vol}} \times \text{Cal}_{\text{lat}} = 4.138 \times 2.450 = 10.138 \text{ kJ/m}^3.$$

La portata dei ventilatori si determina da:

$$P = \text{portata dei ventilatori} = PF / \Delta E = 1305 \text{ kW} / 10.138 \text{ kJ/m}^3 = 128.7 \text{ m}^3/\text{s} = 128.7 \times 3600 \text{ m}^3/\text{h} = 463320 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Il consumo di acqua si calcola quindi con:

$$C_{\text{water}} = \text{H}_2\text{O}_{\text{vol}} \times P = 4.138 \text{ gH}_2\text{O/m}^3 \text{ aria} \times 463320 \text{ m}^3/\text{h} = 1917 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h} \text{ che corrispondono a } 0.639 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{m}^2 \text{ h, riferiti all'unità di superficie.}$$

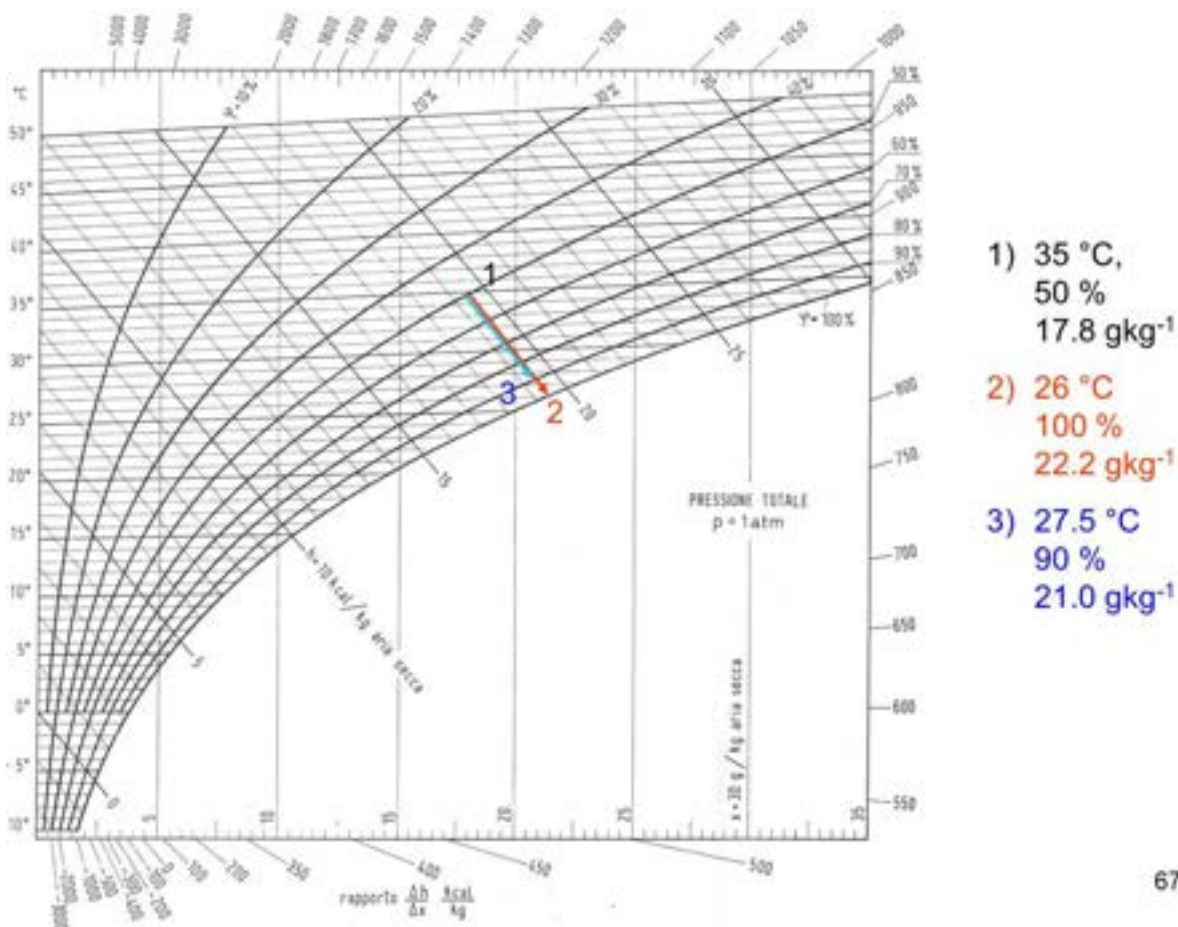


Figura 25: Diagramma di Mollier dell'aria umida.

Fog systems

Nei sistemi Fog viene prodotta una fitta nebulizzazione dell'acqua mediante la sua dispersione in minute goccioline che, evaporando, sottraggono all'aria il calore latente di evaporazione (Figura 26).

I sistemi Fog utilizzano ugelli ad alta pressione o ugelli rotanti o a spruzzo a bassa pressione. Il sistema ad alta pressione è il più costoso.

Per rendere più efficace l'impianto si possono utilizzare ventilatori per la circolazione dell'aria in serra.

L'acqua deve essere libera da sali per evitare intasamenti agli ugelli e tubazioni in acciaio inox per ridurre incrostazioni e corrosioni.

L'utilizzo del fog system può avere effetti negativi come la formazione di funghi e parassiti sulle piante.



Figura 26: Sistema Fog ad evaporazione d'acqua utilizzato per il raffrescamento di una serra.

4. Il sistema ad assorbimento alimentato con energia solare per il condizionamento climatico estivo della serra sperimentale presso l'Università di Bari

L'attività di ricerca svolta presso il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università di Bari A. Moro è stata indirizzata a studiare le soluzioni tecnologiche più idonee per il raffrescamento dell'area di coltivazione in serra, utilizzando per il raffreddamento dell'acqua il sistema ad assorbimento alimentato da energia solare. La tecnologia è applicabile sia a produzioni orticole sia a produzioni floricole realizzate in serra anche nei periodi caldi dell'anno.

Il test sperimentale è stato realizzato presso una serra sita nel Centro sperimentale P. Martucci dell'Università di Bari A. Moro, in località Valenzano (BA), latitudine 41° 05' N, longitudine 16° 53' E, altitudine 85 m s.l.m..

La serra (Figura 27) è stata realizzata con struttura in acciaio e con copertura in film plastico; la serra ha dimensioni di base pari a 30.00 m x 10.00 m, altezza di colmo pari a 4.45 m; altezza di gronda pari a 2.45 m; la serra presenta un orientamento nord-sud dell'asse longitudinale.

Per la copertura della serra è stato utilizzato un film in EVA (PATILUX, P.A.T.I., San Zenone degli Ezzelini, Treviso, Italia), avente uno spessore di 0.20 mm. Il film è caratterizzato dai seguenti

coefficienti radiometrici: trasmissività totale solare pari al 90.9%, trasmissività diretta solare pari al 56,7%, trasmissività nell'IR lungo (LWIR) pari al 22.5%, quindi con effetto serra pari a 77.5 %.



Figura 27: Serra utilizzata per il test, sita presso il Centro sperimentale P. Martucci dell'Università degli studi di Bari A. Moro, Valenzano (BA).



Figura 28: Linee di vasi utilizzate per la coltivazione.

All'interno della serra sono state posizionate le linee per la coltivazione delle piante, composte ciascuna da 6 vasi delle dimensioni di 1.00 m x 0.40 m x 0.40 m, disposte trasversalmente all'asse longitudinale della serra (Figura 28). Tutte le linee sono dotate di sistema di irrigazione puntuale a goccia. Durante il test sono state effettuate coltivazioni di fiori di zucca e di basilico.

Il sistema di raffrescamento

La potenza frigorifera necessaria per il raffreddamento dell'area di coltivazione è stata calcolata attraverso l'equazione (3) di bilancio termico dell'aria all'interno della serra:

$$PF = \text{Rad_Sol} \cdot \tau_{cp} \cdot (1 - \rho_s) \cdot S - K_s \cdot S \cdot \Delta T \quad (3)$$

I termini dell'equazione (3) hanno il seguente significato (Figura 29): Rad_Sol è la radiazione solare esterna alla serra ed incidente su di un piano orizzontale, il valore della radiazione solare è stato impostato pari a 900 Wm⁻²; τ_{cp} è la trasmissività della copertura della serra, pari a 0,85; ρ_s è la riflettanza del suolo e dello schermo ombreggiante in serra, pari a 0,5; S è l' area coperta che deve essere raffreddata; K_s è il coefficiente di trasmissione termica globale della serra, che tiene conto di tutte le dispersioni termiche per irraggiamento, ventilazione, convezione, impostato pari a 10 W m⁻² °C⁻¹; ΔT è la differenza massima ammessa tra i valori di temperatura fra interno ed esterno della serra, impostata pari a 1°C. La superficie da raffreddare è stata ipotizzata pari a 40 m², considerando solo la superficie coltivata. Il fabbisogno di energia frigorifera che l'impianto solare di raffreddamento deve fornire è risultato pari a 14,9 kW.

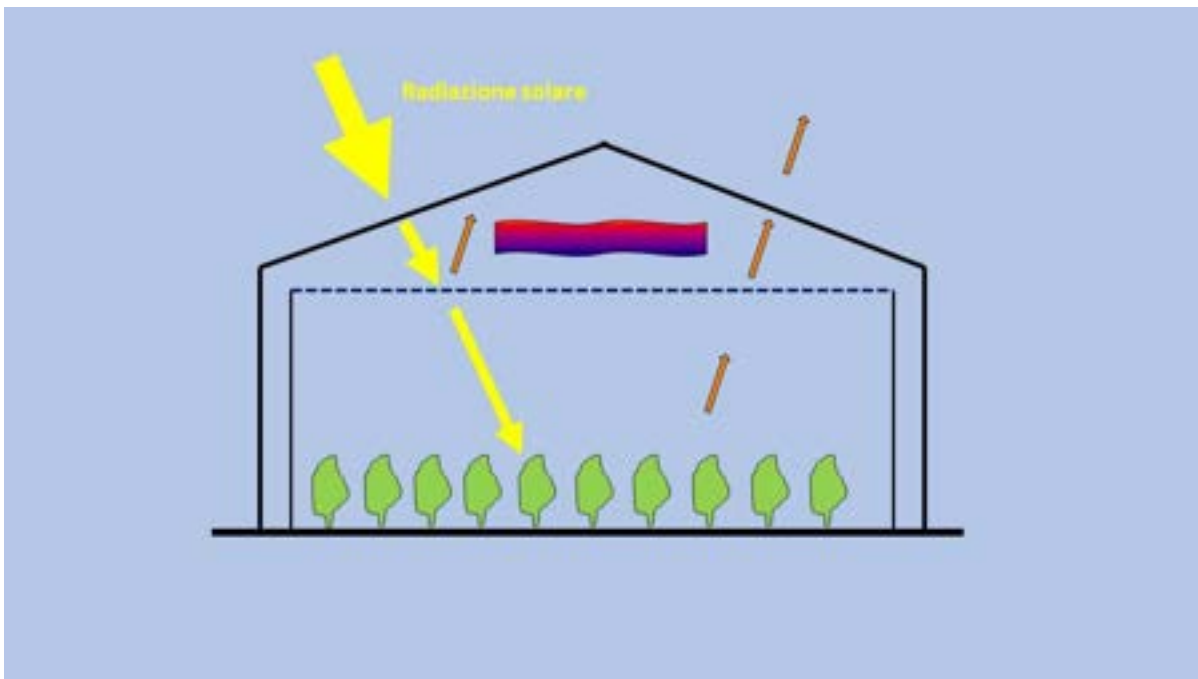


Figura 29: Schema dei flussi termici relativi alla radiazione solare in serra.

Per 4 linee di coltivazione sono state installati i tubi principali di raffreddamento di sezione pari a $\frac{1}{2}$ ", per una lunghezza di 6 m in mandata e di 6 m in ritorno. All'ingresso di ogni linea è stato posizionato un regolatore di portata in maniera da mantenere la stessa portata di acqua circolante in tutte le linee principali (Figura 30).



Figura 30: Regolatore di portata installato all'ingresso delle linee principali di raffreddamento posizionate sui vasi per coltivazione.



Figura 31: Sistema di tubi di raffreddamento installati in posizione centrale sui vasi di coltivazione.

Su 2 tubi principali di raffreddamento sono stati connessi 2 sistemi secondari alternativi di distribuzione del freddo: la prima soluzione ha previsto la realizzazione di un sistema di distribuzione terminale del freddo composto da tubi installati in posizione centrale sui vasi di coltivazione (Figura 31); la seconda soluzione ha previsto la realizzazione di un sistema di distribuzione posizionato in corrispondenza del bordo dei vasi. Nella seconda soluzione sono state posizionate a contatto con la serie di tubi disperdenti delle superfici disperdenti realizzate con piastre in alluminio non verniciate; le piastre, delle dimensioni di 0.5 m x 0.4 m e dello spessore di 0.5 mm, sono state coibentate con pannelli di polistirolo dello spessore di 3 cm posizionati sulla parte opposta rispetto all'area di coltivazione (Figura 32).



Figura 32: Sistema di tubi di raffreddamento posizionati in corrispondenza del bordo dei vasi di coltivazione e posti in contatto con le superfici metalliche di raffreddamento.

Le piastre in alluminio utilizzate per il raffreddamento dell'area di coltivazione sono state analizzate con lo spettrofotometro per misurare la loro emissività.

Le misure radiometriche, nell'intervallo di lunghezze d'onda dell'IR lungo compreso tra 2500 e 25000 nm (LWIR-Long Wave Infrared), sono state eseguite con uno spettrofotometro FT-IR (1760 X, Perkin Elmer Instruments, Norwalk, CT, USA) con passo di 4 cm⁻¹; è stata misurata la riflettività quasi normale, cioè con angolo di incidenza del raggio sul campione rispetto alla normale allo stesso pari a 10°.

L'emissività spettrale, in funzione della lunghezza d'onda (Figura 33), è stata calcolata dalla riflettività spettrale mediante la legge di Kirchhoff (Siegel & Howell, 1972):

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} \quad (4)$$

Il coefficiente di emissività nel range LWIR è stato calcolato come valore medio dell'emissività spettrale nel range di lunghezza d'onda da 7500 a 12500 nm (Vox et al., 2010).

Questo intervallo è stato scelto perché corrisponde alla lunghezza d'onda in cui l'emissione dei corpi a temperatura ambiente è massima, essendo un indice della capacità del materiale di emettere radiazioni e disperdere calore. Il coefficiente di assorbimento nell'IR lungo è stato valutato facendo l'assunzione che esso sia pari al coefficiente di emissività.

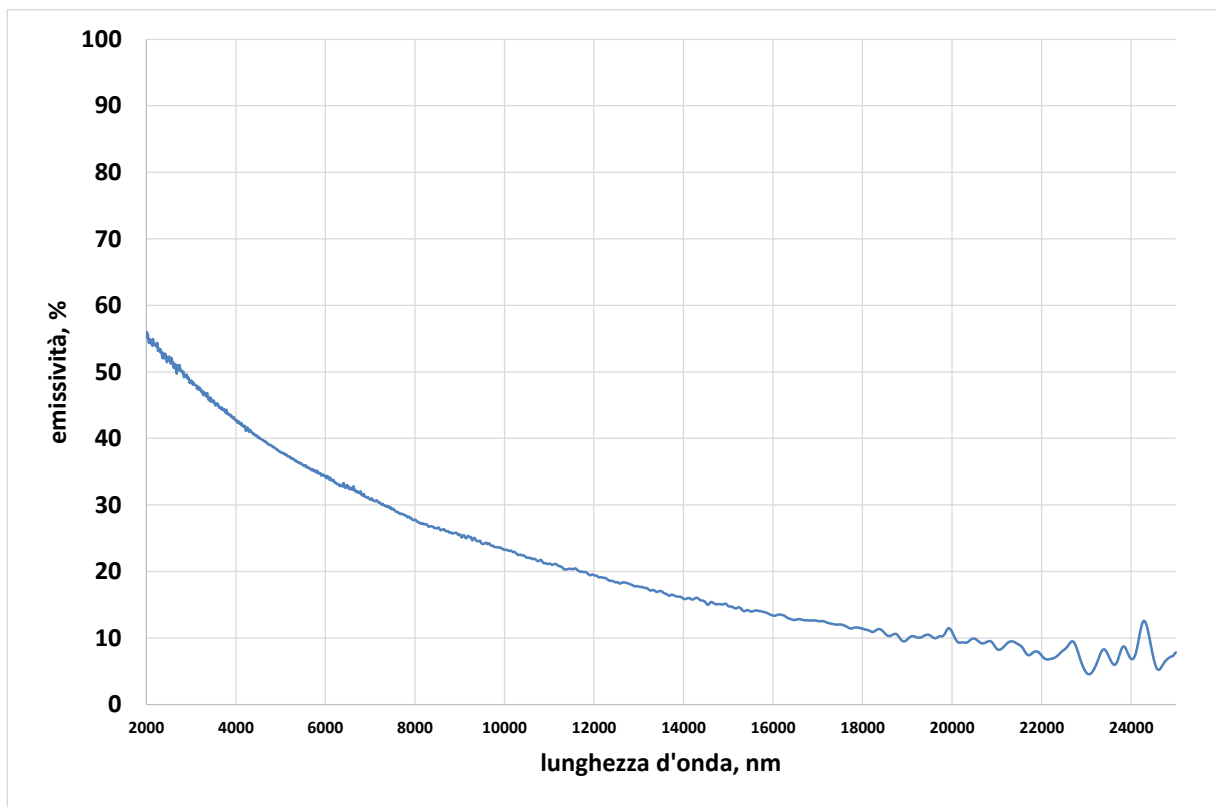


Figura 33: Emissività spettrale delle superfici in alluminio utilizzate per il raffreddamento delle piante in serra.

Il valore del coefficiente di emissività, uguale al valore del coefficiente di assorbimento, valutato come media fra 7500 e 12500 nm, è pari al 0.234.

Tali coefficienti sono stati calcolati per valutare lo scambio termico radiativo fra pianta e superfici metalliche, mediante le formule di seguito riportate; l'energia emessa dalla superficie metallica fredda è pari a:

$$\text{Rad_LWIR}_m = \epsilon_m \cdot \sigma \cdot T_m^4 \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad (5)$$

con ϵ_m pari al coefficiente di emissività della superficie metallica, σ costante di Stefan Boltzmann, pari a $5.6697 \times 10^{-8} [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$, e T_m è la temperatura della superficie metallica.

L'energia che la pianta riceve è pari a:

$$\epsilon_p \cdot \text{Rad_LWIR}_m = \epsilon_p \epsilon_m \cdot \sigma \cdot T_m^4$$

con ϵ_p pari al coefficiente di emissività della pianta.

L'energia emessa dalla pianta è pari a:

$$\text{Rad_LWIR}_p = \epsilon_p \cdot \sigma \cdot T_p^4 \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad (6)$$

con T_p pari alla temperatura della pianta.

L'energia ricevuta dalla superficie metallica è pari a:

$$\epsilon_m \cdot \text{Rad_LWIR}_p = \epsilon_m \cdot \epsilon_p \cdot \sigma \cdot T_p^4$$

pertanto la differenza fra le 2 energie, a meno del fattore di vista, è pari a:

$$\Delta_{LWIR} = \varepsilon_m \cdot \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_p^4 - \varepsilon_p \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot T_m^4 = \varepsilon_m \cdot \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_m^4) \quad [Wm^{-2}] \quad (7)$$

Se si ipotizza la temperatura della vegetazione pari a 30°C, la temperatura della superficie metallica fredda pari a 15 °C, il valore del coefficiente di emissività del metallo pari a 0.234 e il coefficiente di emissività della pianta pari a 0.9, lo scambio energetico radiativo netto fra pianta e superficie metallica è pari a 18.5 Wm⁻², con flusso di energia netto dalla pianta verso la superficie metallica.

L'equazione (7) mostra che a parità di temperatura la frazione di energia scambiata si può incrementare aumentando il valore del coefficiente di emissività della superficie metallica ε_m ; con un valore di ε_m pari a 0.9 il flusso di energia dalla pianta alla superficie metallica aumenta a 71 Wm⁻², con evidente incremento della capacità di raffreddamento.

Quindi la capacità di raffreddamento delle superfici metalliche può essere incrementata mediante verniciatura delle superfici stesse, in quanto così possono essere ottenuti valori più elevati dell'emissività del metallo (Vox et al., 2016).

Le misure in campo

La temperatura dell'acqua di raffreddamento è stata misurata mediante sonde PT100 (Figura 34).

Le sonde PT100, denominate T1, T2, T4 e T5, sono state disposte sui tubi di raffreddamento all'interno della serra secondo lo schema di figura 35.

Tre sonde del tipo a termistore, denominate TA1, TA2 e TA4, sono state poste in prossimità della zona di coltivazione per la misura della temperatura dell'aria nella zona di coltivazione nei seguenti tre casi (Figura 35): in assenza di raffreddamento (control), in presenza dei tubi posizionati in posizione centrale sui vasi di coltivazione e in presenza delle superfici disperdenti poste a contatto con la serie di tubi disperdenti sul bordo dei vasi.



Figura 34: Sonda di temperatura PT100 utilizzata per misurare la temperatura dell'acqua di raffreddamento nella zona di coltivazione.

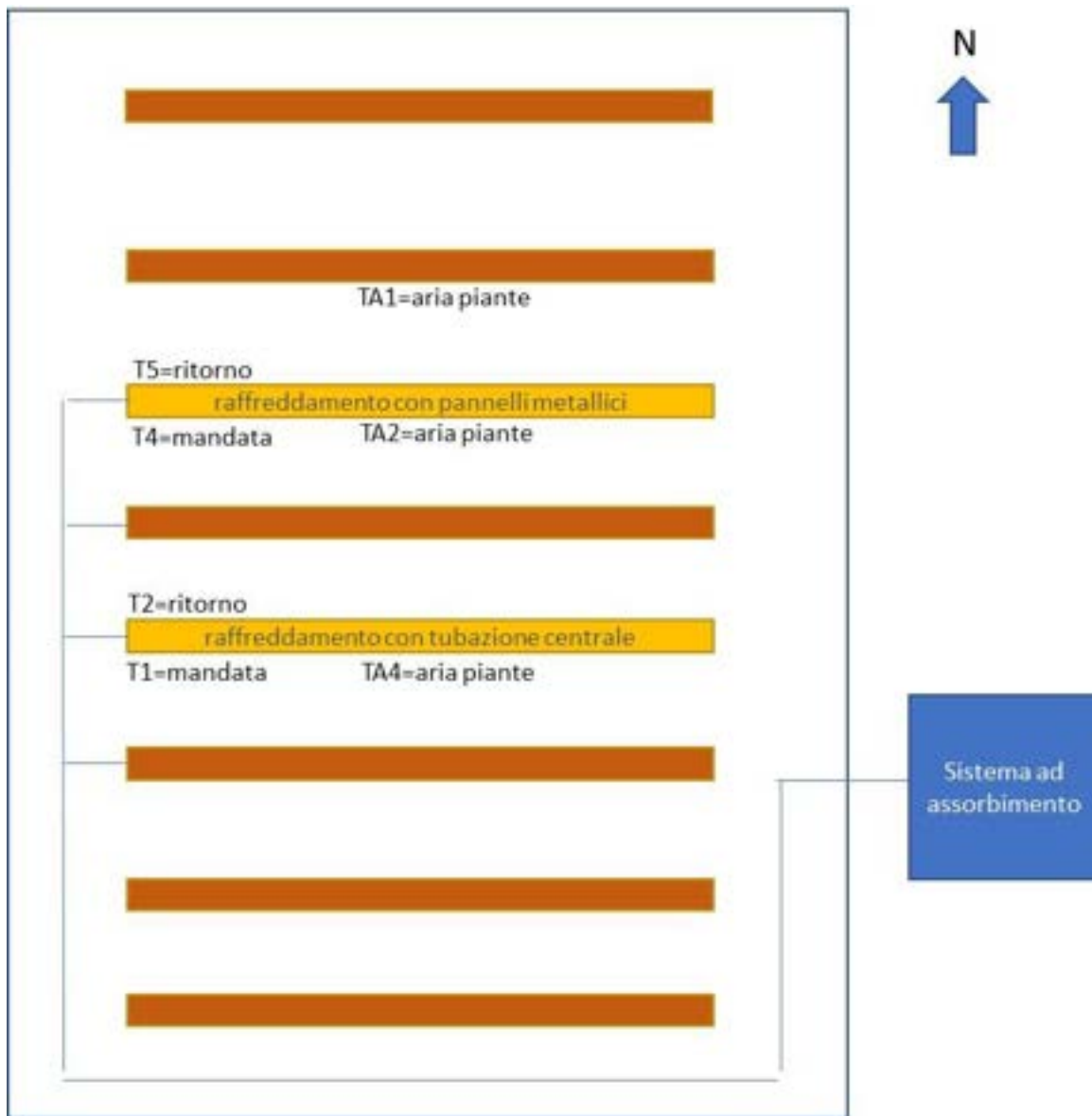


Figura 35: Posizionamento delle sonde sui tubi di raffreddamento in serra (T1,T2, T4,T5) e nell'aria in vicinanza delle piante (TA1, TA2, TA4).

Le figure 36 e 37 mostrano, in due diverse giornate calde, l'andamento delle temperature dell'aria in prossimità dell'area di coltivazione nelle zone climatizzate con le diverse tipologie di sistemi di raffreddamento: in assenza di raffreddamento (control), in presenza dei tubi posizionati in posizione centrale sui vasi di coltivazione (tubo) e in presenza delle superfici disperdenti poste a contatto con la serie di tubi disperdenti sul bordo dei vasi (tubo+superficie).

I dati rilevati (figure 36 e 37) mostrano come, in seguito alla partenza del sistema di raffreddamento dell'acqua (output assorbitore), la temperatura delle zone raffreddate sia con i tubi posti in posizione centrale, sia con le superfici metalliche sia di circa 2 °C inferiore alla temperatura misurata nei pressi della zona non raffreddata (control).

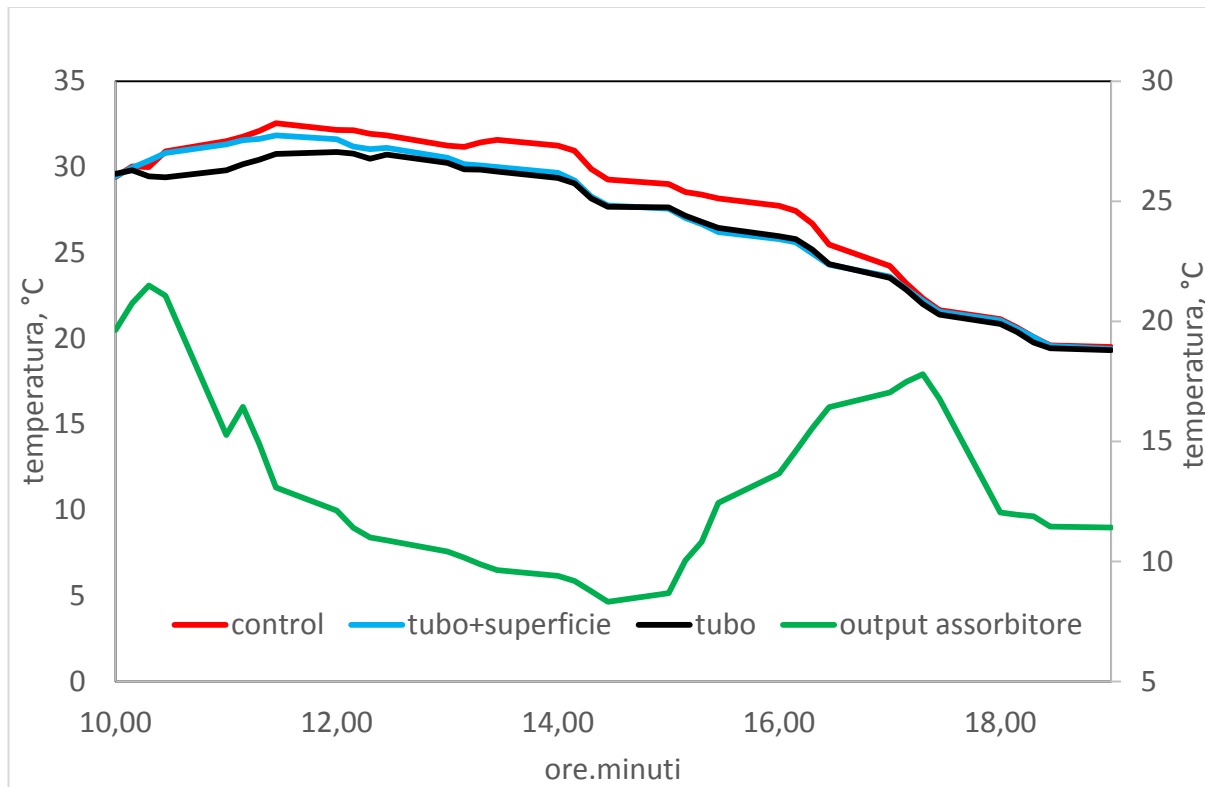


Figura 36: Temperature dell'aria in prossimità delle piante per zona non raffreddata (control), zona raffreddata con tubo posto in posizione centrale (tubo), zona raffreddata con tubo più superficie metallica (tubo+superficie), temperatura dell'acqua raffreddata in uscita dall'assorbitore (output assorbitore - asse dx).

Le temperature si mantengono vicine a 30 °C, quindi in un range di sicurezza per quanto riguarda le piante. È necessario sottolineare come le misure siano state realizzate con il telo ombreggiante aperto per ridurre l'effetto riscaldante della radiazione solare.

Ulteriori miglioramenti nel raffreddamento delle piante si possono ottenere confinando l'aria intorno alle piante mediante l'utilizzo di film plastici trasparenti, in modo da ridurre la dispersione del freddo per convezione dalla zona di coltivazione.

Per quanto riguarda la zona raffreddata con tubo più superficie metallica, un ulteriore incremento nell'effetto di raffreddamento si può ottenere verniciando le superfici metalliche in modo da incrementare l'emissività delle stesse.

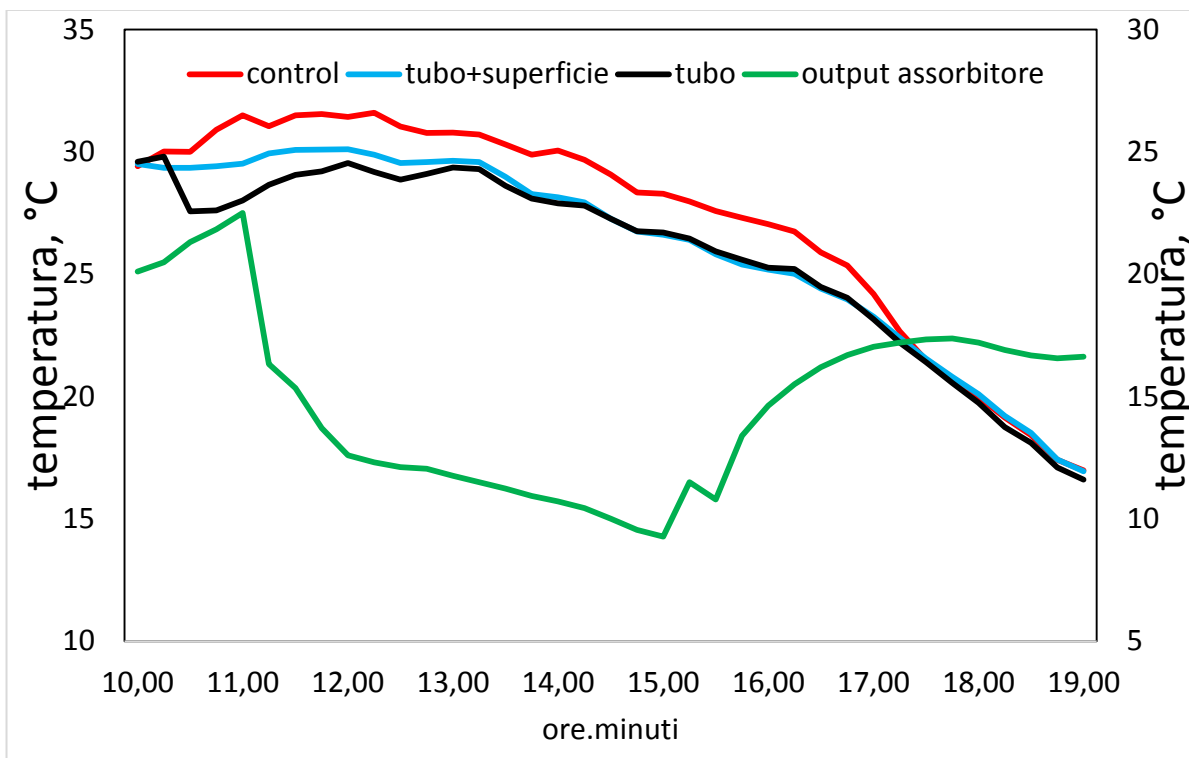


Figura 37: Temperature dell’aria in prossimità delle piante per zona non raffreddata (control), zona raffreddata con tubo posto in posizione centrale (tubo), zona raffreddata con tubo più superficie metallica (tubo+superficie), temperatura dell’acqua raffreddata in uscita dall’assorbitore (output assorbitore - asse dx).

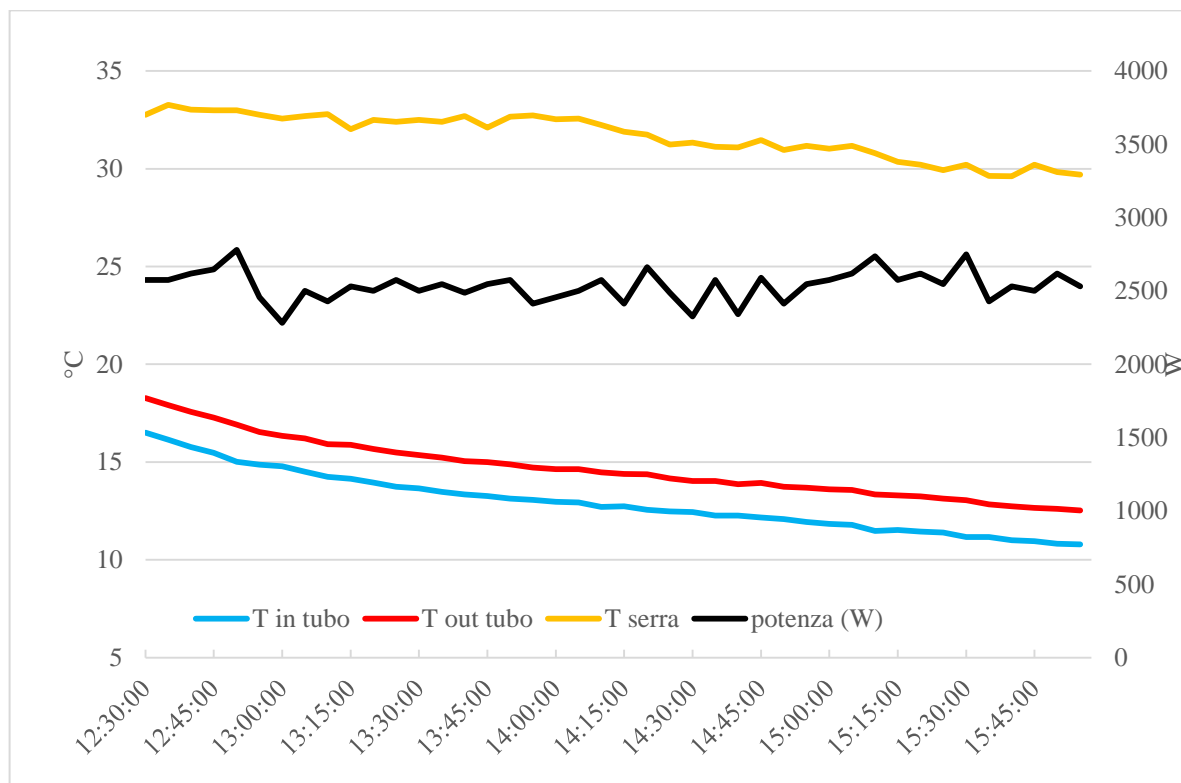


Figura 38: Temperature dell’acqua di raffreddamento in ingresso (T in tubo) nella serra e in uscita dalla serra (T out tubo), temperatura dell’aria della serra (T serra) e potenza frigorifera erogata (potenza, asse dx).

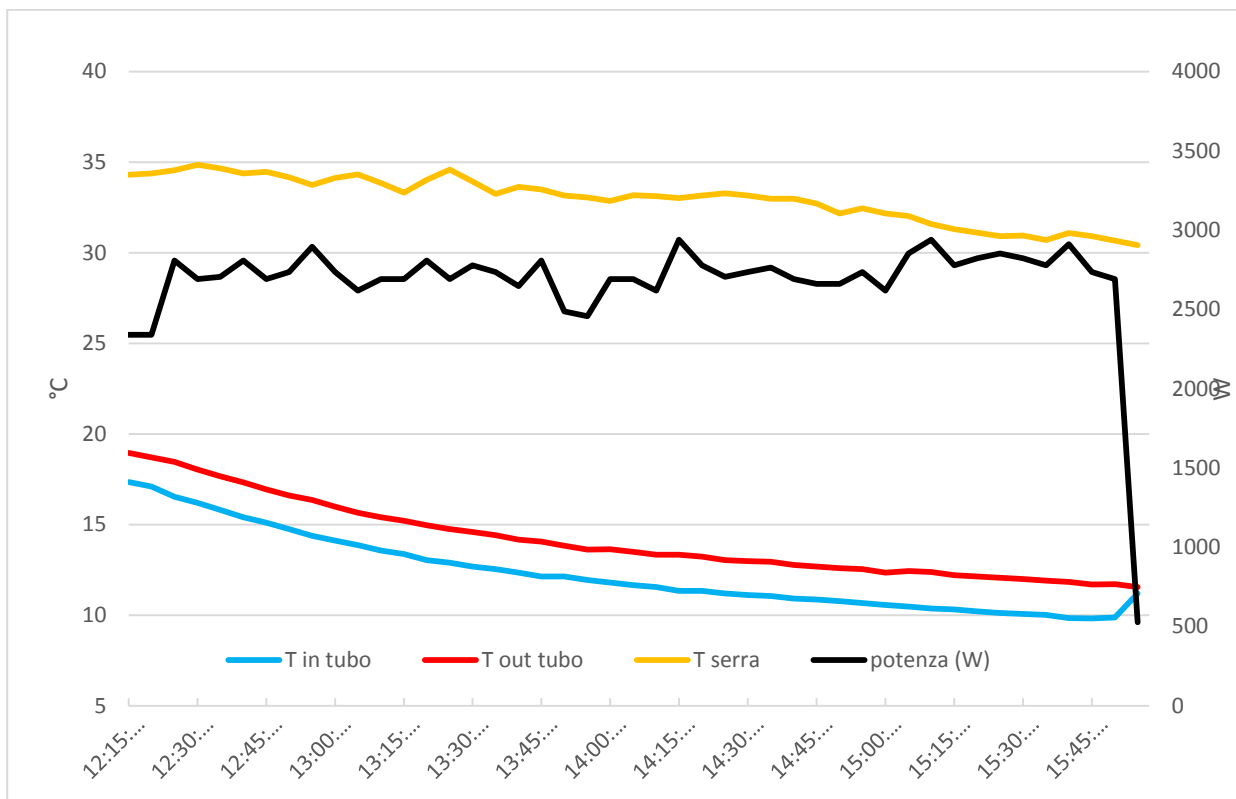


Figura 39: Temperature dell'acqua di raffreddamento in ingresso (T in tubo) nella serra e in uscita dalla serra (T out tubo), temperatura dell'aria della serra (T serra) e potenza frigorifera erogata (potenza, asse dx).

Le figure 38 e 39 mostrano le temperature dell'acqua di raffreddamento in ingresso nella serra e in uscita dalla serra, insieme con la potenza frigorifera erogata per 2 diverse giornate di funzionamento del cooling system. La potenza erogata varia fra 2500 e 3000 W.

I dati rilevati per il periodo di accensione del cooling nel periodo estivo hanno ricalcato in media questi valori, con una potenza frigorifera erogata di circa 3000 W; se si considera che l'acqua di raffreddamento è erogata contemporaneamente a 4 linee, regolate singolarmente con una portata di 5.25 l/min, la portata complessiva è pari a 21 l/min e la potenza media erogata ad ogni singola linea è pari a 750 W. Questa potenza è distribuita su di una superficie di 2.4 m², quindi la potenza per unità di superficie è pari 312.5 Wm⁻², tale valore è prossimo al valore di progetto che prevede di erogare 14.9 kW su di una superficie di coltivazioni pari a 40 m², che corrisponde ad una potenza per unità di superficie pari a 372.5 Wm⁻². Il valore misurato può essere incrementato ed avvicinato a quello di progetto favorendo lo scambio termico mediante l'incremento delle superfici fredde di dissipazione in prossimità delle piante.

I dati di temperatura misurati per i tubi delle linee di coltivazioni hanno rilevato una maggiore dissipazione frigorifera nel caso di sistema composto da tubazione e superfici metalliche di dispersione. Le figure 40 e 41 mostrano le differenze di temperatura dell'acqua di raffreddamento in ingresso ed in uscita sulla linea con tubazione e superfici metalliche di dispersione e sulla linea con la sola tubazione centrale; si può notare come nel primo caso l'acqua subisca un riscaldamento maggiore rispetto al caso di presenza della sola tubazione centrale, indice di una maggiore dispersione di energia di raffreddamento.

In media la linea composta da tubazione e superfici metalliche di dispersione ha dissipato nei periodi di funzionamento del cooling system 798 W mentre la linea con solo tubo ha dissipato 635 W, quindi l'uso delle superfici disperdenti ha consentito di incrementare il valore di dissipazione del 26%.

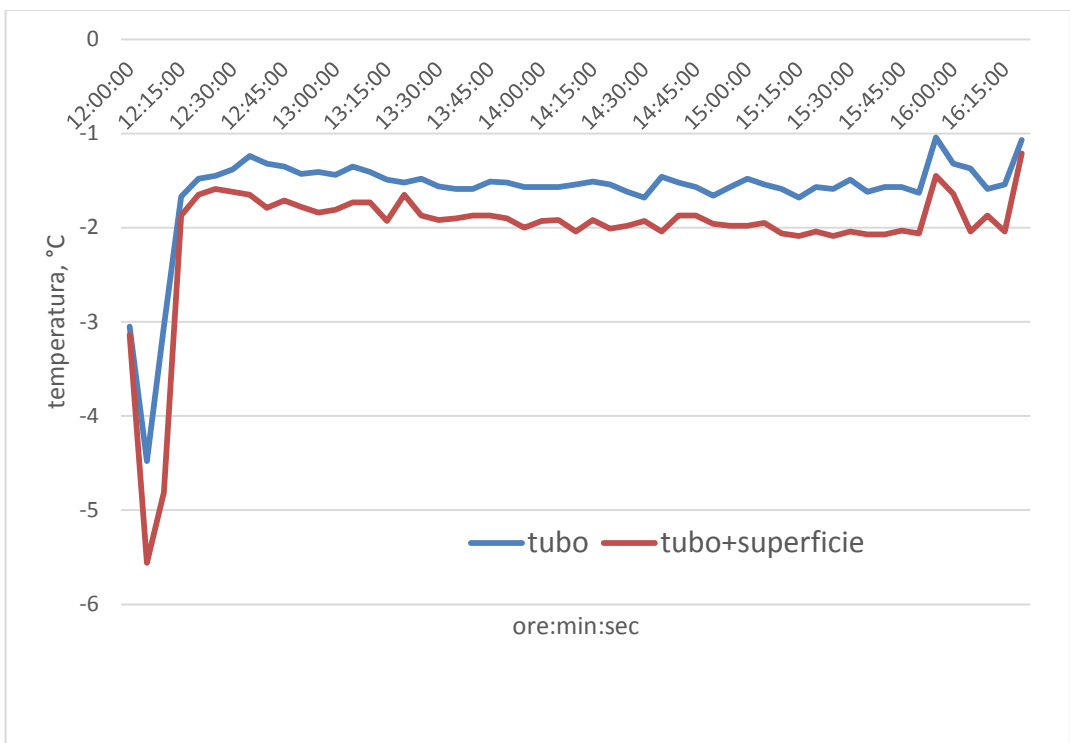


Figura 40: Differenza di temperatura dell’acqua di raffreddamento in ingresso e in uscita sulla linea con tubazione e superfici metalliche di dispersione (tubo + superficie) e sulla linea con la sola tubazione centrale (tubo) in un giorno di funzionamento dell’impianto di solar cooling nel periodo estivo in avvio e a regime.

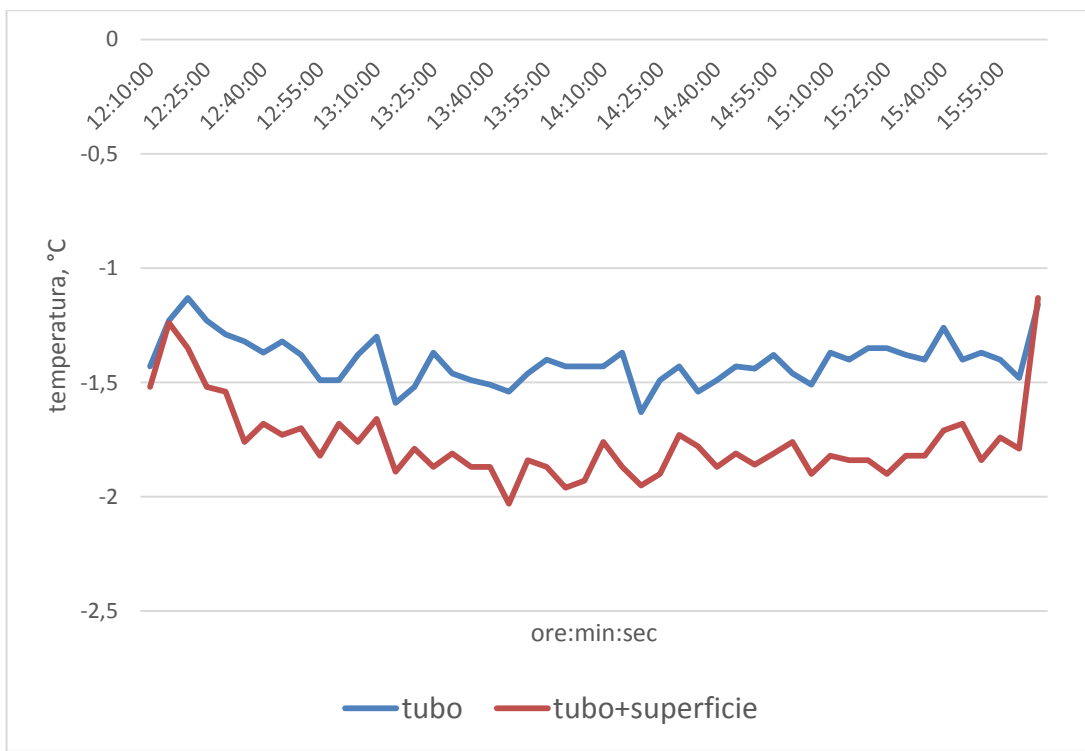


Figura 41: Differenza di temperatura dell’acqua di raffreddamento in ingresso e in uscita sulla linea con tubazione e superfici metalliche di dispersione (tubo + superficie) e sulla linea con la sola tubazione centrale (tubo) in un giorno di funzionamento dell’impianto di solar cooling nel periodo estivo.

Questa differenza di energia frigorifera fornita alle linee non ha trovato comunque riscontro in una temperatura dell'aria più bassa nella zona di coltivazione; tale risultato conferma che risulta necessario confinare il freddo mediante una barriera fisica per evitare che esso sia disperso al di fuori della zona di coltivazione.

5. Pubblicazioni

I risultati ottenuti dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari e dall'ENEA UTEE AGR sono stati presentati durante il Simposio Internazionale ISHS Greensys 2017 "New Technologies for Environment Control, Energy-saving and Crop Production in Greenhouse and Plant Factory", che si è tenuto a Pechino, Cina, 20-24 Agosto 2017.

La comunicazione dal titolo "Climate control inside a greenhouse by means of a solar cooling system", autori Puglisi G., Vox G., Schettini E., Morosinotto G., Campiotti C.A., è stata oggetto di numerose domande e curiosità da parte di ricercatori stranieri.

Gli articoli pubblicati sono stati:

1. Campiotti C. A., Bibbiani C., Campiotti A., Schettini E., Viola C., Vox G. (2016) Innovative sustainable strategies in agro-food systems and in buildings for energy efficiency (Strategie innovative sostenibili per l'efficienza energetica nel settore agro-alimentare e negli edifici) Rivista di Studi sulla Sostenibilità. Vol. 2, pagine 79-96. DOI: 10.3280/RISS2016-002008
2. Blanco, I., Scarascia Mugnozza, G., Schettini, E., Puglisi, G., Campiotti, C.A. and Vox, G. (2017). Design of a solar cooling system for greenhouse conditioning in a Mediterranean area. *Acta Horticulturae*, vol. 1170, pagine 485-492. DOI: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.60. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.60>
3. Bibbiani, C., Campiotti, C.A., Schettini, E. and Vox, G. (2017). A sustainable energy for greenhouses heating in Italy: wood biomass. *Acta Horticulturae*, vol. 1170, pagine 523-530. DOI: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.65. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.65>

Il seguente articolo è stato inviato per la sottomissione per la pubblicazione:

1. Giovanni Puglisi, Giuliano Vox, Evelia Schettini, Gioacchino Morosinotto, Carlo Alberto Campiotti. Climate control inside a greenhouse by means of a solar cooling system. (*Acta Horticulturae*)

6. Riferimenti bibliografici

1. Adaro, J.A., Galimberti, P.D., Lema, A.I., Fasulo, A., Barral, J.R. (1999). Geothermal contribution to greenhouse heating. *Applied Energy*, 64, 241-249.
2. Ahmed, E.M., Abaas, O., Ahmed, M., Ismail, and M.R. (2011). Performance evaluation of three different types of local evaporative cooling pads in greenhouses in Sudan. *Saudi J. Biol. Sci.* 18 (1), 45-51.
3. Albright, L. D. (2002) Controlling greenhouse environments. *Acta Horticulturae* 578, 47-54
4. Al-Helal, I.M., Abdel-Ghany, A.M. (2011). Measuring and evaluating solar radiative properties of plastic shading nets. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95 (2), 677-683.

5. Allouhi, A., Kousksou, T., Jamil, A., Bruel, P., Mourad, Y., and Zeraoui, Y. (2015). Solar driven cooling systems: An updated review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 44, 159-181,
6. Al-Alili, A., Islam, M.D., Kubo, I., Hwang, Y., and Radermacher, R. (2012). Modeling of a solar powered absorption cycle for Abu Dhabi. *Appl Energ* 93: 160-167.
7. Bardi, U., El Asmar, T., Lavacchi, A. (2013). Turning electricity into food: The role of renewable energy in the future of agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 53, 224-231.
8. Bargach, M.N., Tadili, R., Dahman, A.S., Boukallouch, M. (2000). Survey of thermal performances of a solar system used for the heating of agricultural greenhouses in Morocco. *Renewable Energy*, 20 (4), 415-433.
9. Benli, H. (2013). A performance comparison between a horizontal source and a vertical source heat pump systems for a greenhouse heating in the mild climate Elazig, Turkey. *Applied Thermal Engineering*, 50, 197-206.
10. Blanco I., Schettini E., Scarascia Mugnozza G., Puglisi G., Campiotti C. A., Giagnacovo G., Vox G., (2015). Thermal solar collectors and absorption system applied to greenhouse cooling. *Proceedings of the 43rd International Symposium on Agricultural Engineering "Actual Tasks on Agricultural Engineering"*, 24-27/2/2015, Opatija, Croatia, 713-722. (ISSN 1848-4425. <http://atae.agr.hr>)
11. Blanco, I., Pascuzzi, S., Anifantis, A. S., and Scarascia Mugnozza G. (2014). Study of a pilot photovoltaic-electrolyzer-fuel cell power system for a geothermal heat pump heated greenhouse and evaluation of the electrolyzer efficiency and operational mode. *J. Agricult. Engineer.* 45 (3), 111-118.
12. Buonasorte, G., Cataldi, R., Passaleva, G. (2007). Geothermal Development in Italy: From Present to Future. *Proceedings. European Geothermal Congress 2007*, 30 May-1 June 2007, Unterhaching, Germany.
13. Campiotti, C., Bibbiani, C., Dondi, F., Scoccianti, M., Viola, C. (2011a). Energy efficiency and photovoltaic solar for greenhouse agriculture. *Journal of Sustainable Energy*, II (1), 51-56.
14. Campiotti, C., Dondi, F., Di Carlo, F., Scoccianti, M., Alonzo, G., Bibbiani, C., and Incrocci, L. (2011). Preliminary results of a PV closed greenhouse system for high irradiation zones in South Italy. *Acta Hort.* 893, 243-250. DOI: 10.17660/ActaHortic.2011.893.18
15. Campiotti, C., Viola, C., Alonzo, G., Bibbiani, C., Giagnacovo, G., Scoccianti, M., Tumminelli, G. (2012). Sustainable greenhouse horticulturae in Europe. *Journal of sustainable energy*, 3 (3), 159-163.
16. Campiotti, C.A., Alonzo, G., and Ardeleanu, M.P. (2013). Energy challenge and agriculture in Italy. *Quality - Access to Success*, 14 (1), 18-22.
17. Campiotti, C.A., Bibbiani, C., Campiotti, A., Schettini, E., Viola, C., and Vox, G. (2016). Innovative sustainable strategies in agro-food systems and in buildings for energy efficiency. *Rivista di Studi sulla Sostenibilita*, (2), 79-96. DOI: 10.3280/RISS2016-002008.
18. Campiotti C. A., Morosinotto G., Puglisi G., Schettini E., Vox G., (2016). Performance evaluation of a solar cooling plant applied for greenhouse thermal control. *Proceedings of Florence "Sustainability of Well-Being International Forum"*, 2015: Food for Sustainability and not just food, FlorenceSWIF2015. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 8, 664–669. (DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.02.076)
19. Capozza, A., Zarrella, A., Galgaro, A., De Carli, M. (2012). Linee guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore. *Rapporto RSE 12000317* (consultato: 30 ottobre 2014).

Disponibile all'indirizzo: <http://doc.rse-web.it/doc/doc-sfoglia/12000317-314717/12000317-314717.html>

20. Castellano, S. (2014). Photovoltaic greenhouses: Evaluation of shading effect and its influence on agricultural performances. *J. Agric. Eng.* 45 (4), 168-175. DOI: 10.4081/jae.2014.433
21. Castrignanò, A. (2005). Energia solare: una soluzione vincente. *Ambiente e Agricoltura*, 5, 9-17.
22. Chai, L., Ma, C., Ni, J.Q. (2012). Performance evaluation of ground source heat pump system for greenhouse heating in norther China. *Biosystems Engineering*, 111, 107-117.
23. Chel, A., Kaushik, G. (2011). Renewable energy for sustainable agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 31 (1), 91-118.
24. Chiabrando, R., Fabrizio, E. (2009). La sostenibilità energetica delle costruzioni: criteri progettuali e strumenti di verifica. IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Ischia Porto (Italia), 12-16 settembre 2009.
25. Chidambaram, L.A., Ramana, A.S., Kamaraj G., and Velraj, R. (2011). Review of solar cooling methods and thermal storage options. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 15 (6), 3220-3228.
26. Cuce, E., Harjunowibowo, D., Cuce, P.M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, pp. 34-59. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.077
27. Davies, P.A. (2005). A solar cooling system for greenhouse food production in hot climates. *Sol. Energy* 79 (6), 661-668.
28. De Pascale, S., Maggio, A. (2005). Sustainable protected cultivation at a mediterranean climate. Perspectives and challenges. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 691, 29-42.
29. Dickson, M., Fanelli, M. (2004). What is geothermal energy. Pisa, Italy: Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR.
30. Dowlatabadi, H., Hanova, J. (2007). Strategic GHG reduction through the use of ground source heat pump technology. *Environmental research letters*, 2, 1-8.
31. EEA (2016). Annual European Union greenhouse gas inventory 1990 – 2014 and inventory report 2016. Submission to the UNFCCC Secretariat. Technical report No 15/2016. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. <http://www.eea.europa.eu/publications/europeanunion-greenhouse-gas-inventory-2016>.
32. ENEA, 2000 (2017). L'energia eolica, opuscolo della collana "Sviluppo Sostenibile", G19-032-0. Edito da ENEA, Roma. <http://old.enea.it/com/web/pubblicazioni/Op19.pdf>
33. European Commission (2016a). CAP CONTEXT INDICATORS, 2014-2020 39. WATER ABSTRACTION IN AGRICULTURE, 2016 update, https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/cap-indicators/context/2016/c39_en.pdf
34. European Commission (2016b). CAP CONTEXT INDICATORS, 2014-2020. 44. ENERGY USE IN AGRICULTURE, FORESTRY AND THE FOOD INDUSTRY, 2016 update. https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/cap-indicators/context/2016/c44_en.pdf
35. Fabrizio, E. (2012). Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection, *Energy and Buildings*, 53, 57-63.
36. Farzaneh-Gord, M., Arabkoohsar, A, Bayaz, M.D.D., Khoshnevis, A.B. (2013). New method for applying solar energy in greenhouses to reduce fuel consumption. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6(4), 64 – 75.

37. Florides, G.A., Pouloupatis, P.D., Kalogirou, S., Messaritidis, V., Panayides, I., Zomeni, Z., Partasides, G., Lizides, A., Sophocleous, E., Koutsoumpas, K. (2011). The geothermal characteristics of the ground and the potential of using ground coupled heat pumps in Cyprus. *Energy*, 36 (8), 5027-5036.
38. Francescato, V., Berno, F., Negrin, M., Berton, M., Zanetti G. (2011). *Risparmio energetico e biomasse agroforestali per il riscaldamento delle serre. Guida all'uso razionale dell'energia e delle biomasse nelle colture protette in Italia*. Editore ENAMA. Campodarsego (PD), IT: La Grafica Faggian S.r.l.
39. Ghaddar, N. K., Shihab, M., and Bdeir, F. (1997). Modeling and simulation of solar absorption system performance in Beirut. *Renew Energy* 10 (4):539-558.
40. Ghafoor, A., and Munir, A. (2015). Worldwide overview of solar thermal cooling technologies, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 43, 763-774.
41. Ghosal, M.K., Tiwari, G.N., and Srivastava, N.S.L. (2004). Thermal modelling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation. *Energ Buildings* 36 (3): 221–227.
42. Ghosal, M.K., and Tiwari, G.N. (2006). Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. *Energ. Convers. Manage.* 47 (13–14), 1779-1798.
43. GSE (Gestore Servizi Energetici) (2014), Totale dei risultati del Conto Energia, http://www.gse.it/it/Conto%20Energia/GSE_Documenti/Fotovoltaico/05%20Risultati%20incentivazione/TOTALE_DEI_RISULTATI_DEL_CONTO_ENERGIA.pdf
44. Harmanto Salokhe, V., Babel, M., Tantau, H. (2005). Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. *Agricultural Water Management*, 71 (3), 225-242.
45. Hasanuzzaman, M., Malek, A.B.M.A., Islam, M.M, Pandey, A.K., Rahim, N.A. (2016). Global advancement of cooling technologies for PV systems: A review. *Solar Energy*, Volume 137, Pages 25-45
46. Hassanien, R.H.E., Li, M., Dong Lin, W. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, pp. 989-1001. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.095
47. Hwang, Y., Radermacher, R., Al Alili, A., and Kubo, I. (2008). Review of Solar Cooling Technologies. *Hvac&R Res* 14 (3): 507-528
48. IEA International Energy Agency (2017). <https://www.iea.org/>
49. Jain, D., and Tiwari, G.N. (2002). Modeling and optimal design of evaporative cooling system in controlled environment greenhouse. *Energ Convers Manage* 43 (1): 2235–2250.
50. Kalkan, N., Young, E.A., and Celiktas, A. (2012). Solar thermal air conditioning technology reducing the footprint of solar thermal air conditioning. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 16 (8), 6352-6383.
51. Kondili, E., Kaldellis, J.K. (2006). Optimal design of geothermal–solar greenhouses for the minimisation of fossil fuel consumption. *Applied Thermal Engineering*, 26 (8–9), 905-915.
52. Kumar, K.S., Tiwari, K.N., and Jha, M.K. (2009). Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review. *Energ Buildings* 41 (12): 1269-1275.
53. Lamarche, L., Kajl, S., Beauchamp, B. (2010). A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics*, 39 (2), 187-200.

54. Lazaar, M., Kooli, S., Hazami, M., Farhat, A., Belghith, A. (2004). Use of solar energy for the agricultural greenhouses autonomous conditioning. *Desalination*, 168 (1-3), 169-175.
55. Magnani, G. Filippi, F., Marchetti, L., Ferraresi, A., Cascone, M. (2011). Un nuovo film termico PE/EVA-PA per la copertura delle serre: risultati sul pomodoro. *Colture Protette*, 10, 86-93
56. Mahmoudi, H., Spahis, N., Goosen, M.F., Sablani, S., Abdul-Wahab, S.A., Ghaffour, N., Drouiche, N. (2009). Assessment of wind energy to power solar brackish water greenhouse desalination units: A case study from Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (8), 2149-2155.
57. MISE, (2005). Ministero Attività Produttive Direzione Generale Energia e Risorse Minerarie Scenario tendenziale dei consumi e del fabbisogno al 2020 (Maggio 2005) http://dgsaie.mise.gov.it/dgerm/scenarioenergetico/scenario_energetico_tendenziale_al_2020_vers05_05.pdf
58. Mongkon, S., Thepa, S., Namprakai, P., and Pratinthong, N. (2014). Cooling performance assessment of horizontal earth tube system and effect on planting in tropical greenhouse. *Energ. Convers. Manage.* 78, 225-236.
59. Mussard, M. (2017). Solar energy under cold climatic conditions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 74, Pages 733-745
60. Nelson, P. V. (2002) *Greenhouse operation and management*, Sixth Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 692 pp
61. Ozgener, O., Hepbasli, A. (2005). Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system. *Energy and Buildings*, 37 (1), 101-110.
62. Ozgener, O. (2010). Use of solar assisted geothermal heat pump and small wind turbine systems for heating agricultural and residential buildings, *Energy*, 35 (1), 262-268.
63. Pardossi, A., Tognoni, F., Incrocci, L. (2004). Mediterranean greenhouse technology. *Chronica Horticulturae*, 44, 28-34.
64. Puglisi, G., Morosinotto, G., and Emmi, G. (2015). Development of an Advanced Simulation Model for Solar Cooling Plants. *Energy Procedia* 70, 495-503.
65. PVGIS (2014). Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>
66. Russo, G., Anifantis, A.S., Verdiani, G., and Mugnozza, G.S. (2014). Environmental analysis of geothermal heat pump and LPG greenhouse heating systems. *Biosyst. Eng.* 127, 11-23. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.08.002
67. Sarbu, I., Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 70, 441-454.
68. Scarascia Mugnozza, G. (1995). Quali strutture per il serricoltore italiano. *Colture Protette* 24 (9), 95-105 / (10), 61-65.
69. Scarascia Mugnozza, G., (2001). Caratteri tipologici, strutturali e ambientali innovativi degli insediamenti serricoli. *Atti dell'Accademia dei Georgofili*, Firenze, 15 Novembre, XLVIII, 785-829.
70. Scarascia Mugnozza G., Anifantis A., (2009). "Dal fotovoltaico al termico", *Colture Protette*, 6, 40-43.
71. Scarascia Mugnozza, G., Sica, C., Russo, G. (2011). Plastic materials in European agriculture; actual use and perspectives. *Journal of Agricultural Engineering*, 3, 15-28.

72. Schettini, E., de Salvador, F.R., Scarascia-Mugnozza, G., Vox, G. (2011). Radiometric properties of photoselective and photoluminescent greenhouse plastic films and their effects on peach and cherry tree growth. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 86 (1), 79-83.
73. Sethi, V. P., and Sharma, S. K. (2007). Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Sol Energy* 81 (12): 1447-1459.
74. Sethi, V.P., Sharma, S.K. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 82 (9), 832-859.
75. Siegel, R., & Howell, J.R. (1972). *Thermal radiation heat transfer*. McGraw-Hill Book Company, New York.
76. Stanghellini C., Dai J., Kempkes F. (2011). Effect of near-infrared-radiation reflective screen materials on ventilation requirement, crop transpiration and water use efficiency of a greenhouse rose crop. *Biosystems Engineering*, 110 (3), 261-271.
77. Šúri, M., Huld, T.A., Dunlop, E.D., Ossenbrink, H.A. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries, *Solar Energy*, 81(10), 1295-1305.
78. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision*. New York: United Nations. https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf
79. Vadiée, A., Martin, V. (2012). Energy management in horticultural applications through the closed greenhouse concept, state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (7), 5087-5100.
80. Vadiée, A., Martin, V. (2014). Energy management strategies for commercial greenhouses. *Applied Energy*, 880-888.
81. von Zabeltitz, C. (1999). Chapter 2: Greenhouse structures. *Greenhouse Ecosystems*, G. Stanhill and H. Zvi Enoch, Elsevier, Amsterdam, 17-69.
82. Vox, G., Schettini, E., Lisi Cervone, A., and Anifantis A. (2008). Solar thermal collectors for greenhouse heating. *Acta Hort* 801: 787-794.
83. Vox G., Schettini E. (2009). Serre rispettose dell'ambiente. *Colture Protette*, 38 (6): 44-48.
84. Vox, G., Teitel, M. Pardossi, A., Minuto, A., Tinivella, F., and Schettini E. (2010). Chapter 1: Sustainable Greenhouse Systems. in "Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management", Augusto Salazar e Ismael Rios Editors, Nova Science Publishers, Inc. NY USA, ISBN: 978-1-60876-269-9: 1-79.
85. Vox, G., Blanco, I., Mugnozza, G.S., Schettini, E., Bibbiani, C., Viola, C., and Campiotti, C.A. (2014). Solar absorption cooling system for greenhouse climate control: Technical evaluation. *Acta Hort*. 1037, 533-538. DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1037.66.
86. Vox G., Maneta A., Schettini E., (2016). Evaluation of the radiometric properties of roofing materials for livestock buildings and their effect on the surface temperature. *Biosystems Engineering*, 144, 26-37. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.01.016.
87. Wang S., Boulard T. (2000). Predicting the Microclimate in a Naturally Ventilated Plastic House in a Mediterranean Climate. *J. agric. Engng Res.* 75, 27-38.
88. Yildiz, A., Ozgener, O., and Ozgener, L. (2012). Energetic performance analysis of a solar photovoltaic cell (PV) assisted closed loop earth-to-air heat exchanger for solar greenhouse cooling: An experimental study for low energy architecture in Aegean Region. *Renew Energ* 44: 281-287.

7. Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" ha una lunga tradizione nell'insegnamento e nella ricerca scientifica nel campo dell'ingegneria agraria. L'area scientifica di maggiore interesse riguarda lo studio degli aspetti ingegneristici relativi alle strutture, agli impianti, ai materiali e all'energia concernenti gli insediamenti produttivi agricoli quali serre, allevamenti e industrie di trasformazione dei prodotti agricoli. Le ricerche condotte dal gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT sono finalizzate a ridurre l'impatto ambientale dei sistemi produttivi agricoli mediante l'individuazione di impianti e materiali finalizzati alla riduzione dei consumi energetici, alla gestione dei reflui prodotti e all'introduzione delle energie rinnovabili. Il gruppo di ricerca ha partecipato a numerosi progetti europei e nazionali, tra i quali: EC RTD "Biodegradable plastics for environmentally friendly mulching and low tunnel cultivation-Bioplastics" (2001-2005); EC LIFE Environment "Biodegradable coverages for sustainable agriculture – BIO.CO.AGRI." (2003-2005); EC CRAFT "Development of protective structures covered with permeable materials for agricultural use - AGRONETS" (2003-2006); EC Collective Research "Labelling agricultural plastic waste for valorising the waste stream - LABELAGRIWASTE" (2006-2009); MIPAF "Ricerche per il miglioramento della frutticoltura meridionale – FRU.MED." (2005-2011); Piano Annuale di Realizzazione 2012 "Modelli per l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici mediante la copertura con essenze vegetali in ambiente mediterraneo"; Piano Annuale di Realizzazione 2013 "Eco-Greenroof & Vertical Greenery System"; Piano Annuale di Realizzazione 2015 "Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra"; European Territorial Cooperation Programme Greece-Italy 2007-2013 "Agricultural Waste valorisation for a competitive and sustainable Regional Development - AWARD" (2013 - 2015).

Il gruppo di ricerca è costituito da:

prof. ing. Giuliano Vox – responsabile scientifico, Professore Associato, Ingegnere Elettronico, esperto di energie rinnovabili, di microclima e di sensoristica ambientale.

prof.ssa ing. Evelia Schettini – Professore Associato, Ingegnere Civile, PhD in Ingegneria delle Strutture, esperta di materiali di copertura e di impianti per la climatizzazione delle serre.

prof. ing. Giacomo Scarascia Mugnozza – Direttore del Dipartimento DISAAT, Professore Ordinario, Ingegnere Civile, esperto di strutture serricole e di materiali costruttivi.

ing. Ileana Blanco – Assegnista di ricerca, Ingegnere Civile, PhD in Ingegneria dei Biosistemi, esperta di impianti per la climatizzazione delle serre alimentati da energia rinnovabile.

dott. Costantino Anifantis - EP, Agronomo, responsabile del campo sperimentale di Valenzano.

Sig. Francesco Ferrulli - Tecnico, esperto di sensoristica.