

Metodologie e tecnologie innovative per il monitoraggio, il controllo e l'aumento dell'efficienza energetica nelle colture protette



Progetto cofinanziato tramite il Programma Attuativo Regionale del Fondo Aree Sottoutilizzate Regione Liguria 2007-2013 (PAR-FAS)





Dibris



Metodologie e tecnologie innovative per il monitoraggio, il controllo e l'aumento dell'efficienza energetica nelle colture protette

SMART AGRO-MANUFACTURING LABORATORY (SAM-LAB)

**Laboratorio di ricerca per la sperimentazione
di metodologie e tecnologie innovative per il
monitoraggio, il controllo e l'aumento dell'efficienza
energetica nei processi agro-manifatturieri nelle
colture protette**

**Progetto cofinanziato tramite il Programma Attuativo Regionale
del Fondo Aree Sottoutilizzate Regione Liguria 2007-2013 (PAR-FAS)**



INDICE

Introduzione	7
Obiettivi del progetto.....	7
Risultati del progetto	8
Ringraziamenti	8
1 La coltura protetta nel Mondo, nel Mediterraneo ed in Liguria: numeri e specificità	9
1.1 Stime della produzione agricola in ambiente protetto a livello mondiale ed europeo.....	9
1.2 I numeri della produzione agricola in ambiente protetto in Italia.....	16
1.3 I numeri della produzione agricola in ambiente protetto in Liguria.....	26
1.4 I consumi energetici legati alla produzione in ambiente protetto e la loro ottimizzazione in un’ottica di sostenibilità.....	31
1.4.1 Consumi legati all’agricoltura in Italia.....	31
1.4.2 I consumi energetici in agricoltura protetta	34
1.5 Legislazione di riferimento italiana ed europea su consumi/risparmio energetici in serra, ed incentivi.....	42
1.5.1 Piano normativo energie rinnovabili	42
1.5.2 Piano normativo per serre fotovoltaiche.....	42
1.6 Coltura di riferimento per la sperimentazione: il basilico.....	45
1.6.1 Le origini.....	45
1.6.2 Il basilico oggi.....	46
1.6.3 Le caratteristiche del basilico “genovese”	47
1.6.4 Dati statistici ed economici	50
1.6.5 La coltivazione sotto il profilo energetico.....	51
1.6.6 Tecniche di coltivazione in relazione alle fitopatie: esempio di parassiti fungini	55
2 Il sistema serra ed i principali parametri bioclimatici e fisici che controllano la crescita della biomassa in ambiente protetto	57
2.1 Il Sistema Serra	57
2.2 L’irraggiamento solare.....	59
2.2.1 Angoli di riferimento del pianeta Terra in relazione al Sole	61
2.2.2 Angoli solari derivati	62
2.2.3 Relazione tra ora solare e ora legale.....	63

2.2.4	Spettro solare e Costante Solare	65
2.2.5	Distribuzione della radiazione solare all'esterno dell'atmosfera	69
2.2.6	Unità di misura base in fotometria e radiometria	70
2.3	Il processo di fotosintesi.....	72
2.3.1	Fotosintesi clorofilliana (fase luminosa)	73
2.3.2	Ciclo di Calvin (fase oscura).....	76
2.3.3	Il ruolo del suolo e dell'acqua e la scoperta delle reazioni indipendenti dalla luce	80
2.3.4	Effetto della luce sul tasso di assimilazione netta	81
2.3.5	Effetto della temperatura sul tasso di assimilazione netta	86
2.4	Radiazione fotosinteticamente attiva (PAR)	87
2.5	Tipologie di serre	90
2.6	Materiali di copertura	96
2.7	Orientamento della serra	99
2.8	Principali parametri bioclimatici per il sistema serra.....	102
2.8.1	Intensità luminosa.....	103
2.8.2	Temperatura dell'aria	104
2.8.3	Temperatura del terreno (o substrato)	106
2.8.4	Concentrazione di CO ₂	106
2.8.5	Circolazione dell'aria interna	107
2.8.6	Trasporto dell'acqua (diffusione di materia)	108
2.9	Le esigenze colturali delle principali specie floricole e orticole.....	110
3	Controllo climatico ed energie rinnovabili per serre	114
3.1	Controllo climatico	114
3.1.1	Introduzione.....	114
3.1.2	Criteri base	115
3.1.3	Climatizzazione invernale	117
3.1.4	Climatizzazione estiva	119
3.2	Energie rinnovabili per serre	120
3.2.1	Introduzione.....	120
3.2.2	Serre fotovoltaiche.....	121
3.2.3	La biomassa.....	123

3.2.4	Geotermia e pompe di calore	126
4	Simulazione in ambiente EnergyPlus di un sistema serra-impianto di climatizzazione	141
4.1	La modellazione dinamica degli edifici.....	141
4.1.1	Costruzione di un file meteo in ingresso al codice EnergyPlus.....	143
4.2	Modello di una serra agricola in EnergyPlus e stima dei carichi termici orari.....	144
4.2.1	Involucro	145
4.2.2	Impianti e sistemi di regolazione e controllo.....	145
4.2.3	Evapotraspirazione.....	147
4.2.4	Risultati: carichi termici orari.....	149
4.3	Dimensionamento del campo sonde per l'installazione di una pompa di calore geotermica 153	
4.4	Misura ex post delle proprietà termofisiche del terreno nel sito Sam Lab (Thermal Response Test).....	156
4.4.1	Dati sperimentali e principali risultati delle misure.....	157
5	Monitoraggio, modellazione e controllo del sistema serra per l'efficienza energetica e la competitività	160
5.1	Microcontrollori e sensoristica low cost per serre.....	160
5.1.1	Introduzione.....	160
5.1.2	Obiettivo	162
5.1.3	Architettura Hardware	162
5.1.4	Microcontrollori: Differenza tra SoC e SoM.....	163
5.1.5	Controller Aria G25	164
5.1.6	Sensoristica	166
5.1.7	Architettura del sistema di monitoraggio in serra.....	170
5.1.8	Ambiente di visualizzazione dati e monitoraggio remoto del sistema di monitoraggio 172	
5.1.9	Centralina per controllo delle sportellature	174
5.2	Modello di simulazione e controllo del comfort termoigrometrico in ambienti lavorativi moderati.....	175
5.2.1	Introduzione.....	175
5.2.2	Modello applicati ad un sistema serra.....	176
5.2.3	Tipologie di modelli di controllo	177
5.2.4	Parametri di controllo per il caso applicativo	182

5.2.5	Descrizione del sistema serra caso applicativo.....	184
5.2.6	Modello termico.....	184
5.2.7	Modello del sistema di controllo	188
6	Progettazione e realizzazione prototipale di una serra ad alta efficienza.....	191
6.1	Criteri generali e progettazione	191
6.2	Descrizione del prototipo innovativo di serra.....	192
6.2.1	Struttura della serra	192
6.2.2	Quadro elettrico.....	193
6.2.3	Impianto geotermico	194
6.2.4	Pompa di calore	195
6.2.5	Unità di Trattamento Aria	195
6.2.6	Impianto fotovoltaico	196
6.2.7	Riscaldamento bancali	199
6.2.8	Impianto a LED	199
6.2.9	Sensoristica	201
6.3	Fasi realizzative.....	201
7	Conclusioni	213
	Bibliografia	215

Introduzione

Uno dei sistemi per far fronte alla recessione del mercato al consumo primario è quello di agire direttamente sui costi di produzione, ed in particolare su quelli legati al costo dell'energia impiegata nei processi produttivi.

Nel settore agroalimentare si avvertono da diverso tempo significativi sintomi di disagio, con riduzione delle produzioni agricole specializzate e prezzi di vendita dei prodotti agroalimentari sempre crescenti. L'incidenza sui costi di produzione dovuto all'utilizzo dell'energia primaria è tanto maggiore quando la coltura richiede uno stretto controllo termo-igrometrico dell'ambiente, come accade nelle colture protette in serra.

In questo ambito si deve tener conto inoltre degli aspetti economico-finanziari di breve e lungo periodo legati agli interventi di tipo strutturale (opere, impianti, involucri) e degli aspetti legati al ciclo di vita di tali strutture e degli impianti. Sotto questo aspetto assume particolare importanza la durata, la stabilità e l'affidabilità nel tempo delle soluzioni adottate, requisiti grazie ai quali è possibile pianificare ed ammortizzare i costi di realizzazione ex ante e di fine vita, con una più attenta ed ottimizzata gestione economico finanziaria della produttività.

Occorre però divulgare una cultura dell'efficientamento energetico tra gli operatori del settore primario, la cui perdonabile cautela rispetto ai limitati risultati talvolta raggiunti con interventi occasionali e disarmonici, portano alla rinuncia ad investimenti che, in prospettiva, determinerebbero significativi minori costi di produzione.

L'obiettivo fondamentale del progetto è stato quello di ricercare e sperimentare, su basi scientifiche, soluzioni innovative per garantire l'efficienza energetica e la sostenibilità economica dall'applicazione realizzata nel contesto delle colture protette. Tale soluzione è basata su nuove tecnologie nel campo dell'edilizia specialistica e delle fonti energetiche rinnovabili e rappresenta un sistema esemplificativo, visitabile, comprensibile e valutabile sia da operatori del settore che da soggetti che non hanno una competenza tecnica specifica.

La finalità del progetto è stata quella di collaborare in modo tangibile ed oggettivo alla diffusione di modelli di impostazione metodologica, strumenti di valutazione e di realizzazione che, applicati a livello dimostrativo su una combinazione di tecnologie innovative e di buona pratica realizzativa, siano ripetibili su vasta scala ed in contesti territoriali e tecnologici diversi.

Beneficiari dell'idea progettuale sono quindi, in primis, i produttori agricoli ed i trasformatori del settore agroalimentare, che potranno accingersi alla realizzazione e ristrutturazione di serre e laboratori di preparazione prodotti, secondo un modello di intervento e con "regole" di operative da conformare alle proprie esigenze.

Obiettivi del progetto

L'obiettivo generale del progetto è stato quello di migliorare le conoscenze delle piccole e medie imprese che operano in processi agro-manifatturieri nelle colture protette per quanto riguarda

metodologie e tecnologie innovative tali da permettere il miglioramento dell'efficienza energetica di tali processi. Un altro obiettivo specifico del progetto è stato quello di definire e realizzare un servizio per la sperimentazione e la dimostrazione di tecnologie per migliorare l'efficienza energetica per colture in serra. Inoltre si è cercato di definire e documentare, attraverso studi specifici orientati a una valutazione costi benefici e realizzati con opportuni modelli e simulazioni, i rendimenti e l'efficacia ottenuti dall'integrazione di diverse tecnologie (per es. materiali, energie da fonti rinnovabili, processi che prevedono scambi di calore quali ad esempio geotermia a bassa entalpia) per diversi tipi di coltura, per diversi climi europei e dei paesi del Mediterraneo, e per diversi semplici processi manifatturieri ad essi associati.

Risultati del progetto

Il risultato del progetto è riassumibile in due prodotti principali:

- Un libro “bianco”, cioè questo documento, all'interno del quale vengono illustrati i diversi temi tecnologici e metodologici presenti all'interno del progetto
- Un laboratorio per la sperimentazione di tecnologie innovative dedicate a migliorare l'efficienza dal punto di vista energetico dei processi di coltura in serra e di relativi semplici processi manifatturieri ad essi legati. Tale laboratorio ha sede presso il CeRSAA e permette di verificare direttamente nuove tecnologie di controllo, sensoristica e geotermia a bassa entalpia, in una serra, enfatizzando gli aspetti legati alle colture.

E' evidente come questi due risultati, pur rappresentando la tappa conclusiva del progetto, devono essere considerati come strumenti in continuo divenire, da aggiornare periodicamente, attraverso specifiche nuove azioni destinate all'innovazione in un settore fondamentale per la Regione Liguria.

Ringraziamenti

Il progetto è stato reso possibile grazie a un finanziamento inserito all'interno del “Polo Energia Sostenibile” in Savona, PAR FAS 2007 – 2013, Progetto 4 “Programma triennale per la ricerca e l'innovazione: progetti integrati ad alta tecnologia”. Si ringrazia Regione Liguria, Dipartimento Sviluppo Economico - Settore Ricerca, Innovazione ed Energia, e Finanziaria Ligure per lo Sviluppo Economico - FI.L.S.E. S.p.A, per il supporto economico e gestionale che ha permesso di arrivare a risultati concretamente visionabili dalle piccole medio imprese del settore.

1 La coltura protetta nel Mondo, nel Mediterraneo ed in Liguria: numeri e specificità

Il comparto dell'agricoltura protetta (serre in vetro, serre in plastica, tunnel e tinnellini) si trova oggi a operare in un mercato internazionale caratterizzato da una costante evoluzione rispetto sia alla richiesta dei consumatori per le garanzie di "food safety" e sia alla necessità di ridurre i costi energetici per la climatizzazione delle serre. Pertanto, l'impiego da parte delle aziende agricole di modelli produttivi caratterizzati da un lato dalla più ampia diversificazione di prodotti vegetali e da un altro lato da una maggiore efficienza energetica insieme all'applicazione di tecnologie di climatizzazione che utilizzano energie rinnovabili risultano ormai fondamentali per rispondere efficacemente alla competizione globale. Le conseguenze di questa situazione si manifestano a diversi livelli della filiera agro-alimentare, con prospettive e obiettivi molteplici, tra i quali i principali sono: la valorizzazione di processi produttivi eco-compatibili, la scelta della sostenibilità energetica ed ambientale come elemento chiave di competitività, la coerenza con le *policy* europee inerenti l'energia, efficienza energetica, l'ambiente e lo sviluppo economico sostenibile.

1.1 Stime della produzione agricola in ambiente protetto a livello mondiale ed europeo

L'agricoltura protetta nel mondo interessa una superficie di non meno 900.000 ettari (serre in vetro, serre in plastica, tunnel e tinnellini), con circa il 70% degli apprestamenti protetti che utilizzano film plastici flessibili, di cui i Paesi asiatici, con in primo luogo il Giappone, la Cina (si stimano circa 400.000 ha di serre) e la Corea, che contribuiscono con oltre 500.000 ettari di superficie coperta. Secondo stime del 2010, la diffusione dell'agricoltura protetta nel bacino mediterraneo raggiunge i 400.000 ha (se consideriamo anche i piccoli tunnel), ed è concentrata soprattutto in Spagna, Italia, Egitto, Francia, Grecia e Turchia (Capiotti *et al.* 2009a; Waaijenberg, 2006). Rispetto ai materiali di copertura, la quantità di film plastici utilizzati per l'agricoltura protetta in Europa è stimata in circa 450.000 tonnellate, di cui il polietilene a bassa densità (LDPE) costituisce il principale polimero commercializzato, mentre il copolimero EVA (Etilvinilacetato) e il PVC (Cloruro di polivinile) hanno una diffusione ancora limitata.

Secondo uno studio dell'AIEL, che ha elaborato dati ISTAT 2005-2011, nel bacino del mediterraneo l'agricoltura in ambiente protetto si estende per circa 400.000 ettari concentrandosi prevalentemente in Spagna, Italia, Egitto, Francia, Grecia e Turchia. Nell'Europa a 27 le serre permanenti raggiungono una superficie di 140.000 ettari.

Il florovivaismo nel mondo

Ragionare sui numeri è utile non solo per fotografare l'esistente ma anche per provare a immaginare gli scenari futuri; in Italia purtroppo ciò è spesso sottovalutato a differenza di quanto accade in altri Paesi (VGB, 2010) e dovrebbe essere tenuto maggiormente in considerazione

soprattutto in questo periodo di grande crisi economica. I dati disponibili, oltre a fornire una descrizione della situazione attuale, permettono di cogliere le tendenze in atto. Il mercato florovivaistico oggi si può definire globale soprattutto per quanto riguarda il fiore reciso, leggero e ad alto valore aggiunto tanto che anche dalla Nuova Zelanda, che è il Paese più distante dall'Europa, si importano fiori freschi che possono arrivare entro 72 ore dall'ordine. Questa, dunque, è una possibilità reale e non solo teorica. Oggi, in un bouquet acquistato a meno di 10 euro in un centro commerciale o in un chiosco in strada si trova materiale che proviene da tre o quattro continenti. Questo processo di globalizzazione ha origini antiche, essendo iniziato oltre 150 anni fa con la diffusione della floricoltura moderna in Costa Azzurra e nella Riviera dei Fiori grazie al clima e alla relativa vicinanza con l'Europa continentale. Si ricorda per tutti il nome di Alphonse Karr, esule per motivi politici da Parigi a Nizza allora italiana, che tradizionalmente viene considerato il primo esportatore di fiori sfruttando le potenzialità date dalla ferrovia appena costruita (Filippi, 1998; Puccini, 1971). Già nei primi anni del XX secolo con l'incremento dei servizi ferroviari, anche con vagoni refrigerati, i fiori da Sanremo arrivavano in Gran Bretagna, in Norvegia e perfino in Russia, in Finlandia e in Turchia e questa situazione, di quasi monopolio, è durata praticamente sino alla fine degli anni sessanta. In quegli anni in tutta la provincia di Imperia si coltivano più garofani di quanti oggi nel mondo intero. Comincia da allora una delocalizzazione prima a livello nazionale favorita dall'esistenza di aree pianeggianti in altre zone, dal miglioramento delle tecniche di coltivazione e dei trasporti nonché dall'aumento dei consumi a livello nazionale e internazionale. Oggi la delocalizzazione, soprattutto per il fiore reciso, è attuata verso i Paesi all'altezza dell'equatore dell'Africa, dell'Asia e delle Americhe caratterizzati da estese aree in quota e da costo del lavoro bassissimo (Borsotto P. et al., 2008; Gimelli, 2012). A partire dagli inizi degli anni novanta il mercato mondiale ha registrato la comparsa di alcuni Paesi in Via di Sviluppo (PVS), come Kenya, Zambia e Uganda, che esportano sui mercati dei Paesi industrializzati. Anche Israele è tra i Paesi maggiormente esportatori oltre a Ecuador, Colombia e India, ma è in difficoltà a causa soprattutto dell'aumento dei costi di produzione.

I dati statistici sul florovivaismo a livello mondiale sono scarsi e non omogenei. Secondo un'elaborazione di dati da parte della Coldiretti (2006), in linea di massima, nel 1995 la PLV (Produzione Lorda Vendibile) era 25 miliardi di dollari, gli ettari investiti 650.000, gli addetti 2 milioni. I principali Paesi produttori nel mondo sono: nell'area asiatica Cina (86.000 ha), India (34.000 ha), Giappone (8.000 ha), Thailandia (7.000 ha) e Corea (5.300 ha); nell'area mediorientale Israele (2.063 ha) e Turchia (670 ha); nell'area nordamericana Stati Uniti (10-15.000 ha) e Messico (5.000 ha); nell'area centro-sudamericana Colombia (4.200 ha), Costa Rica (3.600 ha) e Ecuador (2084 ha); nell'area africana Kenya (1.280 ha), Zimbabwe (940 ha), Costa d'Avorio (690 ha) e Marocco (450 ha); nell'area europea occidentale Olanda, (35.900 ha), Italia (36.300 ha) e Germania (35.900 ha), orientale Ungheria (1.120 ha), Slovenia, Croazia, Bulgaria.

- Nell'area asiatica spicca la Cina, con una produzione di fiori di circa 2 milioni di steli e 1 miliardo di piante in vaso fiorite. L'export '97 di piante ornamentali superava i 130 milioni di dollari. Il settore, che impiega 1,3 milioni di lavoratori, anche se solo 6.000 sono le imprese strutturate con

più di 3 ha, può avere un forte sviluppo grazie alle sue grandi potenzialità (vaste aree a clima tropicale, subtropicale e temperato) e alle sue notevoli risorse genetiche (ad es. qui sono localizzate ben 600 delle circa 800 varietà di azalee esistenti in tutto il mondo).

- Nell'area mediorientale il Paese più vivace è Israele, sia per produzioni molto diversificate ed avanzate di fiori recisi, sia per le esportazioni che sono aumentate del 48% in quantità e 52% in valore negli ultimi 4 anni, ponendolo al 1° posto tra i fornitori extraeuropei di fiori dell'UE.

- Nell'area nordamericana gli Stati Uniti si presentano con una floricoltura evoluta, sebbene siano anche forti importatori (2° posto dopo l'UE). La superficie, secondo i dati USDA '98, è di 9.941 ha, di cui il 61% in serra, (ma l'AIPH riporta 15.500 ha). La PLV, riferita a vendite superiori ai 10.000 \$ (18 milioni di lire), ammonta a circa 3,93 miliardi \$ (7.100 miliardi di lire), e per il 51% si concentra in cinque Stati: California e Florida (36%), Michigan, Texas e Ohio (15%). I coltivatori sono 14.308 (+12,5% sul '97), di cui il 48% ha un fatturato fino a 50.000 \$, il 19% da 50.000 a 100.000 \$, il 25% da 100.000 a 500.000 \$ e l'11% oltre 500.000 \$.

- Nell'area sud-americana emerge la Colombia, il Paese che ha registrato il maggiore sviluppo, grazie alle favorevoli condizioni climatiche, al forte orientamento all'export e ad una organizzazione commerciale sul modello olandese. E' il 2° esportatore mondiale di fiori recisi, dopo l'Olanda (80% verso l'USA, e 14% verso l'UE, di cui è il 3° fornitore). Le 430 compagnie locali impiegano 140.000 unità, di cui 70.000 nelle aziende floricole (da notare che più del 60% sono donne, di cui la metà sotto i 25 anni). Le produzioni più importanti sono garofani (46%) e rose (27%), il principale mercato di sbocco sono USA (77%) e UE (14%).

- Nell'area africana il Paese con il tasso di crescita più elevata è il Kenya, il maggior produttore di fiori recisi (specie garofani e rose), che esporta principalmente nell'UE (è al 2° posto, dopo Israele, come fornitore extracomunitario).

Secondo dati aggiornati INEA (2014), sempre per quanto riguarda il florovivaismo, nel mondo l'estensione delle superfici è stimata in quasi 1 milione di ettari: per la precisione 986.567 ettari di cui circa due terzi tra fiore reciso e piante in vaso e il resto piante da vivaio (oltre il 50% in Asia, il 20% in Europa e il 18% in America) (Hübner, 2014). Un'area di sicuro interesse oggi è certamente la Cina che è stimata avere circa i tre quarti della superficie totale con una elevata estensione nel vivaismo ornamentale (circa 62,9% della superficie mondiale) e più contenuta per il fiore reciso e per le piante in vaso (24,4% della superficie mondiale). Naturalmente se si considerano i dati in valore la percentuale scende ad un comunque significativo 12,3%; la produzione, ad oggi, è utilizzata ancora in gran parte per il mercato interno. La Produzione Lorda Vendibile mondiale è stimata in circa 50 miliardi di euro comprendendo anche i prodotti vivaistici. Se si considerano i soli fiori recisi e le piante in vaso il valore della produzione è valutato in 28 miliardi di euro e quello di mercato in più del doppio (58,68 miliardi di euro). Sono cifre elevate, il cui valore assoluto, sebbene non sia certo, testimonia comunque l'enorme diffusione di produzioni che oggi risultano presenti in oltre 80 Paesi (Hübner, 2014). Questo rende assolutamente pregnanti questioni come organizzazione di filiera, logistica, mercato globale, sfide tecnologiche, ecc. Schematizzando si può dire che ci si trova di fronte a un'offerta sempre più delocalizzata, situata per buona parte in PVS

che garantiscono condizioni climatiche e territoriali vantaggiose, con costo del lavoro irrisorio. L'offerta è in grado di muoversi velocemente, in modo coordinato e in gran parte è veicolata dal sistema delle aste olandesi. Nei mercati maturi del Nord Europa i tassi d'incremento dei consumi negli ultimi anni sono stati ridotti

con l'eccezione del Regno Unito, caratterizzato da un forte incremento del consumo d'impulso veicolato attraverso la Grande Distribuzione Organizzata (GDO).

In Europa i Paesi che hanno tassi elevati di importazione sono Polonia e Russia, pur partendo da livelli assoluti molto bassi. È interessante notare quanto il consumo di fiori sia correlato strettamente al Prodotto Interno Lordo pro-capite. Gli scostamenti in positivo (Svizzera, Giappone e Regno Unito) e in negativo (Stati Uniti) sono legati a fattori culturali che condizionano le abitudini dei consumatori. Questo significa che le possibilità d'incremento del mercato dei prodotti florovivaistici sono legate all'aumento del PIL pro-capite e, nei paesi con abitudini consolidate, all'incremento del mercato di impulso.

Paese	Fiore reciso	Piante	Totale
Austria	39	57	96
Belgio	35	38	73
Repubblica Ceca (2008)	14	12	26
Danimarca	n.d.	n.d.	130
Finlandia (2008)	37	39	76
Francia	13	36	49
Germania	37	69	106
Grecia (2008)	21	9	30
Ungheria (2008)	14	11	25
Irlanda (2008)	40	16	56
Italia	27	19	46
Olanda	56	34	90
Norvegia	n.d.	n.d.	156
Polonia (2008)	10	4	14
Portogallo (2008)	15	10	25
Romania (2008)	6	2	8
Russia (2008)	5	2	7
Repubblica Slovacca (2008)	10	6	16
Slovenia (2008)	21	25	46
Spagna	n.d.	n.d.	17
Svezia (2008)	38	47	85
Svizzera (2008)	77	43	120
Ucraina (2008)	4	3	7
Regno Unito	4	13	64
Giappone	n.d.	n.d.	66
USA	n.d.	n.d.	85

Fonte: Hübner S., 2014

Tabella 1-1: Consumo pro-capite (euro 2012, s.d.i.)

È realistico pensare che globalmente il mercato si espanderà in parallelo al miglioramento delle condizioni di vita e che molti Paesi, oltre a essere produttori, cominceranno a diventare consumatori. La domanda che in Italia ci si deve porre è se si riesca a intercettare una parte di questi consumi crescenti e se ci si stia attrezzando a farlo, tenendo conto che gli altri Paesi sono in continuo movimento. L'area di consumo più vasta al mondo è localizzata negli USA, anche se il consumo pro-capite non è particolarmente elevato (Tabella 1-1). La produzione di fiori e piante copre una superficie di oltre 15.000 ettari con una media aziendale di 2,3 ettari di cui un terzo protetti; per quanto riguarda il fiore reciso gli USA sono assolutamente tributari dal Sud America, in particolare dalla Colombia, seguita da Ecuador e Brasile. Il Giappone è un'altra area di grandi consumi, tuttavia risulta molto distante per le capacità di export italiane. La produzione interna è consistente anche se assolutamente assistita e, in generale, le aziende usufruiscono di un sostegno rilevante da parte dello Stato.

Tendenze del mercato mondiale

L'aumento della produzione in aree a basso consumo locale di fiori ha modificato la struttura produttiva e distributiva: mentre in Europa e Giappone le aziende tradizionali sono medio-piccole (famiglie coltivatrici), nei Paesi emergenti (specie africani e sudamericani), lontani dai centri di commercializzazione e di consumo, prevalgono grandi aziende in mano a società straniere. Il commercio internazionale tenderà presumibilmente all'affermazione di tre grandi aree di produzione, da dove si intensificherà l'export floricolo verso i principali mercati di consumo: da Olanda e Africa verso l'Europa, dal Sud America verso gli Stati Uniti e dalla Cina verso le altre nazioni asiatiche.

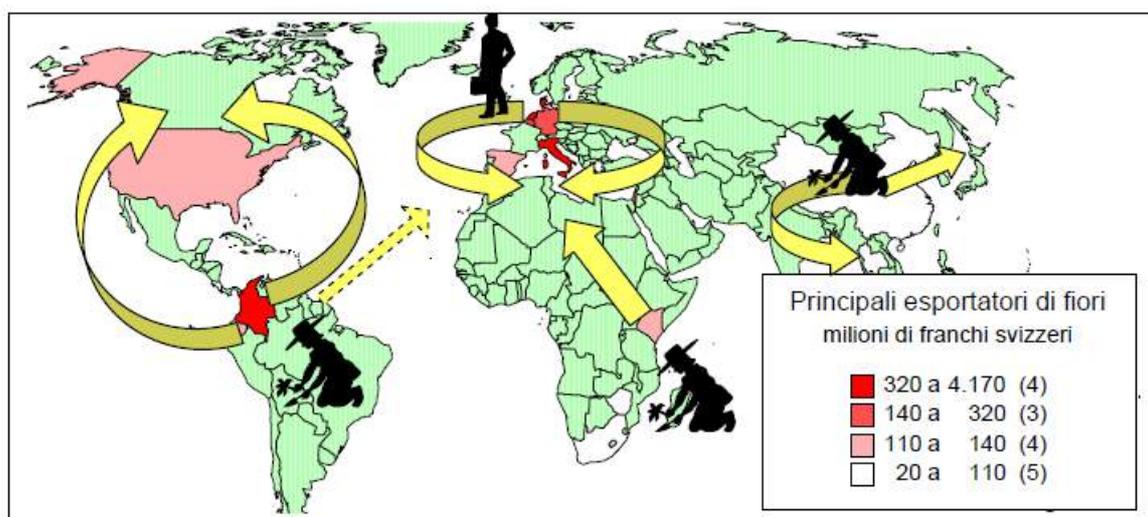


Figura 1-1: Tendenze del commercio floricolo dalle principali aree di produzione

I florovivaismo nell'unione europea

Secondo i dati Istat, nel 1998 la PLV del florovivaismo nell'UE è stata di 13.411 Mecu (circa 13 miliardi di euro, il 6,4% della PLV agricola comunitaria), di cui 8.563 Mecu nel floricoltura e 4.848 Mecu nel vivaismo. Paesi leader sono l'Olanda, la Germania e l'Italia (Tabella 1-2).

dati in MECU – elaborazione Coldiretti su dati ISTAT

	FIORI	PIANTE	TOTALE	%
Olanda	1.878	1.888	3.766	28%
Germania	1.701	1.117	2.818	21%
Italia	1.903	557	2.460	18%
Francia	951	396	1.347	10%
Regno U.	479	487	966	7%
Spagna	554	39	593	4%
Danimarca	394	72	466	3%
Belgio	234	173	407	3%
Austria	112	76	188	1%
Svezia	152	23	175	1%
Grecia	115	3	118	1%
Finlandia	90	17	107	1%
UE	8.563	4.848	13.411	100%

Tabella 1-2: PLV fiori e piante UE, 1998

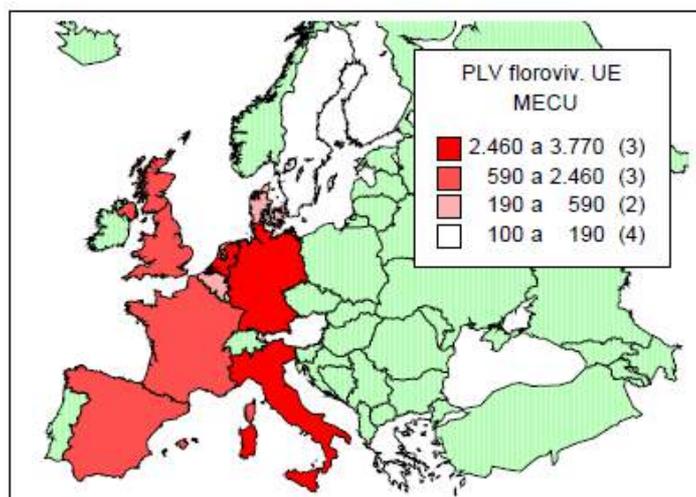


Figura 1-2: PLV florovivaistica nell' UE – elaborazione Coldiretti

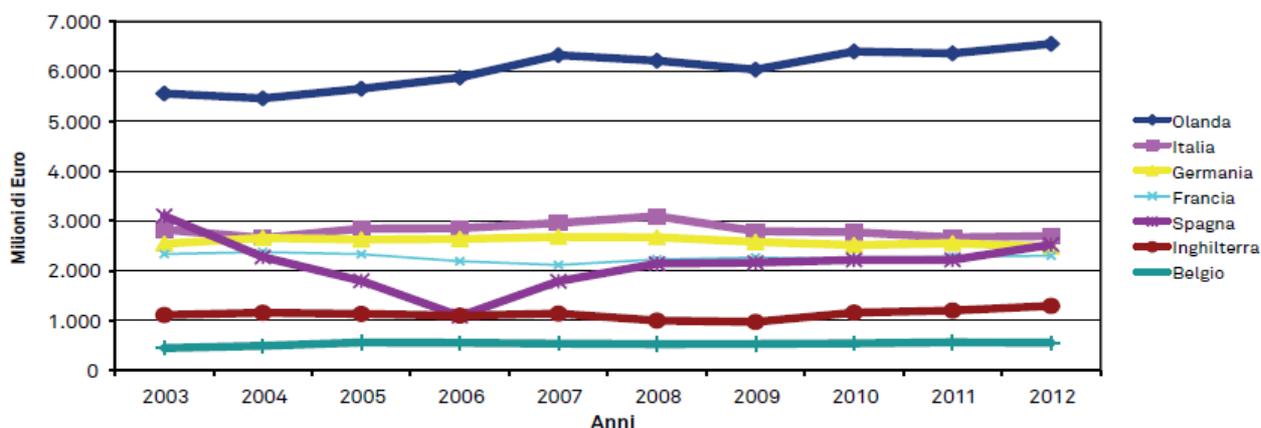
Nel 1998, il valore del consumo era stimato in 35 miliardi di Mecu; è un settore che crea molta occupazione, con 510.000 posti di lavoro diretti e 500.000 indiretti, con elevata professionalità.

Nel 1995 per la floricoltura il numero di aziende era 46.430 in piena aria 58.710 in serra (non cumulabili, poiché le aziende possono essere impegnate in entrambe le attività), su una superficie totale di 79.710 ha (+10,8% rispetto al 1993); nel vivaismo le imprese erano 33.500 su un'area di 95.900 ha. (+7,6% rispetto al 1993). La più grande area di produzione europea è l'Italia (Tabella 1-3), ma è un dato relativo: infatti, la resa per ettaro in Olanda è superiore del 70% a quella italiana, grazie alle tecniche e alle produzioni in serra.

	FLORICOLTURA					VIVAISMO		TOTALE
	numero aziende		superficie (ha)			numero aziende	superficie (ha)	superf. (ha)
	aria	serra	aria	serra	totale			
Italia	17.300	14.900	11.000	5.600	16.600	11.500	19.700	36.300
Germania	7.900	8.100	6.200	2.400	8.600	4.700	27.300	35.900
Olanda	6.300	7.400	21.300	5.500	26.800	4.100	9.100	35.900
Francia	6.000	6.700	5.800	2.300	8.100	4.900	19.400	27.500
Regno Unito	2.300	4.400	7.100	900	8.000	2.800	6.900	14.900
Spagna	2.200	3.300	4.000	2.300	6.300	1.500	4.600	10.900
Belgio	1.600	1.900	1.100	700	1.800	1.000	3.900	5.700
Danimarca	200	900	300	400	700	500	3.400	4.100
Portogallo	1.100	1100	300	500	800	1.000	1.100	1.900
Irlanda	800	0	1400	0	1.400	-	-	1.400
Grecia	700	1.100	200	400	600	1.500	500	1.100
Lussemburgo	30	40	10	0	10	-	-	10
E.U.R. 12	46.430	49.840	58.710	21.000	79.710	33.500	95.900	175.610

Tabella 1-3: Aziende e superficie impiegata nell'UE 1995 - elaborazioni Coldiretti su dati Eurostat

Numeri più aggiornati rispetto al florovivaismo europeo (INEA, 2014) rivelano che Tra i Paesi produttori l'Italia con 12.700 ettari è al primo posto seguita da Olanda, Regno Unito, Germania, Spagna e Francia. Le superfici protette raggiungono il 70% in Olanda, il 60% in Spagna, il 50% in Italia, il 46% in Francia e il 15% in Gran Bretagna (Hübner, 2014). Se si considerano i dati in valore, vista la maggior estensività, l'Italia è il secondo produttore subito dopo l'Olanda con un andamento che nel lungo periodo mostra una tendenza alla flessione (Figura 1-3).

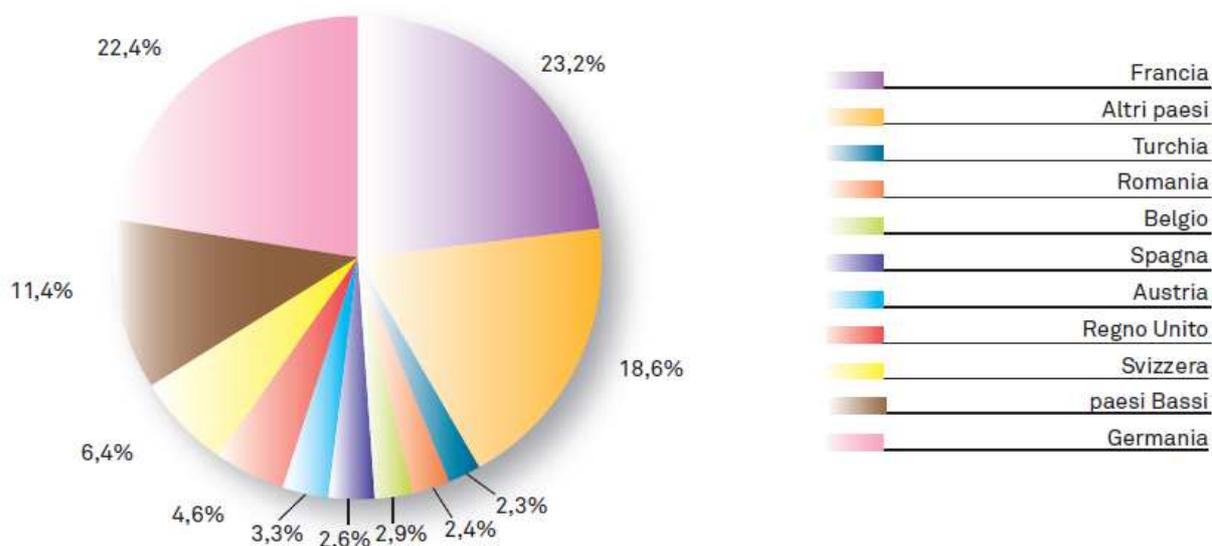


Fonte: European Commission DG Agriculture and Rural Development – Unit C.2 (2013)

Figura 1-3: Produzione di fiori e piante nell'UE (valori in euro, prezzi costanti alla produzione)

In Europa i flussi maggiori di importazioni giungono in Olanda che funge da cerniera negli scambi. Il 72% della produzione di fiori recisi proviene da soli quattro Paesi: Kenya, Colombia, Israele ed Ecuador. Anche per l'Italia, naturalmente, il mercato di maggior interesse è l'Europa, in particolare quello del Nord che storicamente è la principale destinazione dei prodotti italiani. Come si può vedere dalla figura 1.4 i principali partner commerciali dell'Italia sono Francia, Germania, Paesi Bassi, Svizzera e Regno Unito. Questi ultimi in totale assorbono oltre i due terzi dell'export italiano.

In generale la bilancia commerciale è positiva soprattutto nei comparti che riguardano foglie e fronde da reciso nonché piante da vivaio, mentre l'Italia è deficitaria sia nei fiori recisi che nel materiale di propagazione.



Fonte: ITA/ICE, 2014

Figura 1-4: Esportazioni italiane nel settore florovivaistico nel 2012: quota dei principali acquirenti in valore

1.2 I numeri della produzione agricola in ambiente protetto in Italia

Per quanto riguarda l'Italia, secondo dati 2010, dove sono stati censiti oltre 30.000 ha di serre (serre in vetro e plastica, tunnel e tunicellini), si stima un consumo di materiali plastici di oltre 85.000 tonnellate. I materiali rigidi, soprattutto PMMA (Polimetilmetacrilato), lastre di PVC bi orientato, policarbonato e materiali in fibra di vetro con poliestere sono usati soprattutto in Italia (2.000 ha), mentre il vetro è molto usato nel Nord Europa (non meno di 11.000 ha in Olanda) e scarsamente nelle regioni mediterranee (circa 8.000 ha). Per i volumi economici, l'agricoltura protetta in Italia fattura oltre 3 miliardi di Euro in termini di produzione lorda vendibile, mentre, a livello europeo, l'industria delle serre fattura non meno di 2 miliardi di Euro in termini di strutture, impianti, componentistica (Scarascia M., 2003).

La Tabella 1-4 riporta un quadro generale dei dati inerenti le dimensioni e l'incidenza delle coltivazioni in serra nei confronti dell'agricoltura in pieno campo (studio del 2010).

Coltivazioni	A. Superficie coltivata in serra (ha)	B. Superficie coltivata in pieno campo (ha)	C. Superficie Agricola Utilizzata (ha)	D. Produzioni in serra: - quintali per orticoltura - migliaia di pezzi per floricoltura	E. Produzioni in pieno campo: - quintali per orticoltura; - migliaia di pezzi per floricoltura	F. Produzioni totali: - quintali per orticoltura; - migliaia di pezzi per floricoltura	A/C Superfici in serra	B/C Superfici pieno campo	D/F Produzioni in serra	E/F Produzioni in pieno campo
Floricoltura (a)	4.964	4.645	9.609	3.400.011	2.695.267	6.095.278	52%	48%	56%	44%
Orticoltura (b)	34.888	421.256	456.144	18.986.983	116.522.707	135.509.690	8%	92%	14%	86%

Fonte: elaborazioni degli autori su dati ISTAT 2005 per la floricoltura, 2008 per l'orticoltura

Aziende che producono in serra e in pieno campo in Italia				
Coltivazioni	Numero di aziende che producono in serra (anno 2005)	Numero di aziende che producono in pieno campo (anno 2005)	Numero di aziende che producono in serra (anno 2007)	Numero di aziende che producono in pieno campo (anno 2007)
Floricoltura	9.238	7.123	8.985	8.759
Orticoltura	21.203	127.878	17.618	132.304

Fonte: elaborazioni degli autori su dati ISTAT

Legenda:

(a) produzione di fiori, foglie e fronde

(b) le produzioni orticole includono: ortaggi, pomodoro, lattuga, valeriana, frutta (cocomero, melone, fragola)

Nota 1: la produzione in quintali è quella totale e non quella raccolta.

Nota 2: le superfici delle produzioni di uva in serra non sono considerate.

Tabella 1-4: I sistemi serra e l'agricoltura italiana

Secondo fonte AIEL 2012, in Italia le coltivazioni protette coprono circa 35.000 ettari, 30.000 sono dedicati alla coltivazione degli ortaggi e circa 5.000 rappresentano le serre floro-vivaistiche. Le serre permanenti si estendono per circa 6.000 ettari (Fonte ENEA). Oltre il 50% della produzione floricola e circa il 15% di quella orticola si coltiva in ambienti protetti con un coinvolgimento di circa 30.000 aziende agricole. Campania e Lazio sono le due regioni *leader* e rappresentano insieme oltre la metà (54%) del comparto dell'agricoltura protetta nazionale. Al nord le serre si concentrano nel bacino padano, in particolare in Veneto, Lombardia, Emilia Romagna e Piemonte (24%). Il terzo distretto per ordine di importanza è al sud dove Sicilia, Puglia, Calabria e Basilicata rappresentano insieme il 15% del comparto. I materiali di copertura più impiegati sono quelli plastici (85.000 t) e le coperture rigide costituite da PMMA (Polimetilmetacrilato), lastre in PVC e materiali in fi bra di vetro (ca. 2.000 ha). Il fatturato annuo di questo comparto supera i 3 miliardi di Euro (PLV) e, su scala europea, l'industria costruttiva (strutture, impianti e componentistica) fattura circa 2 miliardi di Euro (Fonte ENEA).

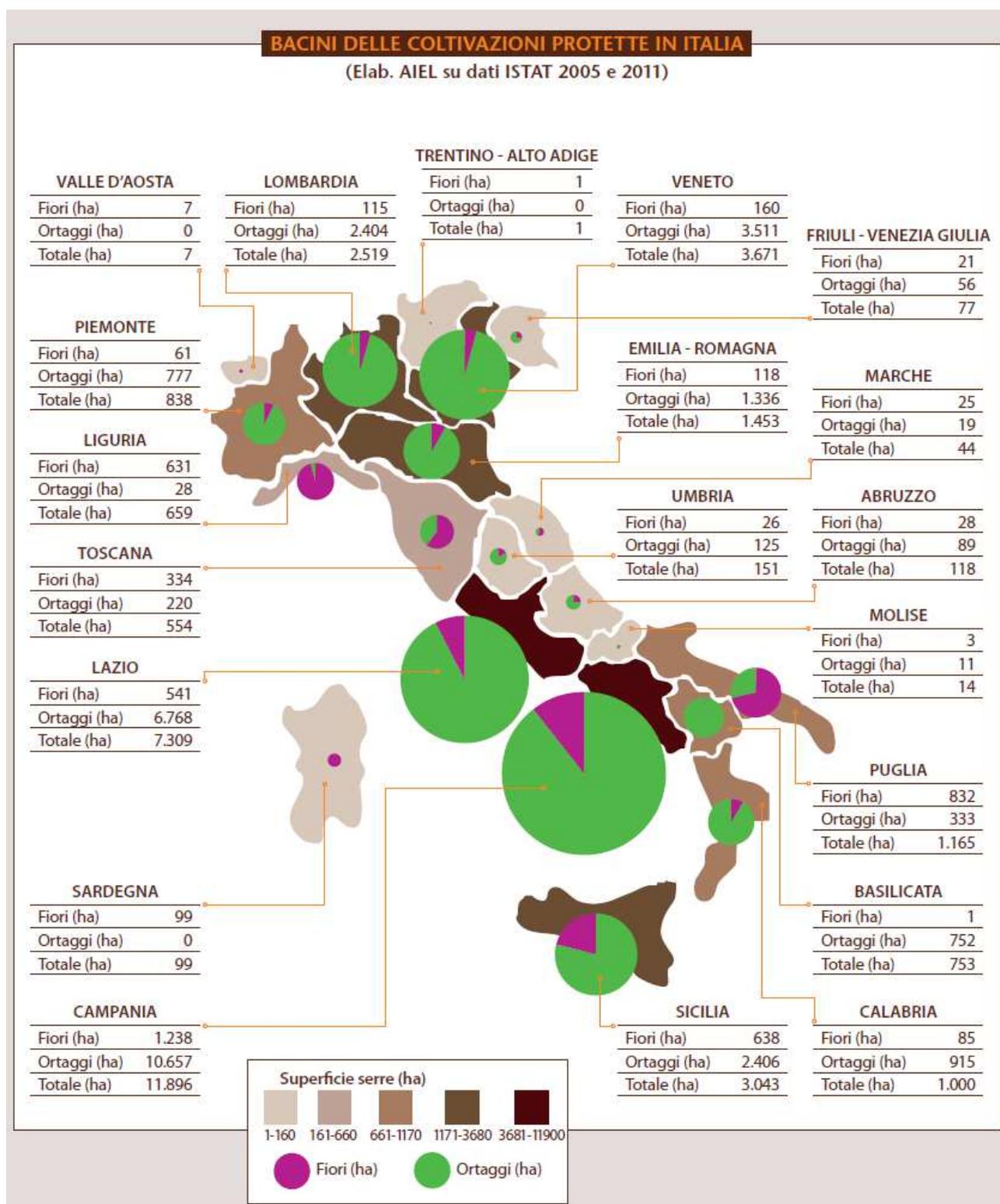


Figura 1-5: Bacini delle coltivazioni protette in Italia

Di seguito, in Tabella 1-5, Tabella 1-6 e Tabella 1-7 vengono riportate le risultanze di una recente (2014) raccolta dati effettuata dal CeRSAA per quanto riguarda l'orticoltura e floricoltura in pieno campo e protetta.

		TOTALE (ha)
ortive in piena aria	pomodoro da mensa in pieno campo	7.233
	pomodoro da industria in pieno campo	76.836
	altre ortive in pieno campo	153.951
	pomodoro da mensa in orti stabili ed industriali	932
	altre ortive in orti stabili ed industriali	27.786
	TOTALE	266.737
ortive protette	pomodoro da mensa in serra	6.732
	altre ortive in serra	17.162
	ortive protette in tunnel, campane, ecc.	9.050
	TOTALE	32.944
fiori e piante ornamentali in piena aria		7.282
fiori e piante ornamentali protetti in serra		4.420
fiori e piante ornamentali protetti in tunnel, campane, ecc		1.023
piantine orticole		3.050
piantine floricole ed ornamentali		1.597

Tabella 1-5: Ortocoltura e floricoltura in Italia – Superfici impegnate

	TOTALE AZIENDE
Aziende specializzate in ortofloricoltura di serra	18.162
aziende specializzate in orticoltura di serra	11.305
aziende specializzate in floricoltura e piante ornamentali	6.684
aziende specializzate in ortofloricoltura mista di serra	173
Aziende specializzate in ortofloricoltura all'aperto	9.407
aziende specializzate in orticoltura all'aperto	5.636
aziende specializzate in fiori e piante ornamentali	3.743
aziende specializzate in ortofloricoltura mista all'aperto	28
Aziende specializzate in altri tipi di ortofloricoltura	10.229
aziende specializzate nella coltura di funghi	823
aziende specializzate in vivai	6.943
aziende specializzate in diverse colture ortofloricole	2.463

Tabella 1-6: Aziende specializzate in ortofloricoltura in Italia

Tipo coltivazione	superficie totale - ettari	superficie in produzione - ettari	produzione totale - quintali	produzione raccolta*
cereali	3.192.857	3.192.857	181.610.791	180.267.202
legumi secchi	68.468	68.468	1.343.165	1.319.913
piante da tubero	62.394	62.394	16.045.773	15.676.844
ortaggi in piena aria	418.852	417.008	122.379.688	118.553.251
coltivazioni industriali	303.085	303.085	8.969.300	8.841.131
frutta fresca	434.356	410.257	62.289.120	60.954.062
agrumi	168.266	161.616	39.145.800	38.360.665
vite	762.072	725.267	74.868.128	73.828.700
vino	42.184.695	..
olivo	1.188.068	1.156.118	34.511.096	31.543.432
erbai	963.871	959.568	254.992	5.305.796
prati avvicendati	1.014.531	1.005.579	254.321	3.509.698
prati	877.752	857.924	138.623	1.996.173
pascoli	3.513.519	3.379.896	80.634	1.112.933
ortaggi in serra	37.104	37.104	16.394.047	15.807.919

*quintali (migliaia di unità foraggiere per i gruppi erbai, prati e pascoli)

Il CeRSAA ha inoltre effettuato un'indagine datata Giugno 2012, basata sulla consultazione di lavori scientifici apparsi su riviste nazionali che si occupano di florovivaismo e di fonti di energia utilizzate nel comparto agricolo, dati regionali ufficiali (Ispettorati agrari), dati EFSA, campionamenti effettuati da CeRSAA e comunicazioni personali di tecnici operanti nelle principali aree floricole italiane. Tale indagine è stata mirata a definire il numero e la superficie in serra effettivamente riscaldata alla data dell'indagine in Italia, suddividendo per area geografica Nord, Centro e Sud.

Lo studio è stato influenzato dalle seguenti variabili:

- non tutte le serre definite come "riscaldate", cioè dotate di impianti di riscaldamento, sono effettivamente tenute calde nel periodo invernale critico, a causa dell'aumento dei costi dell'energia;
- le imprese agricole stanno progressivamente cambiando indirizzo produttivo spostando la produzione verso colture meno energivore, ma non per questo ugualmente o più redditizie rispetto a quelle precedentemente allevate;
- dai contatti con tecnici e imprenditori, emerge con chiarezza che, se il livello di costo dell'energia rimarrà quello attuale, nel corso dei prossimi due o tre anni le serre effettivamente riscaldate nel nord e nel centro Italia si ridurranno, divenendo "serre fredde", se non incolte.
- Da indicazioni verbali raccolte da tecnici e imprenditori delle aree del centro-nord Italia, un costo accettabile dell'energia per il riscaldamento delle serre potrebbe posizionarsi nell'intorno
- i dati sono stati elaborati per area geografica, in quanto quelli suddivisi per Regione non appaiono sufficientemente attendibili per una analisi dettagliata;
- nelle Regioni ove la superficie floricola è molto bassa (Umbria, Basilicata, Molise), a fronte di alcune aziende molto grandi di cui è semplice individuare superfici e conseguenti consumi energetici, le aziende più piccole sfuggono ad una verifica, quale quella effettuata;
- il dato relativo all'Italia sud appare sottostimato, ma non abbiamo elementi sufficienti per adottare altri valori;
- le Regioni sono state accorpate per area geografica tenendo anche conto delle effettive condizioni climatiche, che condizionano i consumi:
 - o Italia nord: Liguria, Lombardia, Veneto, Piemonte, Emilia-Romagna, Friuli V.G., Trentino A.A.;
 - o Italia centro: Toscana, Lazio, Sardegna, Marche, Abruzzi, Umbria, Basilicata, Molise;
 - o Italia sud: Campania, Sicilia, Puglia, Calabria.

Dato	Quantità	Unità di misura
Numero serre floricoltura	7.760	numero
Superficie serre floricoltura	4.170	ha
Superficie media serre ad alta tecnologia riscaldate	0,54	ha/serra

Tabella 1-8: Numero e superficie di serre in Italia dedicate alla floricoltura

	superficie (ha) serre dedicate alla floricoltura per area geografica	percentuale serre riscaldate per area geografica
Italia Nord	1.966,82	80,37
Italia Centro	795,18	66,38
Italia Sud	1.407,76	19,23
Totale	4.169,76	-

Tabella 1-9: Superficie serre dedicate alla floricoltura suddivise per area geografica

	KW/m2 min	KW/m2 max
Italia Nord	0,15	0,2
Italia Centro	0,1	0,15
Italia Sud	0,03	0,05

Tabella 1-10: Energia necessaria per riscaldare 1 m2 di serra

	Ettari di serre riscaldate per area geografica	media mesi/anno di riscaldamento	Consumo medio di energia (KW/m2/anno)	KW/periodo effettivo di riscaldamento
Italia Nord	1580,77	6,14	0,175	1.381.045,60
Italia Centro	520,84	4,25	0,125	280.263,55
Italia Sud	277,80	1,75	0,04	26.111,73
Totale	2.379,40	-	-	1.687.420,87

Tabella 1-11: Superficie serre riscaldate dedicate alla floricoltura, durata massima del periodo di riscaldamento e energia consumata

	KW/m2 min	KW/m2 max	Sup riscaldata min	Sup riscaldata max
Italia Nord	0,15	0,2	2.500,00	3.333,33
Italia Centro	0,1	0,15	3.333,33	5.000,00
Italia Sud	0,03	0,05	10.000,00	16.666,67

Tabella 1-12: Superficie riscaldabile con 500 kW termici

Per quanto riguarda la floricoltura nello specifico, dati storici rivelano che l'importanza del settore in Italia è testimoniata da una PLV che nel 1998 è stimata dall'Istat (probabilmente per difetto) in 4.729 miliardi di lire (3.658 miliardi fiori e 1.071 miliardi piante), rappresentando circa il 7% della PLV agricola nazionale. Le regioni leader sono state: Liguria, Toscana, Campania, Sicilia, Puglia, Lombardia, Lazio (Tabella 1-13).

Milioni di lire corr.- elaborazione Coldiretti su dati ISTAT			
Regioni	FIORI	PIANTE	TOT.
Liguria	1.075.690	2.900	1.078.590
Toscana	288.561	388.857	677.418
Campania	501.453	17.549	519.002
Sicilia	421.541	85.665	507.206
Puglia	400.011	58.354	458.365
Lombardia	210.500	132.612	343.112
Lazio	170.896	30.452	201.348
Veneto	165.894	34.252	200.146
Piemonte	83.250	68.346	151.596
Emilia-Romagna	85.475	66.001	151.476
Sardegna	36.200	65.233	101.433
Friuli-V. Giulia	44.563	55.930	100.493
Marche	41.988	27.017	69.005
Abruzzi	33.222	7.305	40.527
Calabria	19.541	19.174	38.715
Trentino-Alto Adige	18.350	2.973	21.323
Umbria	8.400	5.762	14.162
Basilicata	2.186	5.400	7.586
Molise	-	994	994
ITALIA	3.607.721	1.074.776	4.682.497

Tabella 1-13: PLV 1998 fiori e piante in Italia

La superficie coltivata in Italia nella floricoltura è di 16.600 ha (di cui 11.000 in piena aria e 5.600 ha in serra), nel vivaismo di 19.700 ha. Il numero delle aziende censite è di 31.843, di cui 21.904 floricole (68,7%) e 9.939 vivaistiche (31,3%); il numero di addetti è circa 100.000.

La bilancia commerciale presenta un saldo positivo a partire dal 1995: malgrado una riduzione del 7% sul risultato del 1997, nel 1998 l'attivo è stato di circa 150 mld (tab. 5 export 800 mld, import 650 mld); il maggiore cliente resta la Germania (39% dell'export totale, il 42% per i fiori recisi).

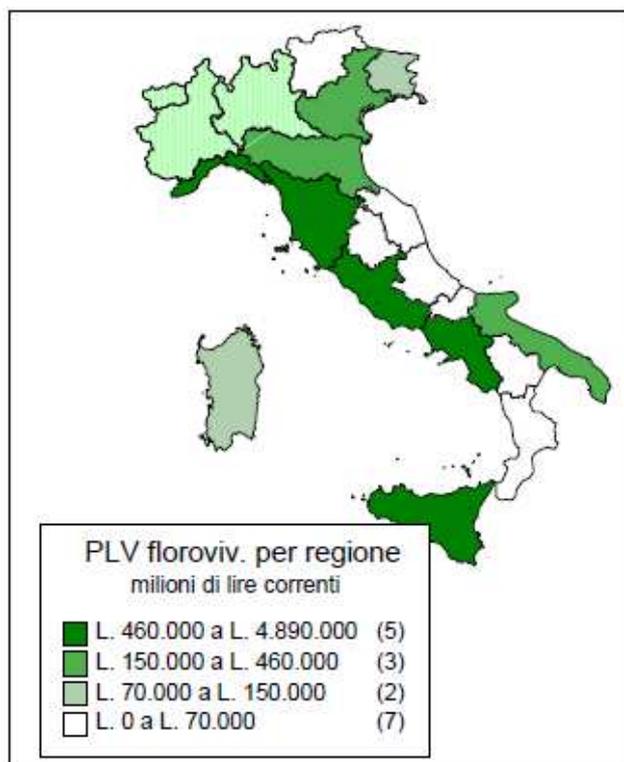
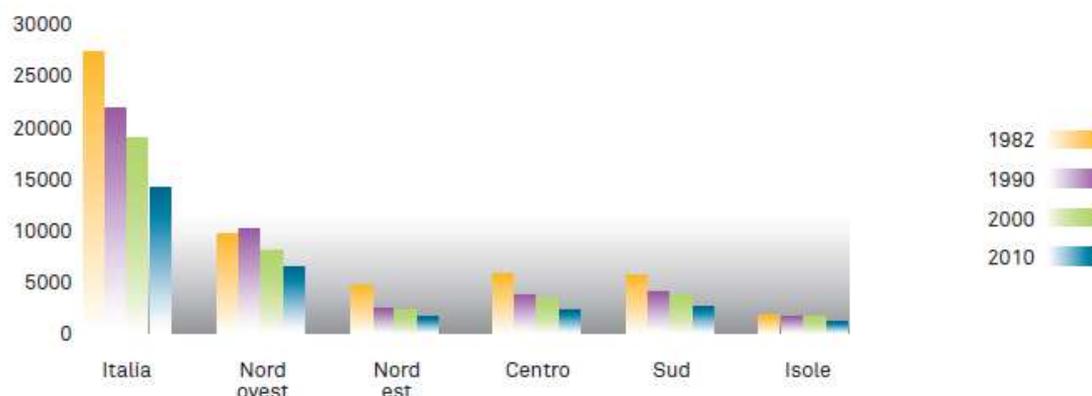


Figura 1-6: Florovivaismo in Italia - elab. Coldiretti

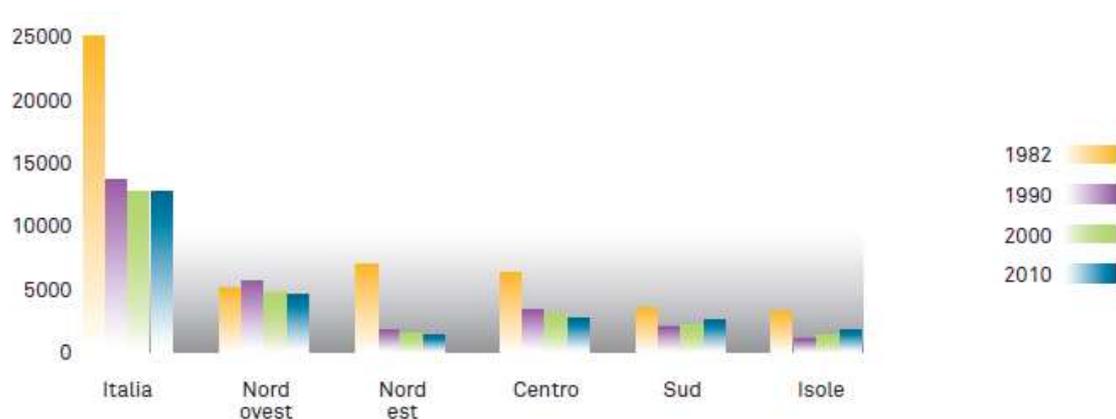
Sempre focalizzandoci sulla floricoltura, i dati del VI Censimento Agricoltura 2010 sono probabilmente gli unici in grado di fornire un quadro dettagliato e completo dal punto di vista strutturale ed è perciò interessante analizzare l'evoluzione delle caratteristiche strutturali delle aziende floricole rispetto agli ultimi quattro Censimenti (ISTAT, 2011; Gimelli e Mammoliti, 2012). In generale, dal 1982 al 2010 il numero di aziende si è quasi dimezzato passando da poco meno più di 27.000 a poco più di 14.000, con un andamento decrescente nel tempo (Figura 1-7).



Fonte: ISTAT, Censimento Agricoltura

Figura 1-7: Numero delle aziende con fiori e piante ornamentali in Italia

Contemporaneamente anche la superficie si è ridotta in modo significativo passando da quasi 25.000 ettari a circa 12.700 ettari, con un decremento sostanziale negli anni ottanta (fig. 1.6). I dati mostrano che la superficie media aziendale è rimasta praticamente invariata, al di sotto dell'ettaro, con un trend diverso rispetto a quello dei principali competitors italiani. Per esempio, la superficie media in Olanda nel 1980 era di circa 0,5 ettari mentre ora è rispettivamente di 1,2 ettari per i fiori recisi e di 1,6 ettari per le piante in vaso (Gimelli, 2012). Sono evidenti le questioni legate alle diseconomie di scala e di organizzazione di filiera: se le dimensioni aziendali sono troppo ridotte le produzioni in atto non garantiscono una PLV tale da permettere una adeguata remuneratività per l'azienda; inoltre i costi comuni risultano troppo elevati in quanto non si redistribuiscono in modo adeguato. Le regioni italiane maggiormente vocate al florovivaismo sono: Liguria, Toscana, Lazio, Campania, Puglia e Sicilia. Il fatturato globale è di oltre 2.500 milioni di euro che rappresenta il 5,8% del totale dell'agricoltura nazionale, in un rapporto 3 a 2 tra fiore reciso e piante in vaso (Consorzio ITA, 2009; ISTAT, 2011; ISMEA, 2011).



Fonte: ISTAT, Censimento Agricoltura

Figura 1-8: Superficie totale delle aziende con fiori e piante ornamentali in Italia (ha)

Per quanto riguarda i fiori recisi il trend è nettamente negativo in quanto si è assistito a una delocalizzazione produttiva verso il sud del mondo mentre negli anni ha assunto rilevanza il segmento del verde ornamentale, composto da fronde verdi, fiorite, a frutto e dalle foglie, le cui produzioni sono localizzate soprattutto in Toscana e in Liguria. Questo però ha comportato la coltivazione di prodotti a minor valore aggiunto. Diversamente dai fiori recisi il settore delle piante in vaso è in espansione come pure le specie da vivaio per l'arredo degli spazi verdi. Tale segmento ha risentito molto meno dell'allargamento degli scambi su scala internazionale ma l'aumento dell'offerta e la concentrazione della domanda hanno comunque indebolito il potere contrattuale delle aziende.

1.3 I numeri della produzione agricola in ambiente protetto in Liguria

Caratteristiche strutturali e produttive della floricoltura in Liguria

In Liguria è possibile osservare un trend simile a quello italiano ma con alcune specificità. Prima di tutto si osserva una notevole concentrazione territoriale che nel tempo si è via via consolidata e oggi comprende le province di Imperia e Savona, su cui insiste il Distretto Agricolo Florovivaistico del Ponente Ligure, tanto che oggi le province di Genova e La Spezia appaiono marginali sia dal punto di vista della numerosità aziendale che rispetto alle superfici dedicate (Gimelli e Mammoliti, 2012).

In Liguria si registra, inoltre, un netto decremento nel numero di aziende a cui corrisponde, in controtendenza, una tenuta, anzi un rafforzamento delle superfici (Tabella 1-14). Ciò ha significato un aumento medio delle superfici aziendali, praticamente raddoppiato dal 1982 al 2010 (da 0,33 a 0,63 ettari) che, in generale, ha caratterizzato tutte le aziende agricole italiane.

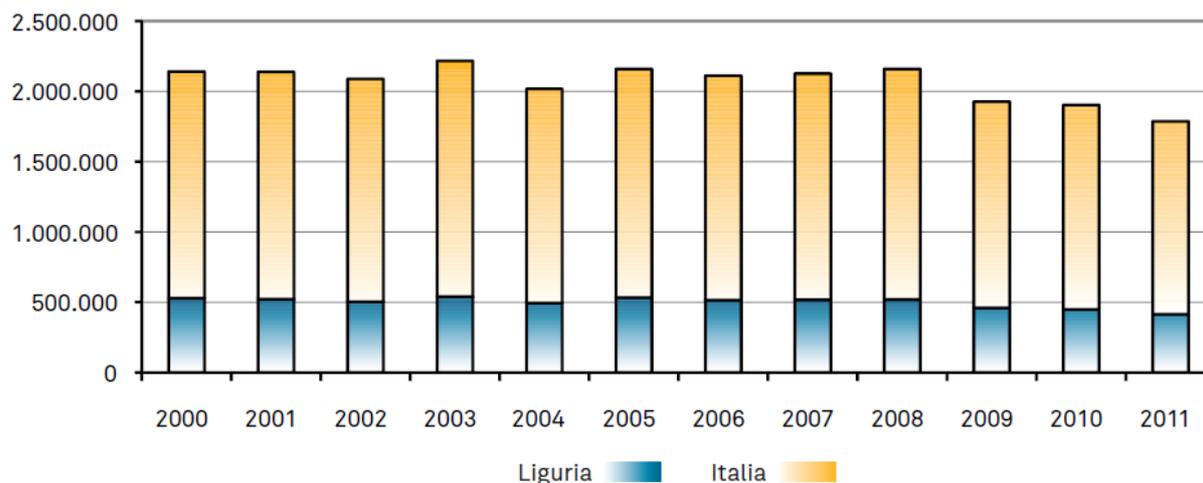
	1982		1990		2000		2010	
	SAU (ha)	Aziende (n.)						
Imperia	2.039,8	6.007	2.573,4	6.393	2.139,3	4.611	1.819,7	3.129
Savona	170,4	498	300,8	730	532,0	975	804,9	1.008
Genova	105,0	404	87,0	321	63,6	161	36,8	111
La Spezia	26,3	145	28,6	61	15,9	44	11,6	24
Liguria	2.341,5	7.054	2.989,8	7.505	2.750,8	5.791	2.673,0	4.272

Fonte: Censimento Agricoltura, ISTAT

Tabella 1-14: Superficie e aziende con fiori e piante ornamentali in Liguria (1982-2010)

Questo fenomeno ha spiegazioni ben precise in ambito regionale: nella provincia di Imperia è legato ad una maggior estensivizzazione delle produzioni con il passaggio da fiore reciso tradizionale (rose, garofani) a fronde recise; mentre nel savonese il dato mostra un incremento correlato alla diversificazione produttiva da ortaggi a piante fiorite e aromatiche in vaso (Gimelli e Mammoliti, 2012). La provincia di Savona – per lo stesso fenomeno – è l'unica dove aumentano le aziende anche in numero assoluto; se ne contano oltre 1.000 unità con una superficie media aziendale di 0,8 ettari.

In questa provincia la capacità dei coltivatori è stata quella di fare due completi cambiamenti di scenario in pochi anni con una elevata diversificazione produttiva. Il primo ha caratterizzato gli anni ottanta con un passaggio dagli ortaggi in serra e piena aria alle piante fiorite in vaso. Il secondo, negli anni 2000, ha fatto registrare l'introduzione di una nuova tipologia produttiva: le piante aromatiche in vaso, prodotto border line tra food e non food in quanto, pur essendo piante alimentari seguono il canale produttivo e distributivo delle piante ornamentali in vaso.



Fonte: ISTAT, 2012

Figura 1-9: Valore delle produzioni florovivaistiche in Liguria e in Italia nel periodo 2000-2011 (valori a prezzi correnti, euro)

Anche i dati in valore (a prezzi correnti) rappresentano una situazione simile, forse più ottimistica di quella percepita lungo la filiera (Figura 1-9). Il mercato, i gusti, le esigenze e quindi le strutture commerciali, produttive e distributive sono in rapida evoluzione ed è necessario fornire strumenti conoscitivi puntuali agli imprenditori e ai decisori politici al fine di cogliere al meglio le richieste dal mercato e di risultare sufficientemente competitivi anche sul mercato estero (AA.VV., 2013).

Certamente la sfida del futuro sarà incentrata sul piano della sostenibilità ambientale e non solo. Non c'è occasione, convegno o manifestazione che non sottolinei in modo forte e convinto questi aspetti: nelle ultime edizioni di Hortifair, la principale fiera mondiale di settore, per esempio, le parole d'ordine sono state: "Growing sustainably" e "For a Sustainable Future" (Gimelli, 2012). Una tendenza generale che non è sostenuta solo dagli ecologisti, ma anche da economisti classici. Basti una citazione da Harvard Business Review: «... In futuro solo le imprese che porranno la sostenibilità come obiettivo acquisiranno un vantaggio competitivo. Questo significa ripensare il modello commerciale, i prodotti, le tecnologie ed i processi ...» (Nidumolu et al. 2009).

Aziende floricole liguri afferenti alla RICA – Dati economici

Attraverso la RICA (Rete di Informazione Contabile Agricola) della Liguria viene rilevato un nutrito set di informazioni di natura contabile ed extra-contabile (all'incirca 2.000 variabili) che sono oggetto di controllo, validazione e successiva archiviazione mediante la procedura informatica Gestione Aziendale delle Imprese Agricole (GAIA) a tal fine predisposta dall'INEA. Il campione aziendale RICA è individuato affinché esso possa adeguatamente rappresentare, in termini statistici, l'agricoltura regionale; pertanto in Liguria una porzione significativa dello stesso (all'incirca la metà) è costituita da imprese specializzate nella floricoltura. Proprio a queste ultime si riferiscono i risultati delle elaborazioni condotte a partire dalle informazioni archiviate nella banca dati RICA e riferiti nella Tabella 1-15 e Tabella 1-16, nelle quali vengono descritte

separatamente le performance delle imprese liguri specializzate nelle produzioni floricole in serra e all'aperto (rispettivamente, OTE 212 e OTE 222).

	Aziende specializzate in floricoltura e piante ornamentali di serra	Aziende specializzate in floricoltura e piante ornamentali all'aperto
Aziende (n.)	89	153
Indicatori		
SAU - Superficie Agricola Utilizzata (ha)	0,77	1,45
SAU in affitto (ha)	0,18	0,23
SAU irrigata (ha)	0,73	1,06
ULF - Unità di Lavoro Familiari	1,36	1,09
ULT - Unità di lavoro Totali	1,62	1,19
Ore lavoro	3.742	2.697
Potenza macchine (kW)	46,25	28,98
Capitale fondiario (€)	188.006	131.883
Capitale di esercizio (€)	9.764	6.381
Nuovi investimenti (€)	3.076	3.097
Indici		
SAU affitto / SAU - Incidenza della SAU in affitto (%)	23,3	16,1
SAU irrigata / SAU - Incidenza della SAU irrigata (%)	94,9	73,4
SAU / ULT - SAU per Unità di Lavoro Totali (ha)	0,48	1,22
ULT / ULF - Incidenza del lavoro salariato	1,19	1,09
Ore lavoro / SAU - Impiego di manodopera per ettaro	4.849	1.861
Potenza macchine / SAU - Impiego delle macchine per ettaro (kW/ha)	60	20
Capitale fondiario / SAU - Incidenza del capitale fondiario rispetto alla SAU (€)	243.620	90.995
Capitale di esercizio / SAU - Incidenza del capitale di esercizio rispetto alla SAU (€)	12.653	4.402
Nuovi investimenti / SAU - Incidenza dei nuovi investimenti rispetto alla SAU (€)	3.986	2.137

Nota: dati medi campionari riferiti al triennio 2010-2012 (valori in € al 2012)

Fonte: Banca Dati RICA on line della Liguria (estrazione dati al 30/04/2014)

Tabella 1-15: Parametri strutturali delle aziende liguri specializzate nella floricoltura

Come si evince dalla Tabella 1-15 – che riporta i dati medi campionari riferiti al triennio 2010-2012 – sotto il profilo strutturale le due tipologie di impresa presentano dei tratti comuni, ma anche alcune marcate differenze. In entrambi i casi la maggior parte del lavoro è fornito dall'imprenditore e dai suoi familiari, mentre il ricorso a manodopera extra-familiare (salariati fissi e avventizi) pare essere piuttosto contenuto, specialmente nel caso delle aziende che ottengono le loro produzioni all'aperto. In questo caso il rapporto tra le Unità di Lavoro Totali e le Unità di Lavoro Familiari vale 1,09 (mentre è 1,20 nel caso delle aziende con serre).

	Aziende specializzate in floricoltura e piante ornamentali di serra	Aziende specializzate in floricoltura e piante ornamentali all'aperto
Aziende (n.)	89	153
Indicatori aziendali		
PLV - Produzione Lorda Vendibile (€)	86.660	50.182
di cui attività connesse (€)	16	371
CC - Costi correnti (€)	27.318	12.273
VA - Valore aggiunto (€)	59.359	38.280
CP - Costi Pluriennali (€)	6.717	2.176
PN - Prodotto Netto (€)	52.642	36.104
RD - Redditi Distribuiti (€)	9.202	4.742
RO - Reddito Operativo (€)	43.441	31.362
RN - Reddito Netto (€)	42.400	30.837
Trasferimenti pubblici (€)	7	190
Indici di efficienza		
PLV / SAU - Produttività della terra (€)	112.296	34.624
PLV / ULT - Produttività del lavoro (€)	53.425	42.254
1-(VA/PLV) - Incidenza costi correnti	0,32	0,24
1-(PN/VA) - Incidenza ammortamenti	0,11	0,06
1-(RN/PN) - Incidenza altri costi	0,19	0,15
RN/PLV - Redditività dei ricavi	0,49	0,61
RN / ULF - Redditività del lavoro familiare (€)	31.149	28.389
Trasferimenti pubblici / PLV (%)	0,01	0,38

Nota: dati medi campionari riferiti al triennio 2010-2012 (valori in € al 2012)

Fonte: Banca Dati RICA on line della Liguria (estrazione dati al 30/04/2014)

Tabella 1-16: Risultati economici delle aziende liguri specializzate nella floricoltura (dati medi campionari riferiti al triennio 2010-2012; € s.d.i.)

Un altro carattere comune alle imprese di OTE 212 e 222 consiste nel fatto che i terreni e i fabbricati aziendali sono per lo più di proprietà dell'imprenditore e l'incidenza dell'affitto e del comodato – sovente trattasi di comodato gratuito tra familiari – per le due tipologie di aziende esaminate è contenuta, rispettivamente, intorno al 23% e al 16%.

Alcune differenze abbastanza prevedibili riguardano, invece, la dotazione di terra (circa doppia nelle imprese che praticano la coltivazione in pieno campo) e la dotazione di capitale fondiario, molto superiore nelle imprese con serre rispetto alle altre (circa 244.000 vs 91.000 euro per ettaro) e di capitale agrario fisso e circolante (12.650 vs 4.400 euro per ettaro). Inoltre, le imprese di OTE 212 sono assai più labour intensive (4.850 ore di lavoro per ettaro vs. meno di 1.850) e alle stesse corrisponde un più intenso impiego di macchine (trattrici, motocoltivatori, fresatrici, autocarri, motocarri, ecc.) e di altre attrezzature a motore (motopompe, ecc.) testimoniato dal valore – triplo rispetto a quello delle aziende in pien'aria – dell'indice che esprime la potenza impiegata espressa in kW per ettaro.

Se si analizzano i risultati economici delle aziende liguri specializzate nella floricoltura (Tabella 1-16) si può notare come le performance delle imprese che operano in pien'aria si discostino di poco, in termini di redditività del lavoro, da quelle delle aziende che operano prevalentemente in ambiente protetto. In effetti, la produttività del lavoro è superiore (circa 53.000 vs 42.000 euro per ULT: +26%) per le aziende di OTE 212, ma la redditività del lavoro familiare (RN/ULF) si discosta di appena 2.750 euro: ciò significa che essa è superiore solamente del 9,7% nel caso delle aziende in serra.

Per quanto riguarda nello specifico i dati relativi ai risultati economici delle aziende liguri specializzate nella floricoltura e piante ornamentali in serra, viene riportato un resoconto dei principali parametri nella Tabella 1-17.

	2008	2009	2010	2011	2012
Aziende (n.)	99	97	102	84	82
Indicatori aziendali					
PLV - Produzione Lorda Vendibile (€)	104.597	86.102	90.780	84.062	84.197
di cui: attività connesse (€)	0	43	538	0	2
CC - Costi correnti (€)	24.240	17.103	18.783	30.720	34.448
VA - Valore aggiunto (€)	80.381	68.999	71.997	53.392	49.751
CP - Costi Pluriennali (€)	9.602	9.040	8.284	5.793	5.713
PN - Prodotto Netto (€)	70.778	59.959	63.713	47.598	44.039
RD - Redditi Distribuiti (€)	11.186	9.174	9.010	8.600	10.056
RO - Reddito Operativo (€)	59.593	50.785	54.703	38.999	33.982
RN - Reddito Netto (€)	59.248	51.353	54.678	37.465	32.185
Trasferimenti pubblici (€)	6	6	4	11	7
Indici di efficienza					
PLV / SAU - Produttività della terra (€)	139.424	113.988	114.514	119.298	103.402
PLV / ULT - Produttività del lavoro (€)	56.796	53.915	55.450	51.890	52.443
1-(VA/PLV) - Incidenza costi correnti	0,23	0,20	0,21	0,36	0,41
1-(PN/VA) - Incidenza ammortamenti	0,12	0,13	0,12	0,11	0,11
1-(RN/PN) - Incidenza altri costi	0,16	0,14	0,14	0,21	0,27
RN/PLV - Redditività dei ricavi	0,57	0,60	0,60	0,45	0,38
RN/ULF - Redditività del lavoro familiare	38.956	38.519	40.014	27.761	23.552
Trasferimenti pubblici / PLV (%)	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01

Fonte: Banca Dati RICA on line della Liguria (estrazione dati al 30/04/2014)

Tabella 1-17: Risultati economici delle aziende liguri specializzate nella floricoltura e piante ornamentali in serra nel periodo 2008-2012 (valori al 2012; € s.d.i.)

1.4 I consumi energetici legati alla produzione in ambiente protetto e la loro ottimizzazione in un'ottica di sostenibilità

1.4.1 Consumi legati all'agricoltura in Italia

Consumi di energia nell'agricoltura nazionale

Secondo le statistiche ufficiali i “consumi energetici finali” interni complessivi d'energia (termica ed elettrica) per l'agricoltura nazionale sono stati pari a 3,3 Mtep (dati ENEA 2010). Dei consumi finali in agricoltura (e pesca) circa il 70% è sotto forma di combustibili, il 15% sottoforma di energia elettrica per usi obbligati e il restante 15% sotto forma di calore per bassa temperatura (essenzialmente essiccazione prodotti e soprattutto climatizzazione delle serre). L'85% dell'approvvigionamento in agricoltura (compreso il comparto agroalimentare) è da addebitare alla voce “energia fossile” e il 15% alla voce “energia elettrica”. Tuttavia, è opportuno sottolineare che i dati riportati dalle statistiche ufficiali esprimono i consumi diretti e soprattutto sono principalmente riferiti ai combustibili venduti a prezzi agevolati, mentre l'energia elettrica è soltanto quella fatturata per uso agricolo. Stime CNEL e Confagricoltura riportano come i consumi di combustibili agevolati siano circa la metà del totale e quelli di energia elettrica per uso agricolo appena 1/10 del complesso delle aziende agricole se consideriamo che i consumi di elettricità delle aziende agricole vede spesso computati i propri consumi elettrici sotto la voce “usi civili” (il GSE riporta per l'agricoltura un consumo di 5,7 TWh per il 2008, pari all'1,8% del bilancio elettrico nazionale 2008). In definitiva, il consumo di energia per il settore agricoltura, sulla base di dati dal PFE 1990 e sulla base di successive integrazioni da parte del CNR, dell'ENEA e del CNEL, è quantificabile in non meno di 10 MTep.

Agroenergia al 2010

Nel bilancio energetico dell'Unione Europea, il contributo attuale delle biomasse ha una quota stimata al 2010 dell'8% e di 227 Mtep al 2020. Per l'Italia, le biomasse partecipano con un contributo di 5,2 Mtep alla produzione di energia primaria, con una copertura sui consumi totali di energia del 2,7%. In particolare, 4,0 Mtep riguardano la produzione di energia termica, 1 Mtep viene utilizzato per la produzione di energia elettrica e soltanto 200.000 Tep per la produzione di biocarburanti (dati ENEA, ENEL, Coldiretti 2009). Per gli Stati Membri è previsto il 10% di biocarburanti entro il 2020 sul consumo totale europeo.

Emissioni gas serra

Il 9% delle emissioni totali di gas serra in Europa sono generate dal settore agricoltura, soprattutto emissioni di protossido di azoto (N_2O) e metano (CH_4) derivanti dall'uso dei fertilizzanti e da attività zootecniche. Le emissioni nette di CO_2 , invece, ammontano a 57.000.000 di tonnellate a saldo dei 13.000.000 di tonnellate sequestrate dall'agricoltura attraverso i processi di produzione vegetale. In Italia, 475.302 Gg sono rappresentati dalle emissioni di anidride carbonica (CO_2) che rappresentano l'86% sulle emissioni totali. Secondo l'ultimo inventario nazionale (Ispra, 2009a) nel

2007 la prima fonte emissiva a livello nazionale è rappresentata dal settore energia, con l'83% delle emissioni; l'agricoltura è al secondo posto, ma è responsabile solo del 6,7% delle emissioni nazionali. Nel dibattito che si è sviluppato a livello internazionale ed Europeo (Copenaghen, 2009) si è ritenuto che la sola superficie forestale italiana, pari a circa 10,6 milioni di ettari, di cui il 63% è privata, assorbe 10,2 milioni di tonnellate di CO₂.

Acqua

L'agricoltura consuma circa il 24% dell'acqua in Europa. Questo dato potrebbe non sembrare eccessivo, in confronto al 44% di acqua utilizzata per la produzione di energia, ma il suo impatto sulle riserve è molto maggiore. Infatti, mentre quasi tutta l'acqua utilizzata per la produzione di energia torna nel corpo idrico, per l'agricoltura spesso si tratta solo di un terzo. L'Italia dedica a scopi irrigui (agricoltura e allevamenti) circa il 60% dei 56 miliardi di m³ annui di consumi di acqua dolce ed è al primo posto in Europa per la maggiore estensione agricola irrigata (4.500.000 ha) (arpat.toscana.it).

L'efficienza energetica in agricoltura

Di seguito si riportano gli interventi che l'ENEA ha individuato con il fine ultimo di fornire le informazioni tecniche indispensabili per definire un quadro realistico dei possibili interventi di efficienza energetica nel settore agricoltura.

Intervento 1 - Efficienza energetica nelle coltivazioni ortive ¹										
Ortive	Produzione totale (ton)	Consumo energia (TEP)	MtCO ₂	Spreco totale (Mton)	Energia associata allo spreco (TEP)	tCO ₂ del residuo	Miglioramento efficienza energetica sullo spreco totale (TEP)			
							2016 (20%)		2020	
							TEP	tCO ₂	TEP	tCO ₂
in serra	15.712.446	558.262	1,56	5,78	205.448	577.309	41.089	115.462	205.448	577.309
in campo	127.936.217	1.939.258	5,44	38,04	576.692	1.620.506	115.338	324.101	576.692	1.620.506
TOTALE							156.427	439.563	782.140	2.197.815

Intervento 3 - Efficienza energetica materiali plastici nell'agricoltura protetta						
Quantità (t)	Consumo energia (TEP)	tCO ₂	Efficienza energetica mediante Building greenhouse		tCO ₂ risparmiata	
			2016 (20%)	2020	2016 (20%)	2020
850.000	588.115*	1.652.603	117.623*	1.411.476 ***	330.520	3.966.248

* I teli vengono sostituiti mediamente ogni 2 anni. **Si sostituirà il 20% dei teli con sistemi serra fotovoltaici.
*** Si sostituirà il 100% dei teli con sistemi serra fotovoltaici.

Intervento 4 - Efficienza energetica dei sistemi serra sostenibili						
Sistemi Serra	Consumo energia primaria (TEP)	tCO ₂	Risparmio energia primaria con interventi tecnici per migliorare l'efficienza energetica (20%) al 2016 (TEP)	Risparmio energia primaria con installazione di impianti PV al 2020 (TEP)	tCO ₂ risparmiata al 2016	tCO ₂ risparmiata al 2020
Riscaldamento	706.786	1.986.069	141.357	706.786	397.214	1.986.069
Raffrescamento	16.232	45.612	3.246	16.232	9.121	45.612
Utenze elettriche	8.598	24.160	1.719	8.598	4.830	24.160

Tabella 1-18: Interventi mirati all'incremento dell'efficienza energetica in agricoltura, ENEA 2011

Dati ENEA (2009) riportano per l'intensità energetica dell'agricoltura italiana, calcolata rispetto al valore aggiunto del settore, il dato dello 0,12 rispetto allo 0,08 della Francia e allo 0,17 della Germania (la media Europea si colloca a 0,15). Per quanto riguarda, invece, i possibili interventi nel settore agricoltura al fine del miglioramento dell'efficienza energetica, sulla base delle valutazioni dell'ENEA sopra riportate, potenzialmente si stimano un risparmio di energia di 1,4 MTep al 2016 e di 5,5 MTep al 2020.

Gli attori della filiera Agroenergia

Dalle filiere agroenergia si stima una produzione potenziale di non meno di 11 MTep. In particolare, le filiere del settore agricoltura prese in considerazione sono le seguenti (dati forniti da ENEA e Coldiretti):

Filiera Materiali Plastici in Serra: si stima un consumo di materiali plastici di oltre 85.000 tonnellate che non risultano conteggiati tra i consumi energetici dell'agricoltura (per la produzione del polietilene sono richiesti 92-111 MJ/kg, per il polivinilcloruro 85-107 MJ/kg, per il polistirolo 118-160 MJ/kg, per il poliestere 170-222 MJ/kg). Si stimano al 2020 1.411.476 Tep di risparmio energetico.

Filiera Sistemi Serra: Sulla base di 6.000 ha dotati di strutture permanenti, stime ENEA riportano 723.018 Tep (riscaldamento e raffrescamento) e ulteriori 8.598 Tep per le varie utenze elettriche (luce e servizi). Sulla base dell'applicazione di criteri, sistemi e processi innovativi, che migliorano l'efficienza energetica, si può ottenere una riduzione al 2016 del 20% dei consumi di energia per la climatizzazione delle serre e del 100% al 2020.

Filiera Sistemi Serra Fotovoltaici: uno studio del CNES riporta per l'Italia un potenziale realistico di installazioni fotovoltaiche calcolato sulla disponibilità di infrastrutture agricole (capannoni e tettoie rurali), pari a 9,8 GWp al 2015. Secondo l'Energy & Strategy Group, il potenziale fotovoltaico sulle superfici agricole a "serra" è stimato al 2020 in 5,8 GW di potenza installabile e in ulteriori 27,4 GW se consideriamo la potenzialità dei terreni incolti e/o a scarso rendimento agricolo. Attualmente, le installazioni fotovoltaiche in agricoltura raggiungono una potenza di 90-

100 MWp, con una potenza media di 60 KW su circa 2.000 impianti (stime ENEA e GSE, giugno 2010).

La ricerca, l'innovazione tecnologica e i dimostratori

Il modello della generazione distribuita, l'efficienza energetica del processo di produzione vegetale, l'ammodernamento delle strutture e degli impianti produttivi e la definizione di un quadro normativo funzionale per favorire l'innovazione tecnologica e la sostenibilità ambientale, rappresentano obiettivi che ormai hanno una collocazione stabile all'interno del settore agricoltura. In Tabella 1-19 si riportano gli interventi individuati, le possibili innovazioni, la disponibilità di dimostratori secondo dati ENEA, con riferimento all'agricoltura protetta.

Intervento 3 - Efficienza energetica materiali plastici nell'agricoltura protetta	
Innovazione proposta	Norme e incentivi per sviluppare materiali plastici di origine vegetale (amido ecc.)
Dimostratori	Disponibili presso aziende agrarie. L'UTEA-AGR ha un PON in corso di finanziamento.
Intervento 4 - Efficienza energetica dei sistemi serra sostenibili	
Innovazione proposta	L'UTEA-AGR ha in corso di preparazione 2 schede per TEE in agricoltura.
Dimostratori	UTEA-AGR ha sviluppato sistemi serra chiusi fotovoltaici (Prog. MODEM).

Tabella 1-19: Interventi di innovazione tecnologica e dimostratori

1.4.2 I consumi energetici in agricoltura protetta

Consumi energetici ed emissioni di CO₂

Nel bacino del mediterraneo il consumo di energia dei sistemi serra si attesta tra i 5 e i 7 Kg equivalenti di petrolio (1 kg_{ep} = 11,63 kWh) l'anno, ovvero 60-80 kWh/ m₂, mentre nell'Europa centro settentrionale, dalla Germania all'Olanda, si arriva a 40-80 kg_{ep} (460-930 kWh/m₂/a); tuttavia, questi carichi energetici si rilevano anche in alcune serre floricole del nord Italia (es. in Veneto). Un quadro indicativo della situazione europea è riportato Tabella 1-20.

Paese	Potenze energetiche (W/m ²)
Olanda, Germania	250 - 280
Nord Italia	150 - 200
Centro Italia	100 - 150
Sud Italia	30 - 50
Israele - Tunisia	50 - 110
Consumo di energia	
Sud Europa (area Mediterranea)	Centro-Nord Europa
5 - 7 kg equivalenti petrolio/anno/m ²	40 - 80 kg equivalenti petrolio/anno/m ²

Tabella 1-20: Potenze energetiche del sistema serra

In Italia, attualmente il costo di riscaldamento incide indicativamente per il 30% sul costo di produzione in serra (Fonte ENEA). In Italia, l'incidenza media dei consumi energetici diretti per il riscaldamento delle serre incide fino al 30-40% (in relazione alla volatilità del costo dell'energia) sui costi totali di produzione.

Ancora poco diffusi, invece, i sistemi di raffrescamento forzato del tipo *pad and fan* (realizzato con pannelli imbibiti con acqua posti su una testata della serra e da ventilatori di estrazione dell'aria sulla testata opposta) o *fog* (realizzato con immissione di acqua finemente polverizzata che a contatto con l'aria calda della serra evapora e consente l'abbassamento di temperatura) anche se la destagionalizzazione delle produzioni in serra insieme con la richiesta di prodotti freschi di qualità da parte della Grande Distribuzione Organizzata (GDO), richiede ormai il ricorso alla climatizzazione artificiale per mantenere sia le caratteristiche di qualità dei prodotti, sia calendari produttivi annuali ininterrotti. Sebbene non siano disponibili dati sull'impiego del raffrescamento artificiale nelle serre, è opportuno sottolineare che l'utilizzazione di questi sistemi richiede potenze energetiche non inferiori a 250 W/m² e consumi elettrici che spesso rappresentano fino al 15% dei consumi totali di energia. [6][1]

Le serre riscaldate sono ormai molto diffuse nel nord Italia e stanno diventando sempre più frequenti anche nelle regioni del sud. Considerando una superficie delle serre permanenti di 6.000 ha si stima un consumo per il solo riscaldamento di 300-500 ktep/anno (Corrisponde al 6-10% del baseline ipotizzato nel PAN italiano per le biomasse solide, pari a 5,2 Mtep di produzione lorda di energia), ovvero 3.500-5.800 GWh/anno. In termini di biomassa corrispondono a circa 1,4-2,3 milioni di tonnellate (Potere calorifico inferiore – pci – ipotizzato: 2,5 MWh/t). A titolo esemplificativo questo quantitativo di biomassa corrisponde alla quantità consumata annualmente dalle circa 30 centrali elettriche italiane caratterizzate da un rendimento elettrico medio del 25%, che dissipando tutto il calore di processo "sprecano" oltre l'80% dell'energia primaria della biomassa. Supponendo che le serre permanenti usino tutto gasolio per il riscaldamento e ipotizzando un consumo medio di 5 kg_{ep}, si tratta di un consumo annuo di 350

milioni di litri, ovvero circa 350 milioni di Euro di controvalore economico “perso” – in termini di potere di acquisto – dalle imprese e dal paese ogni anno per la fornitura di questo combustibile fossile. L’uso del gasolio e delle fonti fossili per il riscaldamento delle serre causa inoltre un significativo impatto sulle emissioni di sostanze clima alteranti. Per produrre 1 MWh di energia termica utile con il gasolio sono emessi in atmosfera 325 kg di CO₂-eq, perciò il riscaldamento delle serre contribuisce ad emettere circa 1,1 milioni di tonnellate di CO₂-eq/anno (il consumo energetico per la produzione e l’uso finale del combustibile comporta l’emissione in atmosfera di CO₂ e di altri gas ad effetto serra, espressi in forma aggregata dal parametro CO₂ equivalente), al netto degli elevati costi ambientali e sociali che la produzione, il trasporto e la contesa delle fonti fossili comportano.

Efficienza energetica ed uso razionale dell’energia

Uno dei principali obiettivi di una moderna impresa agricola che opera nella filiera delle colture protette e, da un lato, l’abbassamento dei costi di produzione e dall’altro l’aumento dell’efficienza produttiva. L’impiego razionale dell’energia è uno dei presupposti più importanti per raggiungere questo obiettivo, considerato il peso del costo energetico sui cicli produttivi dei sistemi serra. Di fronte ad uno scenario di progressivo aumento dei costi dell’energia e una crescente competizione sui mercati internazionali, gli operatori sono alla ricerca di soluzioni per:

- ridurre il fabbisogno energetico aziendale;
- impiegare con maggiore efficienza l’energia;
- ridurre il costo dell’energia.

Quando la componente dei costi energetici di un’azienda è pari a ca. il 10% del fatturato annuo, ci sono chiaramente margini di risparmio conseguibili. Pertanto se si punta a un risparmio energetico del 20% rispetto a un fatturato medio annuo di 500.000 €, si ottiene un maggiore profitto annuo di 10.000 €. Nel comparto delle colture protette sono conseguibili risparmi energetici dell’ordine del 5-30% in molti settori produttivi. Sebbene dopo la crisi energetica degli anni ‘70 siano stati fatti notevoli sforzi per la razionalizzazione dell’uso dell’energia nelle serre, esistono attualmente in molti casi ancora notevoli margini di risparmio energetico. Nelle serre più del 90% del fabbisogno energetico complessivo è attribuibile al riscaldamento. Con le seguenti misure di riduzione si possono conseguire importanti risparmi energetici e riduzioni dei costi.

Azione	Risparmio energetico conseguibile %
1 Schermi energetici	20-40
2 Isolamento delle coperture e dei sistemi di aerazione	10-20
3 Coibentazione e materiali di copertura	7-10
4 Sistemi di distribuzione del calore	10-18
5 Ottimizzazione dell'impianto di riscaldamento	10-15
6 Regolazioni climatiche	10-20
7 Sistemi di rilevazione	5-10
8 Ottimizzazione dello sfruttamento della superficie coltivabile	8-10
9 Risparmio d'acqua e di energia per l'irrigazione	5-10
10 Lampade a basso consumo o di tipo LED	50-80

Tabella 1-21: Misure adottabili e risparmio energetico conseguibile

Per contrastare le spese di energia da un lato e la necessità di ridurre le emissioni di CO₂ è ormai improrogabile, per le imprese dell'agricoltura protetta, sia l'introduzione di tecnologie energetiche eco-compatibili e sia il ricorso a pratiche colturali, sistemi e processi produttivi in grado di massimizzare da un lato l'efficienza energetica dei cicli colturali e da un altro lato di favorire l'impiego di energie rinnovabili localmente disponibili per la climatizzazione microclimatica. Con specifico riferimento all'efficienza energetica, tale parametro per l'agricoltura protetta si definisce, in generale, come il rapporto tra il consumo di energia diretta e la produzione per unità di prodotto oppure per unità di cicli colturali. Pertanto, nel comparto dell'agricoltura protetta un criterio appropriato per valutare l'efficienza energetica delle piante da frutto e da foglia può essere riferito al consumo di energia e alla produzione vegetale, tenuto conto che il valore nutritivo in termini di vitamine e proteine rappresenta certamente una misura dell'energia contenuta nel prodotto. In questo senso, la misura dell'efficienza energetica in floricoltura risulta di più difficile valutazione a meno che non si prenda come riferimento il valore intrinseco della stessa qualità del fiore o della pianta ornamentale (flower power). In ogni caso, il consumo di energia si riferisce al consumo primario di combustibile e/o di elettricità. A questo proposito, è opportuno sottolineare gli interventi e la normativa messi in campo dalle istituzioni europee e nazionali (Campiotti et al., 2010), di cui gli operatori dell'agricoltura protetta si possono avvalere per favorire la sostenibilità energetica ed ambientale del comparto. In particolare, il Decreto Legislativo 30 maggio 2008 n. 115 (attuazione della direttiva 2006/32/CE) relativo all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici, la direttiva europea 20/20/20 (sull'impiego delle energie rinnovabili che prevede per l'Italia la quota del 17% dei consumi finali di energia con risorse rinnovabile entro il 2020), il Protocollo di Kyoto (ripartizione tra i Paesi firmatari delle riduzioni di CO₂). La Tabella 1-22 riporta un elenco di possibili interventi per migliorare l'efficienza energetica del processo produttivo in serra. [6][1]

Sistemi ed accorgimenti per aumentare l'efficienza energetica	Benefici per l'azienda, la coltura e il microclima
Maggiore coibentazione della serra	Diminuzione delle superfici di dispersione del calore
Impiego di sistemi di "teli termici"	Riduzione del volume della serra da climatizzare
Strategie di controllo e programmazione della °T e dell'UR	Riscaldamento dell'aria correlato con l'intensità luminosa esterna Metodi di "temperatura integrata" delle piante. Regolazione sia delle variazioni di temperatura e sia dei valori di UR, in corrispondenza dei "set-points"
Sistemi e tecniche di accumulo passivo del calore solare	Massimizzazione della climatizzazione solare
Coperture trasparenti/filtri per la regolazione della trasparenza alla radiazione visibile e/o alla radiazione infrarossa in relazione alla coltura	Aumento della radiazione visibile (PAR) e diminuzione della radiazione infrarossa (NIR)
Coperture che aumentano la diffusione della radiazione solare diretta	Aumento della radiazione visibile per le piante
Aumento della superficie disperdente delle finestrate	Maggiore ventilazione naturale per il raffrescamento
Sistemi di cogenerazione	Impiego di risorse energetiche locali (biomassa)
Lampade a basso consumo o di tipo <i>Light Emitting Diodes</i> (LEDs)	Miglioramento della produttività vegetale e aumento del ciclo di vita delle lampade
Caldaie a biomassa, pompa di calore geotermica, sistemi fotovoltaici	Innovazione energetica, riduzione delle emissioni di CO ₂

Tabella 1-22: L'efficienza energetica per l'agricoltura protetta

Irraggiamento solare

Le specifiche condizioni climatiche dell'area del bacino mediterraneo (*Mild winter climate conditions*) assicurano, in generale, una radiazione solare media annuale compresa tra 4,8 e 6,8 kWh/ m₂/giorno. In Italia sono state rilevate punte di irraggiamento medio annuo fino a 1600-1800 kWh/ m₂/anno, soprattutto per alcune aree specifiche della Sicilia: la piana di Gela, le zone di Mazara del Vallo, Marsala, Vittoria e la piana di Catania (dati ENEA). La risorsa solare disponibile, pertanto, se razionalmente sfruttata potrebbe essere vantaggiosamente impiegata sia durante i periodi stagionali freddi (sistemi di riscaldamento con calore a bassa temperatura) sia per coprire le utenze energetiche delle serre (ventilazione e/o raffrescamento, motorizzazioni, pompaggi) durante i periodi di caldo intenso. Per quanto riguarda il rendimento di un pannello solare termico e la sua applicazione al comparto delle serre, si calcola, in valore assoluto, che l'energia termica fornita da una superficie pari al 10% della superficie protetta (serra) può coprire fino al 30% del fabbisogno termico necessario per mantenere la coltura durante il periodo notturno invernale. Pertanto, i collettori solari piani ad aria o ad acqua (portate variabili da 0,05 a 1 m³/h/m₂ e con temperature del fluido circolante comprese tra 30 e 55 °C), per la produzione di acqua calda

consentirebbero risparmi di gasolio dell'ordine di 10-15 kg/anno/m² di collettore, in relazione alle aree climatiche. Per il solare fotovoltaico, il cui costo è diminuito dai 7.000 €/KWp del 2006 ai 2.500-3.500 €/KWp del 2010, invece, si è visto sperimentalmente che un metro quadrato di moduli fotovoltaici installato per le richieste energetiche della serra in una tipica zona del Meridione, produce un'energia media giornaliera pari a 0,3÷0,4 kWh_{el} nel periodo invernale, e di 0,6÷0,8 kWh_{el} in quello estivo (Campiotti *et al.*, 2008; Campiotti *et al.*, 2009b). Sono in corso sperimentazioni all'ENEA sui moduli solari fotovoltaici che oltre a produrre energia elettrica, captano energia termica mediante un sistema a tenuta, situato nella parte posteriore, in cui scorre acqua di pozzo (temperatura di 12-15 °C) che viene scaldata a temperature non superiori a 30÷35°C e stoccata in un serbatoio-boiler, opportunamente coibentato, per essere utilizzata come input energetico in caso di abbassamenti repentini della temperatura e/o per contrastare le tradizionali gelate che si riscontrano durante gli estremi stagionali (marzo, ottobre) e comunque come sistema di riscaldamento durante il periodo autunnale e invernale. Il sistema accumulo è stato ipotizzato in 20.000 litri acqua per ettaro di serra (ENEA, Progetto Modem). I vantaggi dell'energia solare risulterebbero maggiori se si considerassero i costi "esterni" associati alla climatizzazione tradizionale in termini sia di emissioni di CO₂ e sia di possibili danni verso l'ambiente e verso l'uomo.

La geotermia

Un inventario delle risorse geotermiche a bassa temperatura presenti in Italia riporta una lista di 485 siti geotermici di cui 347 sorgenti e 138 pozzi (<1000 m di profondità) con temperature variabili da 20° a 39 °C (71%), da 40 °C a 59 °C (21%) e superiori a 60 °C (8%). Sotto il profilo geografico i siti geotermici sono distribuiti per il 25% in Toscana, per il 16% nel Lazio, per il 13% in Campania, per il 12% in Sicilia, per il 9% in Sardegna, per l'8% in Veneto e per il rimanente 17% nelle altre regioni italiane (dati IIG, CNR, ENEA). Nonostante una così ampia distribuzione della risorsa geotermica sul territorio nazionale (Figura 1-10) e l'ampia disponibilità di tecnologie di climatizzazione geotermica, le applicazioni dirette in agricoltura e nelle serre delle acque geotermiche a bassa temperatura (<100 °C) risultano ancora limitate e geograficamente circoscritte a poche regioni con in primo luogo la Toscana, il Veneto e il Lazio (Tabella 1-23). Il flusso geotermico nel terreno (calore terrestre) presenta valori variabili tra 0,05–0,12 W/m² e risulta costante per 8760 h/anno (numero di ore annuali). Recentemente si è visto che la tecnologia della pompa di calore geotermica consente applicazioni vantaggiose anche nell'agricoltura protetta.

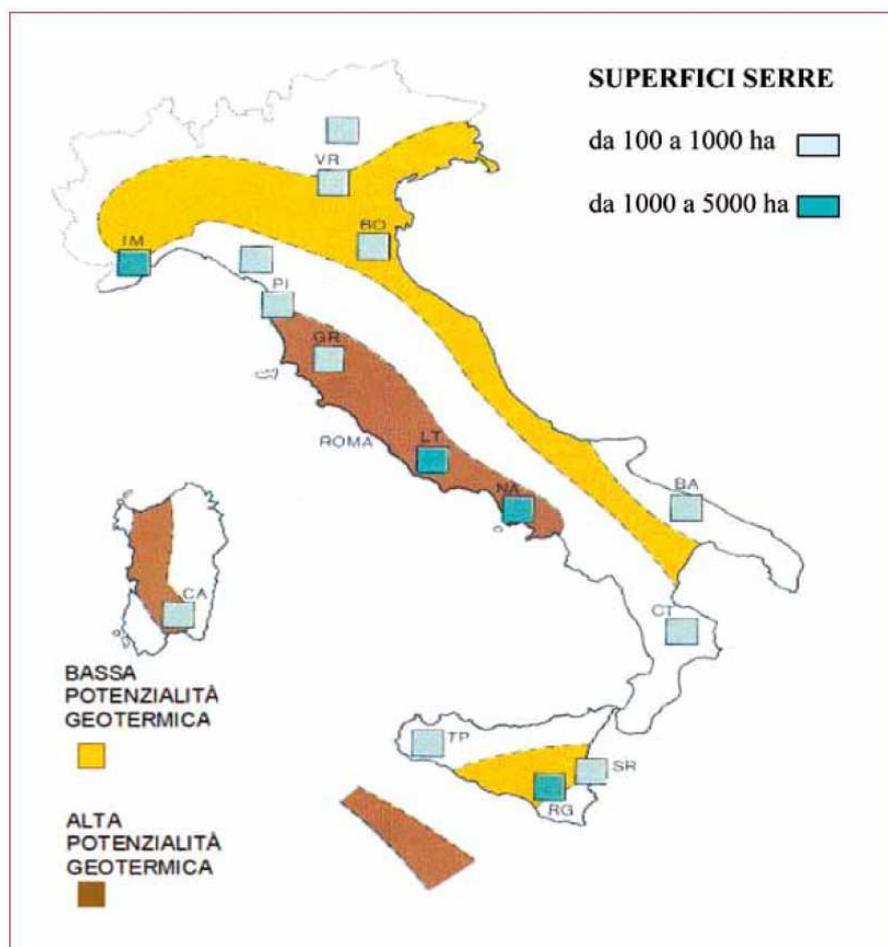


Figura 1-10: La geotermia e l'agricoltura protetta in Italia

Sorgenti geotermiche a bassa temperatura	Superficie serre (ha)	Serre geotermiche* (ha)
25% - Toscana	2.000	25 - 30
16% - Lazio	3.000	18 - 20
13% - Campania	5.000	-
12% - Sicilia	8.000	-
9% - Sardegna	3.000	-
8% - Veneto	2.000	<1
17% in altre regioni	7.000	

* include sia serre ancora in attività e sia serre dimostrative realizzate con programmi europei.

Tabella 1-23: Geotermia a bassa temperatura e serre in Italia

L'energia termica presente nel terreno, infatti, può essere estratta con sistemi di sonde geotermiche che prevedono l'impiego di manichette in plastica interrate, secondo configurazioni orizzontali, fino a profondità di 3 metri (si estrae soprattutto il calore solare immagazzinato nel terreno). Questa tecnologia non produce emissioni significative di CO₂. Per un sistema serra di

1.000 m² questa tecnologia, sulla base di una capacità energetica compresa tra 20–60 W/m², consente di estrarre dal terreno fino a 45 kWt per la climatizzazione microclimatica dell'ambiente coperto, con impieghi durante l'anno fino al 100%. Assumendo un COP = 4 (*Coefficient of Performance* = coefficiente di prestazione della pompa di calore), a fronte di una *spesa* di 1 unità di energia elettrica per il funzionamento della pompa di calore, si *estrangono* 3 unità di energia termica dal terreno e se ne *forniscono* 4 come riscaldamento della serra. Pertanto se assumiamo un 25% di utilizzo temporale della pompa di calore geotermica, l'installazione di 60 kWt fornisce 131.400 kWh per 1000 m² (60 kWt x 8.760 h). Il costo di una pompa di calore geotermica risulta mediamente compreso tra 3.000 - 3.500 Euro/kW (IVA esclusa).

La biomassa

La stima della potenzialità nazionale di biomassa (legna da ardere e residuale) utilizzabile risulta pari a 5 Mtep. Nell'Italia centro-meridionale e nelle isole, sono stati censiti non meno di 2 milioni di ettari di terreni inutilizzati e/o abbandonati dall'agricoltura convenzionale per insussistenza di reddito agrario, che potrebbero rivestire un'importanza rilevante per lo sviluppo di filiere agro-energetiche a sostegno dell'agricoltura protetta. Di particolare interesse, le coltivazioni di biomassa dedicate sia erbacee annuali (sorgo) sia perennanti (miscanto, canna comune, panico) per la produzione di pellets, briquettes, chips (Progetto Impresa, 2006). Sulla base di una serra di 100 m² con una potenza energetica di 100 W/m² di serra, tenuto conto di un rendimento termico della caldaia a biomassa dell'85% e di una resa energetica della biomassa di 3,9 kWh/kg, abbiamo un consumo medio di materiale ligno-cellulosico di circa 50 kg per mq di serra in relazione a 1.500 ore di funzionamento.

In generale, possiamo considerare che 3-4 kg di materiale ligno-cellulosico (17-18 MJ/Kg) sono sufficienti per sostituire 1 kg di gasolio per la climatizzazione termica di una serra.

1.5 Legislazione di riferimento italiana ed europea su consumi/risparmio energetici in serra, ed incentivi.

1.5.1 Piano normativo energie rinnovabili

In attuazione della direttiva 2009/28/CE che fissa obiettivi vincolanti al 2020, l'Italia si è dotata, nel 2010, del Piano di Azione Nazionale per le fonti rinnovabili di energia (PAN).

Il Piano prevede che, entro il 2020, le FER dovranno soddisfare il 17% dei consumi finali di energia ed il 10% dei consumi nei trasporti. In tale Piano alla bioenergia è assegnato un ruolo determinante, dovendo contribuire, nel breve termine, con una produzione di elettricità pari 18.780 GWh (il 19% dell'obiettivo complessivo delle FER elettriche al 2020, peraltro già conseguito).

In ambito agricolo, definendo opportuni limiti di sostenibilità per l'installazione di impianti a fonti rinnovabili a tutela del paesaggio, del suolo (es. solare termodinamico) e delle risorse idriche, sussistono tutti i presupposti per sviluppare ed integrare le differenti tecnologie oggi disponibili.

Gli studi sviluppati negli ultimi anni in Italia hanno evidenziato con chiarezza che la produzione di energia in campo agricolo può utilizzare gli apprestamenti protetti (serre purché effettivamente destinate alla produzione agricola) come supporto, riducendo in questo modo in maniera significativa il consumo di suolo, producendo energia elettrica solo in piccola parte consumata dalle serre stesse (in generale meno del 15%), rendendo disponibile la stessa per le altre applicazioni agricole, con percentuali variabili d'uso (riscaldamento, refrigerazione, illuminazione, movimentazione bancali, funzionamento impianti fuori suolo, ecc.) o per la vendita al gestore della rete. Inoltre, la particolare natura dell'energia elettrica, rende la stessa una merce di facile trasporto e scambio all'interno di smart grid distribuite sul territorio.

1.5.2 Piano normativo per serre fotovoltaiche

All'interno del Piano di Settore per le Bioenergie sono state definite le possibili direttive per la produzione e lo sfruttamento di energia proveniente da impianti fotovoltaici.

La produzione di energia elettrica da impianti fotovoltaici è senza dubbio un'opportunità per le aziende agricole che ben si inserisce nell'ottica della diversificazione verso la multifunzionalità e che può dare un importante contributo all'integrazione del reddito aziendale.

Il grande sviluppo della produzione di energia elettrica da fotovoltaico registrato negli ultimi anni ha comportato investimenti nelle aziende agricole ad integrazione dei cicli produttivi aziendali, ma anche alla proliferazione di impianti a terra di grandi dimensioni di proprietà extra- agricola, che hanno sottratto suoli all'uso agricolo generando impatti negativi sotto l'aspetto paesaggistico – ambientale, fino a quando la realizzazione di tali impianti non è stato di fatto bloccata dal decreto legge 24 gennaio 2012, n 1, convertito con legge n. 27 del 2012, che non consente a questa tipologia di impianti l'accesso agli incentivi.

Allo stato attuale la produzione di energia elettrica da fotovoltaico non è più incentivata, in quanto è stato raggiunto il costo indicativo cumulato degli incentivi fissato dal Dm 5 luglio 2012, il cosiddetto V Conto Energia.

In questa fase, pertanto, si presenta l'occasione di proseguire il percorso di sviluppo equilibrato e sostenibile, utilizzando le possibilità offerte dalla programmazione dei fondi strutturali attraverso la previsione di specifici interventi per il finanziamento di impianti fotovoltaici nei Programmi di Sviluppo Rurale attualmente in fase di emanazione (2016).

Tali interventi dovrebbero essere rivolti alla realizzazione di impianti fotovoltaici che sfruttino le coperture dei fabbricati agricoli (stalle, capannoni, serre, ecc.), preservando quindi la destinazione dei suoli all'uso agricolo, dando priorità a progetti che possono fornire un valore aggiunto ambientale, come ad esempio nel caso della bonifica delle superfici in cemento amianto.

Occorre pertanto fare un passo indietro e ripercorrere quanto definito all'interno dei passati Conti Energia (IV e V) che hanno fissato le regole per quanto riguarda la realizzazione delle cosiddette "serre fotovoltaiche", rimando in attesa degli sviluppi che si spera verranno introdotti da sistemi di finanziamento quali il Piano di Sviluppo Rurale al fine di promuovere in modo ulteriore la sostenibilità della produzione agricola.

I Conti Energia per la promozione della produzione di energia da fotovoltaico in agricoltura

Le colture protette, quelle che vengono coltivate adottando per l'intero ciclo o parte di esso un condizionamento più o meno completo del clima rappresentano una fonte di reddito importante di molte aziende agricole italiane.

Le principali coltivazioni sotto serra riguardano il settore del florovivaismo e degli ortaggi, colture che mediamente garantiscono un maggiore reddito per unità di superficie. Al contempo tali colture sono caratterizzate da un più elevato consumo energetico.

Le serre fotovoltaiche diventano, in un'ottica di multifunzionalità, fonte alternativa di reddito per le aziende che coltivano sotto serra.

Negli anni compresi tra il 2007 e il 2011, grazie al susseguirsi dei diversi Conti Energia, si è assistito ad un vero e proprio "boom" di impianti fotovoltaici di diverso tipo grazie soprattutto al sistema di incentivi riservati a chi immetteva in rete energia da fonte fotovoltaica attraverso il meccanismo conosciuto come "scambio" sul posto. Le serre hanno potuto e possono essere sfruttate in termini di superficie e struttura portante per l'installazione di impianti fotovoltaici che siano perfettamente integrati all'interno della struttura stessa della serra (segnatamente i profili utilizzati per il sostegno dei vetri che costituiscono pareti e colmo della serra stessa).

Con i conti energia emanati negli anni 2011 e 2012 (IV conto energia, Decreto 5 maggio 2011 e V conto energia, DECRETO 5 luglio 2012) sono stati introdotti definizioni ed elementi di supporto al fine di illustrare al meglio la materia inerente le serre fotovoltaiche. E' stata introdotta la definizione di "serra fotovoltaica" con la quale si intende una "struttura nella quale i moduli fotovoltaici costituiscono elementi costruttivi della copertura o delle pareti, adibite – per tutta la durata dell'erogazione della tariffa incentivante – a serre dedicate alla coltivazione agricola o alla

floricoltura. La struttura della serra, in metallo, legno o muratura, deve essere fissa, ancorata al terreno e con chiusura eventualmente stagionalmente rimovibile.

Al fine di permettere la corretta coltivazione di specie differenti all'interno delle serre fotovoltaiche garantendo condizioni di luminosità non limitanti, all'interno del IV Conto Energia viene inoltre specificato che relativamente agli “[...] impianti i cui moduli costituiscono elementi costruttivi di [...] serre [...]”, al fine di garantire la coltivazione sottostante, le serre a seguito dell'intervento devono presentare un rapporto tra la superficie totale dei moduli fotovoltaici installati sulla serra e la superficie totale esterna della serra stessa ad almeno il 50%”. Esiste inoltre l'obbligo di coltivazione delle specie pianificate all'interno della serra fotovoltaica per tutti i 20 anni di durata dell'incentivo.

Per tale tipo di impianti erano previste tariffe incentivanti pari alla media aritmetica fra la tariffa spettante per “impianti fotovoltaici realizzati su edifici” e la tariffa spettante per “altri impianti fotovoltaici” in base alle definizioni contenute all'interno del decreto.

Qualificazione della produzione e della cessione energia fotovoltaica come attività connessa all'agricoltura e generatrice di reddito agrario

La produzione e la cessione di energia fotovoltaica ai sensi della legge finanziaria 2006 (comma 423, articolo 1) è considerata *ex lege* come attività connessa all'attività agricola e, quindi, da sottoporre a tassazione su base catastale (Riferimenti: Circolare 13 Febbraio 2006, n. 6 e Circolare 6 Luglio 2009, n. 32/E).

I parametri previsti dalla legge sono:

1. la produzione di energia fotovoltaica derivante dai primi 200 KW di potenza nominale complessiva, viene considerata in ogni caso connessa all'attività agricola;
2. la produzione di energia fotovoltaica eccedente i primi 200 KW di potenza nominale complessiva, può essere considerata connessa all'attività agricola nel caso sussista uno dei seguenti requisiti:
 - i. la produzione di energia fotovoltaica derivi da impianti con integrazione architettonica o da impianti parzialmente integrati, come definiti dall'articolo 2 del D.M. 19 febbraio 2007, realizzati su strutture aziendali esistenti.
 - ii. il volume d'affari derivante dell'attività agricola (esclusa la produzione di energia fotovoltaica) deve essere superiore al volume d'affari della produzione di energia fotovoltaica eccedente i 200 KW. Detto volume deve essere calcolato senza tenere conto degli incentivi erogati per la produzione di energia fotovoltaica;
 - iii. entro il limite di 1 MW per azienda, per ogni 10 KW di potenza installata eccedente il limite dei 200 KW, l'imprenditore deve dimostrare di detenere almeno 1 ettaro di terreno utilizzato per l'attività agricola.

Il Decreto Legislativo di recepimento della direttiva 28/2009 in attuazione della direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009, ha definito gli strumenti, i meccanismi, gli incentivi e il quadro istituzionale, finanziario e giuridico, necessari per il

raggiungimento dell'obiettivo nazionale fino al 2020: utilizzare una quota pari al 17% di energia da fonti rinnovabili nel consumo finale lordo di energia.

Il decreto ha stabilito che l'accesso agli incentivi statali per gli impianti solari fotovoltaici con moduli collocati a terra in aree agricole fosse consentito solo per potenze nominali di impianto non superiore a 1 MW e per installazioni che non occupano più del 10% della superficie a disposizione del proponente.

Questa disposizione ha escluso gli impianti che hanno conseguito il titolo abilitativo entro la data di entrata in vigore di questo decreto o per i quali è stata presentata richiesta per il conseguimento del titolo entro il 1 gennaio 2011 (a condizione che l'impianto entrasse in esercizio entro 1 anno).

Il decreto ha previsto inoltre che il sistema di incentivazione degli impianti fotovoltaici fosse ridefinito a partire dal 1 giugno 2011, avviando nuove misure a supporto del settore florovivaistico valorizzando in tal modo impianti realizzati su serre, a condizione che queste consentissero l'effettiva produzione agricola al loro interno.

Questa norma è di grande importanza per la tutela del mondo agricolo in considerazione dell'elevato numero di autorizzazioni presentate nel corso del 2010.

Con tale provvedimento si è voluto favorire gli impianti di piccole dimensioni strettamente connessi con l'attività agricola che non pregiudicano l'utilizzo agricolo di elevate superfici, garantendo il mantenimento dell'originario utilizzo del suolo.

1.6 Coltura di riferimento per la sperimentazione: il basilico

1.6.1 Le origini

Il Basilico, *Ocimum basilicum* secondo la classificazione operata da Linneo, deriva il suo nome dai termini "Okimon" e "basilikos" che in greco antico significano "profumo, olezzo" e "regale, pertinente al re", in altri termini erba profumata degna di re.

Originario delle regioni tropicali dell'Asia e dell'Africa, poi diffuso in tutto il bacino del mediterraneo ed in quasi tutti i paese caldi o temperati del mondo, il Basilico, con altre quattro tra le oltre sessanta specie note del genere *Ocimum*, è anche utilizzato per la estrazione di essenze, ma la sua attuale notorietà è certamente più dovuta agli usi culinari di quanto non lo sia per le virtù terapeutiche che gli sono state attribuite dall'erboristeria e dalla medicina popolare, virtù molto più considerate in epoca antica, anche se non mancano ancora oggi impieghi del Basilico, fresco od essiccato, in tal senso. In tempi recenti ed ancor oggi, oli essenziali estratti dal Basilico vengono impiegati in profumeria, in particolare per imitare il delicato profumo della Reseda (*Reseda odorata*); in erboristeria il Basilico viene indicato, per lo più in forma di infuso, come antispasmodico, sedativo, stomachico, tonico; come valido rimedio per alcune forme di emicrania; per la tosse asinina dei bambini; contro le indigestioni e le nausea. In Giappone, in India, in Africa il Basilico viene impiegato per combattere il raffreddore e l'influenza, per calmare la febbre, le congestioni ed i dolori articolari. La medicina ayurvedica orientale ritiene che il Basilico abbia

proprietà antibatteriche e fungicide; studi condotti in India confermano positivi effetti del Basilico nella cura dell'acne.

Gli impieghi terapeutici del Basilico restano oggi certamente in secondo piano rispetto ad i suoi impieghi gastronomici, in molteplici preparazioni culinarie ed in particolare nella realizzazione del Pesto, prodotto tipico italiano, nato in Liguria ma ormai noto in tutto il mondo. La diffusione dell'uso culinario del Basilico fin da epoche remote ed in moltissimi paesi, in Francia fu introdotto da Caterina de Medici sposa di Enrico II nel 1533, è anche attestata dalla presenza di denominazioni comuni della pianta in quasi tutti i linguaggi del mondo: nell'annamita come nel cambogiano, nel cinese nell'arabo, nel giapponese come nel malese, nel russo nel sanscrito ecc.

Indietro nel tempo, l'uso culinario e non del Basilico nel bacino del Mediterraneo è confermato da autori greci e romani che ne hanno decantato virtù e proprietà; anche se taluno, fuori dal coro, come il filosofo greco Crisippo, duecento anni prima di Cristo, ha ricordato questa pianta per le sue proprietà nocive.

Usato fresco, il Basilico ha in cucina possibilità di impiego praticamente infinite, ma entra anche come ingrediente determinante in innumerevoli preparazioni gastronomiche, le più note delle quali sono la zuppa di legumi provenzale al Pistou e, naturalmente, il Pesto genovese. Così denominato dall'originario, ed ancor oggi sostenuto dai puristi, sistema di preparazione che richiede gli ingredienti siano "pestati" nel mortaio di marmo con apposito pestello di legno, di marmo o di vetro, il Pesto genovese rappresenta oggi molto di più di una bella e preziosa sopravvivenza di antiche tradizioni gastronomiche locali liguri; per soddisfare le richieste di mercati sempre più allargati, ancorché elitari, il Pesto genovese è diventato oggi un prodotto di non poca rilevanza economica e come tale deve essere considerato, con una giusta tutela dei produttori e consumatori nell'ambito delle specifiche normative vigenti per i prodotti di pregio, che devono le loro particolari caratteristiche all'area di produzione ed ai tradizionali metodi produttivi.

Ingrediente principale del Pesto genovese, il Basilico deve essere anch'esso ligure, perché solo le piante coltivate al di qua della dispiuviale padano-tirrenica presentano le caratteristiche organolettiche richieste; è noto a tutti che il Basilico coltivato in aree diverse dal versante tirrenico della Liguria esalta profumi e gusti anomali, come di menta.

1.6.2 Il basilico oggi

Oggi il Genere *Ocimum*, collettivamente chiamato "basilico", comprende al proprio interno, come si è detto, oltre 60 specie erbacee ed arbustive, diverse per forma, portamento, composizione degli oli essenziali e colore; anche la composizione degli oli dei semi costituisce un'altra caratteristica che arricchisce le diversità all'interno di questo genere. Tutti questi fattori, associati alla possibilità di avere in natura una ibridazione interspecifica e alla poliploidia, fenomeno comune all'interno del Genere, rendono particolarmente difficile classificare correttamente le specie e le popolazioni esistenti in natura. Le diversità morfologiche tra specie di basilico sono state, inoltre, accentuate da secoli di coltivazione in numerose aree del pianeta, ed hanno favorito la differenziazione di selezioni tra loro diverse nella pigmentazione, nella forma e nella dimensione

delle foglie, nonché nella presenza di pelosità. La tassonomia è ulteriormente complicata da razze che, pur non differenziandosi tra loro morfologicamente, presentano differenza a livello chimico. Tra le numerose specie esistenti, *Ocimum basilicum* (L.), comunemente noto come "basilico", o ancor più specificamente "basilico genovese", è la specie in assoluto più nota e usata. Tra le altre specie, quelle più coltivate, soprattutto per l'estrazione degli oli essenziali, sono le seguenti: *Ocimum canum* (Sims.), *Ocimum basilicum* var. *basilicum*, *Ocimum basilicum* var. *pilosum* (Willd.) Benth. in A. DC., *Ocimum gratissimum* (L.), *Ocimum gratissimum* var. *suave* (Willd.) Hook f., *Ocimum sanctum* (L.),

1.6.3 Le caratteristiche del basilico "genovese"

Conosciuto in Italia con il nome di basilico, appartiene alla famiglia delle Labiatae ed è una pianta annuale che raggiunge, nei nostri climi, una altezza di 20 - 40 cm e 30 cm di diametro. In ambienti più caldi, ad esempio in Africa e nel continente indiano, assume un portamento arbustivo e può raggiungere anche i 60 - 70 cm di altezza. Il fusto è eretto e ramificato, le foglie sono ovalilanceolate, intere, di colore verde cupo con picciolo di 0,5 - 1,5 cm.

I fiori sono bianchi, il calice è tubulato, la corolla è capovolta con tubo corto, bilabiata, con quattro stami giacenti sul labbro inferiore e sporgenti oltre questo, didinami, due più corti provvisti alla base di un piccolo dente ottuso, distinto. E' presente uno stilo. I frutti sono composti da quattro acheni (tetrachenio) ed i semi hanno forma ovoidale, a superficie papilliforme e a sezione trasversale triangolare; sono di colore nero ed il peso medio di 1000 semi è di 1,3 - 1,5 g. La radice è fittonante ed è caratterizzata da un abbondante capillizio.

Nell'ambito di *Ocimum basilicum*, largamente coltivato nel continente europeo, vi sono numerose cultivar e selezioni, spesso distinte per il diverso aroma o il diverso portamento e forma, sebbene alcune, che appaiono diverse dal punto di vista morfologico, possono presentare un aroma simile. Di seguito, in Tabella 1-24, si riportano le tipologie più diffuse.

<i>genovese, genovese gigante, a foglia larga, gigante, verde di Genova, ...</i>	basilico comunemente coltivato per la produzione di pesto; massa fogliare compatta, forma globulosa della pianta a completo sviluppo, foglie ovali, verdi lucenti, foglie bianchi, pannocchie fiorali lunghe
<i>dark opal, purple ruffle, violetto</i>	basilico a foglia violetta, massa fogliare compatta, forma globulosa della pianta a completo sviluppo, foglie e steli violetti, fiori lilla
<i>lemon scented, lemon, sweet dani</i>	basilico con aroma di limone
<i>cannella, cinnamon</i>	basilico con aroma di cannella
<i>Spicy, camphor, anise, licorice</i>	tipologie di basilico con aromi diversi
<i>basilico a foglie bollose, basilico napoletano</i>	vegetazione più ridotta delle precedenti, foglie ampie e bollose con lembi a volte accartocciati o pieghettati sul margine, spighe serrate a fioritura tardiva
<i>basilico fine verde, basilico greco</i>	vegetazione da ridotta, foglie piccole e lanceolate con lembi lisci.

Tabella 1-24: Principali cultivar e selezioni di *Ocimum basilicum*

Parlando di caratterizzazione varietale del basilico “genovese” propriamente detto, ci si riconduce alle complesse norme che ne regolano il mercato sementiero: La direttiva 70/458/CEE, che regola il settore, non contempla il basilico tra le specie elencate nel campo di applicazione. Di conseguenza, la specie *Ocimum basilicum* L., nome botanico del basilico, non è compresa nell’allegato 3 della legge 20 aprile 1976, n° 195, provvedimento legislativo nazionale che disciplina in particolare il settore delle sementi erbacee ortive ed i materiali di moltiplicazione da fiore e da orto, recependo le norme comunitarie in materia. Del basilico, si occupa il Regolamento di esecuzione della legge 25 novembre 1971, n°1096 che disciplina nel suo complesso l’attività sementiera, Il controllo e la certificazione non sono in questi casi previsti per legge, mentre sono stabiliti i requisiti minimi di germinabilità e purezza specifica ed il tenore massimo ammesso di semi di altre specie di piante. La rispondenza agli standard minimali deve essere attestata dal produttore, cioè dall’operatore che provvede al confezionamento del seme, e dichiarata sul cartellino che egli è tenuto ad applicare. Per il basilico, la legge prevede che le sementi debbano essere conformi alle seguenti norme:

Specie	Facoltà germinativa minima (% di semi puri)	Purezza minima specifica	Tenore massimo di semi di altre specie di piante (% in peso)
<i>Ocimum basilicum</i>	65	97	0,5

Tabella 1-25: Indicazioni circa il basilico della legge 25 novembre 1971, n°1096

Diverse Iniziative sono state intraprese dalla Regione Liguria con la collaborazione dell'ENSE e del Centro Regionale di Sperimentazione e Assistenza Agricola della Camera di Commercio di Savona.

L'Ente Nazionale delle Sementi Elette, ente pubblico non economico, è delegato alla certificazione dei materiali sementieri di specie agrarie con D.M. 17/2/1972 e di specie ortive con D.M. 2/11/1976, ha organizzato prove e studi varietali su diverse specie e tra questi ultimi si inquadra il progetto di caratterizzazione del basilico "genovese". Tra il 1997 e il 1998 sono stati effettuati diversi cicli di prova nelle serre del Centro Sperimentale di Albenga della Camera di Commercio di Savona. Nel 1998 è stato istituito un campo parcellare presso il Centro Agricolo Sperimentale dell'ENSE di Tavazzano (LO) ed i campioni di basilico rappresentati nella prova sono stati reperiti su tutto il territorio nazionale. Dei 146 campioni reperiti, ne sono stati seminati 85, di cui 36 sono risultati del tipo "genovese".

Grazie alle iniziative sopra descritte, si è arrivati all'emanazione del D.M. 25 agosto 1998 che ha formalizzato l'istituzione del catalogo varietale di *Ocimum basilicum*, su base volontaria, in attesa dell'adozione dei necessari provvedimenti a livello comunitario che lo renderanno obbligatorio. Successivamente, il D.M. 14-1-1999, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 10 marzo 1999 ha reso ufficiale anche l'elenco dei caratteri distintivi.

Le principali tipologie di basilico individuate sono genericamente ascrivibili ai gruppi conosciuti con le seguenti denominazioni: genovese, foglia di lattuga, fine, greco e violetto.

Nell'ambito della tipologia "genovese", sono state identificati alcuni caratteri che rendono possibile una distinzione. Si tratta di caratteristiche della pianta (altezza, portamento, densità del fogliame, lunghezza degli internodi), della foglia (lunghezza, intensità del colore, piano e portamento della lamina fogliare) e della precocità di fioritura (Tabella 1-26, Figura 1-11).

Carattere	Genovese Tipo 1	Genovese Tipo 2	Genovese Tipo locale	Genovese Gran Vert
Pianta: altezza	molto alta	alta	media	media
Pianta: portamento	espanso	cilindrico	espanso	espanso
Pianta: densità del fogliame	media	medio-bassa	medio-alta	medio-alta
Pianta: lunghezza internodi	lunghi	lunghi	medi	medi
Foglia: lunghezza lamina	media	media	medio-corta	media
Foglia: intensità del colore	scuro	chiaro	chiaro	medio
Foglia: piano della lamina	piatto	convesso	piatto	piatto
Foglia: portam. della lamina	orizzontale	prostrato	orizzontale	orizzontale
Classificazione inizio fioritura	precoce	precoce	molto prec.	molto prec.
Classificazione piena fioritura	precoce	precoce	molto prec.	molto prec.

Tabella 1-26: Principali caratteri che consentono distinzioni all'interno della tipologia "genovese"

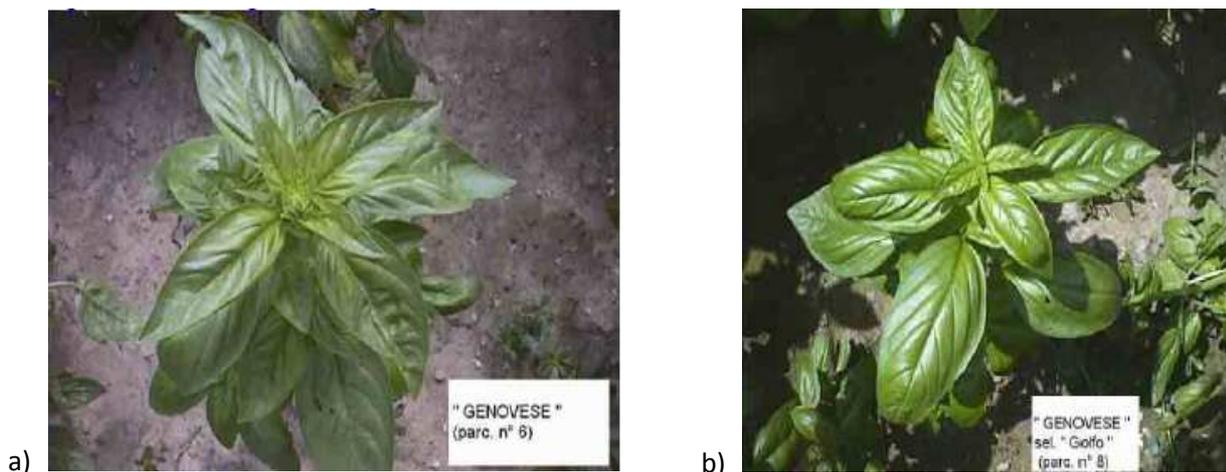


Figura 1-11: Basilico Genovese Tipo 1 (a) e Tipo 2 (b)

1.6.4 Dati statistici ed economici

Liguria e basilico rappresentano per chiunque un'associazione mentale immediata, ed in effetti in questa piccola Regione si concentra gran parte delle coltivazioni professionali, in particolare di quelle in coltura protetta, che rappresentano il 35-40% delle superfici totali nazionali.

Non sono stati raccolti dati aggiornati circa la produzione del basilico nel territorio ligure, ma una approfondita raccolta dati antecedenti il 2007 da parte della Regione Liguria fa evincere quanto segue. Un'indagine è stata svolta su 83 aziende distribuite sul territorio regionale; esse non rappresentano la totalità delle aziende produttrici di basilico, ma sono quelle che lo coltivano in maniera pressoché esclusiva. Dall'indagine effettuata sono sicuramente sfuggite le piccole realtà aziendali che commercializzano esclusivamente a livello locale. Per tale motivo si ritiene che i dati di superficie e di fatturato a basilico siano sottostimati del 30% circa. I numeri ottenuti sono i seguenti:

Province	Superficie coltivata in ambiente protetto	Superficie coltivata in pieno campo	Totale
Genova	32.770	4.600	37.370
Imperia	34.350	8.900	43.250
La Spezia	13.200	155.000	168.200
Savona	89.800	66.100	155.900
Liguria	170.120	234.600	404.720

Tabella 1-27: Superficie coltivata a basilico in Liguria (m²)

da cui si evince che la Provincia di Savona è la più attiva, in particolare nelle zone dell'albenganese, nell'andrese, e nel dianese.

L'indagine ha evidenziato che nel levante ligure, e specificamente nella provincia di Genova, sia molto più marcato il problema della vetustà degli apprestamenti protetti (spesso strutture in legno o ferro, sostenenti il materiale di copertura in plastica o più frequentemente in vetro, collocate direttamente su pendici terrazzate), mentre al contrario, nelle provincie di ponente, gli apprestamenti protetti sono più evoluti dal punto di vista strutturale e termodinamico e prevale uno stato di conservazione delle strutture buono od ottimo.

La superficie a basilico censita dall'indagine è di circa 40 ettari, di cui 23 in pien'aria e 17 in copertura, con una suddivisione provinciale tra superficie coperta e coltivazione in pien'aria seguente:

Provincia	sup. coperta	sup. in piena aria	tot.
Genova	32.770	4.600	37.370
Imperia	34.350	8.900	43.250
La Spezia	13.200	155.000	168.200
Savona	89.800	66.100	155.900
Liguria	170.120	234.600	404.720

Tabella 1-28: Superficie coltivata a basilico (m2)

La concentrazione del numero di addetti a tale coltivazione è marcata nella Provincia savonese, mentre dal confronto addetti/superfici impegnate si evince che nella Provincia di La Spezia il basso rapporto è dovuto ad una tipologia di coltivazione estensiva. Altra differenza marcata provinciale è la forma di commercializzazione: le aziende spezzine commercializzano il basilico prevalentemente allo stato sfuso, mentre la stragrande maggioranza delle aziende liguri commercializza il prodotto in mazzetti.

Il fatturato complessivo ligure per la commercializzazione di basilico risultante dall'indagine (considerando anche una stima delle aziende non censite, e riportato alla moneta attuale) era di circa 5 Milioni di euro.

Delle aziende censite, solo il 25% si dedica alla coltivazione del basilico durante tutto l'anno, la maggior parte delle aziende concentra l'attività tra fine primavera ed inizio autunno per le coltivazioni a pien'aria, o dall'autunno a fine primavera in ambiente protetto.

1.6.5 La coltivazione sotto il profilo energetico

In Liguria il basilico è coltivato sia in ambiente protetto, sia in pieno campo. Secondo l'indagine, la coltivazione in ambiente protetto, ovvero in serra riscaldata, o in serra fredda, o in tunnel, è quella che più profondamente segna il panorama agrario delle province di Imperia, Savona e Genova mentre la coltivazione in pieno campo è concentrata soprattutto in provincia di La Spezia e segnatamente nel sarzanese e nella lunigiana. Il prodotto risente di questa suddivisione, infatti il basilico coltivato in ambiente protetto è tenero, di colore chiaro, caratterizzato da foglie di piccole dimensioni e da fusti sottili, mentre quello allevato in pieno campo assume un colore più intenso, le foglie sono più aromatiche ed i fusti, parzialmente lignificati, sono più robusti.

La tecnica di coltivazione del basilico varia, pertanto, in funzione del tipo di utilizzazione del prodotto finale; in conseguenza di ciò, si distingue una tecnica adottata nelle produzioni per il consumo fresco e la trasformazione casalinga o artigianale, prevalentemente applicata in ambiente protetto, da quella per la trasformazione industriale, impiegata in pieno campo.

Basilico in coltura protetta

Partendo dalla Provincia di Genova, le strutture tipo che si trovano sono tradizionalmente in legno e vetro, di ampiezza modesta (200 - 400 m²), caratterizzate da un volume interno limitato e con impianto di riscaldamento fisso con caldaia e radiatori tubolari alettati che corrono attorno al perimetro della serra stessa. Tale tipologia non è del tutto razionale per la coltivazione del basilico in quanto le caratteristiche strutturali rendono gravose le operazioni colturali e la manutenzione, mentre la scarsa aerazione e l'accumulo di umidità determinano condizioni favorevoli per lo sviluppo di fitopatie. Negli anni si sono diffuse le serre tipo "large wide", ovvero a campata larga, caratterizzate soprattutto da una altezza alla gronda e al colmo più che raddoppiata, da più efficienti sistemi di ventilazione, e da una luminosità interna decisamente superiore con conseguenti vantaggi intermini di migliori condizioni di lavoro per gli operatori che possono facilmente avvalersi di mezzi meccanici e automatismi vari, minori oneri di manutenzione e possibilità di realizzare risparmi energetici.

L'impianto di riscaldamento è frequentemente costituito da generatori di aria calda alimentata a gasolio o a gas, posizionati sospesi alla struttura portante della serra. Questi generatori permettono una distribuzione uniforme dell'aria calda, che può essere ulteriormente migliorata collegando ai generatori maniche in polietilene forato che corrono nel senso della lunghezza della serra. Tali sistemi permettono, inoltre, un efficace rimescolamento degli strati d'aria favorendo la riduzione della condensazione dell'umidità ambientale sulle foglie durante la notte.

Lo stesso risultato può essere ottenuto con l'installazione di destratificatori d'aria i cui oneri di acquisto e di uso sono, tuttavia, ancora elevati. Tali sistemi, inoltre, se non vengono installati sulla base di un attento progetto, possono produrre danni alle colture a causa della forte turbolenza dell'aria e del conseguente inscurimento e indurimento delle foglie.

Particolarmente diffuso è l'impiego di teline mobili realizzate in cotone e alluminio collocate all'altezza della gronda interna, nate con fini di coibentazione. Durante il periodo invernale, e particolarmente nelle ore notturne, queste vengono distese da servocomandi o manualmente e, riducendo il volume della serra e gli scambi d'aria con l'esterno riducono la dispersione del calore. Tale sistema può, peraltro, essere impiegato nel periodo estivo per ridurre la luminosità interna delle strutture in fasi particolari del ciclo produttivo, quali, per esempio, la semina.

Nelle Province di Savona e Imperia, laddove la produzione è concentrata nelle zone di Albenga, Andora, Diano Marina e Diano San Pietro, si osservano generalmente strutture più evolute rispetto a quelle, tradizionali, riscontrabili in provincia di Genova.

Tra gli aspetti peculiari delle coltivazioni in serra, e mirate a migliorare le caratteristiche di coibenza degli apprestamenti protetti medesimi, e a ridurre i costi connessi con l'installazione di complessi impianti fissi o di serre in ferro e vetro, sono l'uso di maniche gonfiabili disposte a file parallele ad altezza della gronda che riducono il volume delle serre nelle ore notturne e l'uso di tunnel ricoperti con un film semplice o doppio. L'impiego delle maniche può portare a fenomeni di eziolamento, mentre l'uso di strutture (serre o tunnel) ricoperte con film plastici porta all'ottenimento di un prodotto più difficile da gestire sotto il profilo fitosanitario dovuto a

fenomeni di eccesso di umidità relativa ambientale, tipicamente occorrenti sotto questo tipo di copertura.

Durata del ciclo colturale e parametri chiave

La durata del ciclo colturale varia molto in funzione delle stagioni e delle condizioni climatiche che si possono creare all'interno degli apprestamenti protetti. Dalla semina alla prima raccolta possono trascorrere circa 30 giorni nel periodo estivo fino a oltre 60 – 90 giorni in inverno. I fattori limitanti la crescita sono essenzialmente la temperatura e la luce disponibile. La temperatura che i produttori di basilico liguri secondo l'indagine mantengono nel periodo invernale nelle loro serre varia da un minimo notturno di 16 - 18°C a 20 - 22°C durante il giorno. La tendenza che si riscontra sempre più frequentemente è quella di ridurre il più possibile lo sbalzo termico giorno/notte al fine di favorire il migliore accrescimento delle piante e ridurre il raffreddamento del substrato di coltivazione. Durante i periodi più caldi dell'anno, è frequente rilevare all'interno delle serre temperature diurne prossime o anche superiori a 30°C e temperature notturne di circa 24 – 26°C. In queste condizioni, ed in presenza di una elevata luminosità diurna, i cicli colturali sono brevi ed è possibile, con la pratica della trasemina, ottenere raccolti abbondanti e di ottima qualità.

Al fine di migliorare la luminosità degli ambienti di coltivazione della zona del genovese, che come si è detto sono molto bassi e caratterizzati da strutture in legno, alcuni agricoltori hanno proceduto all'imbiancatura di tutte le strutture interne (pali, profili portavetro, tubazioni, ...), così come, normalmente, fanno gli agricoltori olandesi. I risultati di tale operazione sono buoni e l'applicazione di questa tecnica si va diffondendo.

La raccolta

Questa fase richiede in genere molta manodopera, e viene, quindi, organizzata in modo tale da ottimizzare il rendimento delle ore lavorative. La raccolta del basilico avviene in modo scalare ed il primo raccolto può essere effettuato dopo circa 50 - 60 giorni dalla semina in inverno e dopo 30 giorni in estate. Gli apprestamenti protetti sono divisi in aree ("tavole di coltivazione" all'interno delle quali la raccolta è effettuata nello stesso giorno; tra di loro, quindi, le diverse aree di raccolta restano differenziate di un giorno. La semina viene organizzata in maniera tale da consentire la rotazione del personale addetto alla raccolta in modo che questo possa sempre trovare un prodotto pronto per la vendita all'interno di una serra. Quando tale serra, o nelle aziende più grandi, un gruppo di serre, ha esaurito il prodotto, sarà pronta per la prima raccolta un prima parte di una seconda serra o di un secondo gruppo di serre.

Questo sistema permette di ritornare nella stessa area di raccolta, all'interno di un medesimo apprestamento protetto, dopo circa 8/9 giorni in estate e 10/12 in inverno, e di rendere costante la richiesta di manodopera per la raccolta ed il confezionamento.

L'aspetto negativo di questo sistema è, per assurdo, l'assenza di tempi morti, che rende obbligatoria la continua esecuzione di cure colturali su tutta la superficie dedicata a basilico e rende estremamente complicato l'impiego di mezzi di difesa chimici. E', infatti, necessario impiegare prodotti, ammessi sulla coltura, il cui periodo di sicurezza non sia superiore a 7 - 10

giorni; per questo motivo, quando si rende necessario un intervento di difesa che prevede l'impiego di prodotti il cui periodo di sicurezza è superiore alla settimana, si preferisce interrompere la produzione in quella area della serra o, più ancora, in tutto l'ambiente di coltivazione. Quest'ultima procedura, largamente adottata dai basilicoltori è causa, tuttavia, di perdite di produzione, in quanto una parte del raccolto non viene immessa sul mercato.

Il prodotto ideale pronto per la commercializzazione è rappresentato dalla pianta intera (provvista di radici) che viene

Il confezionamento

Il basilico raccolto in serra come descritto subisce un laborioso processo di confezionamento. In una prima fase, nel momento della raccolta in campo, si procede all'estirpazione delle piantine che vengono riunite in grossi mazzi, umidificati frequentemente con acqua e posti in adeguati contenitori per il trasporto nei magazzini di lavorazione. Normalmente, in questo momento le piante deformate o colpite da parassiti sono lasciate sul terreno; questa pratica, tuttavia, sta scomparendo a favore dell'allontanamento delle piante infette onde evitare possibili diffusioni di parassiti animali o vegetali. Il rischio di diffusione di parassiti nella fase della raccolta è, tuttavia, elevato, a causa della notevole densità di coltivazione che rende difficile, se non impossibile, evitare il contatto con piante attaccate da parassiti fogliari quali per es. *Botrytis cinerea* o *Colletotrichum gloeosporioides*.

La seconda fase della raccolta avviene nel centro aziendale di confezionamento ed inizia con la selezione delle piantine che, riunite in mazzi o bouquet di dimensione variabile (10 - 12 piante per mazzo nella zona di Genova, 4-5 in quella di Albenga), vengono avvolte in carta alimentare. L'apparato radicale viene mantenuto fresco con l'aggiunta di materiali diversi, al fine di evitare il precoce appassimento delle foglie.

L'ultima tappa del processo prevede il confezionamento dei mazzi in buste di plastica alimentare trasparente e la successiva sistemazione in scatole di cartone, per la spedizione verso i mercati.

Tecniche di coltivazione fuori suolo

Un accenno particolare va fatto anche per le coltivazioni di basilico fuori suolo. In questo caso, le superfici investite sono estremamente ridotte e forniscono un prodotto apprezzato sul mercato e quantitativamente abbondante. Le aziende che applicano questo sistema di coltivazione adottano tecniche che differiscono dal modello di coltivazione fuori suolo in senso stretto, ovvero effettuato con l'impiego di bancali sopraelevati o di platee impermeabili, allevando le piante su lana di roccia o su altri materiali inerti. Tali aziende operano normalmente su bancale sopraelevato in conglomerato cementizio vibrato, colmato con substrati torbosi; in alternativa, le giovani piante sono coltivate in vasetti di diametro 14, 10 e 8 cm, anch'essi riempiti con il medesimo tipo di substrato. La coltivazione su bancale e su substrato inerte richiede notevoli capacità tecniche da parte del produttore, un'assistenza agronomica altamente specializzata e una attenzione particolare rivolta alla gestione della soluzione circolante utilizzata per la nutrizione delle piante.

1.6.6 Tecniche di coltivazione in relazione alle fitopatie: esempio di parassiti fungini

Dall'indagine citata è stato rilevato un elenco dei parassiti isolati da piante infette e ordinato in base all'importanza che ciascuno di essi riveste nella zona, come mostrato in Tabella 1-29.

Grado di importanza	Patogeno
1	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>basilici</i>
2	<i>Rhizoctonia solani</i>
3	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>
4	<i>Sclerotinia minor</i>
5	<i>Botrytis cinerea</i>
6	<i>Fusarium tabacinum</i>
7	<i>Pythium ultimum</i>

Tabella 1-29: Elenco dei parassiti osservati sul basilico in ordine di importanza

Parallelamente al lavoro di individuazione e riconoscimento dei principali parassiti fungini in grado di arrecare danno alla coltivazione del basilico, sono stati attentamente valutati i sistemi di coltivazione adottati dai coltivatori e, all'interno delle serre di coltivazione, i parametri ambientali principali (temperatura e umidità relativa), riscontrando importanti differenze tra le aree del levante e del ponente ligure.

Nelle zone del levante, come si è già detto, gli apprestamenti protetti sono, in maggioranza, molto semplici (serre del tipo "Riviera"), caratterizzati da strutture in legno o ferro sostenenti il materiale di copertura in plastica o, più frequentemente, in vetro supportato da una intelaiatura in legno ("vetrine"). Tali serre sono costruite direttamente sulle pendici terrazzate dei rilievi prospicienti il mare, senza grandi modificazioni della giacitura del suolo: questo tipo di sistemazione, combinata con l'elevata pendenza del terreno e con la forte insolazione durante tutta la giornata, comporta la delimitazione, all'interno delle serre, di un ridotto volume d'aria, di una ridotta circolazione della stessa e l'esposizione della coltura a repentini sbalzi di temperatura e ristagni di umidità. Tali fenomeni si manifestano soprattutto nelle ore notturne, quando si raggiunge facilmente la massima concentrazione di umidità nell'ambiente, aggravati dalle scarse possibilità di ventilazione offerte da questo tipo di serra. Il riscaldamento viene effettuato sia mediante l'impiego di termoventilatori, sia mediante sistemi a termosifone, mentre il riscaldamento del terreno, mediante tubazioni posizionate in profondità, è raramente applicato in tutte le zone di coltivazione prese in esame, a causa degli alti costi che tale pratica comporta e per il fatto che, tradizionalmente, i produttori sono soliti incorporare annualmente nel terreno elevati quantitativi di concimi organici.

L'elevata quantità di seme impiegato/m², mediamente pari a circa 10-15 g/m², ma spesso superiore a 30 g, nonché l'adozione della pratica della trasemina che avviene con la coltura in atto, dopo aver effettuato le prime 2-3 raccolte di piante pronte alla vendita, facilita l'instaurarsi ed il perdurare di un microclima particolarmente umido, ideale per molti parassiti fungini.

Nella zona del ponente, le strutture all'interno delle quali si alleva il basilico sono decisamente più evolute dal punto di vista strutturale e termodinamico, e pertanto i ricambi d'aria sono più elevati e frequenti. Esse sono costruite in ferro e vetro ed hanno una altezza al colmo mai inferiore a 4 m; i ricambi d'aria sono più elevati e frequenti, sia per la grande superficie apribile ai lati e al colmo delle serre, sia per una precisa volontà del produttore che, a differenza di quello della zona del levante, preferisce coltivare il basilico a temperature massime diurne più basse. Il riscaldamento dell'ambiente di coltivazione avviene prevalentemente ricorrendo all'impiego di termoventilatori attrezzati con maniche in film plastico che, correndo lungo l'asse maggiore della serra, operano una più uniforme distribuzione del calore, contribuendo a rimescolare gli strati d'aria all'interno della serra.

La luminosità all'interno di tali strutture è, quindi, decisamente più elevata rispetto a quella delle serre del levante e ciò comporta un aumento dei livelli termici ambientali disponibili che, almeno durante le ore del giorno, contribuiscono a ridurre la presenza di acqua di condensa sull'apparato fogliare delle piante, rallentando, così, lo sviluppo di patogeni quali *B. cinerea*. In base a quanto detto, appare in parte comprensibile l'elevata presenza di patogeni quali *Rhizoctonia solani* e *Colletotrichum gloeosporioides* riscontrata nel levante, rispetto alla situazione riscontrata nelle zone del ponente. Tali parassiti, infatti, sono favoriti dalle temperature e dall'umidità relativa elevata, dal forte sbalzo termico tra giorno e notte, dalle molte ore, sia notturne, sia diurne, durante le quali un velo d'acqua ricopre l'intera superficie delle piante, nonché dalla bassa luminosità delle strutture.

[1][2][4][5][6][7][9][10]

2 Il sistema serra ed i principali parametri bioclimatici e fisici che controllano la crescita della biomassa in ambiente protetto

2.1 Il Sistema Serra

Le serre sono strutture costruite per la coltivazione di fiori e piante, tipicamente con ampie superfici vetrate o di materiale plastico trasparente, che permettono di captare e trattenere il calore proveniente dal sole. Una serra quindi, non è solamente una protezione dal clima e dalle avversità atmosferiche per le piante in essa coltivate, ma anche un vero e proprio un collettore di energia solare, che contribuisce a ottimizzare gli apporti di luce e di calore.

Il cosiddetto “effetto serra” consiste nell’aumento della temperatura dell’aria all’interno della struttura ad opera delle radiazioni infrarosse medie e lunghe emesse dal terreno, dalla coltura e dai manufatti presenti nella serra a loro volta riscaldati dalla radiazione solare. Tale fenomeno è reso possibile dalle specifiche caratteristiche del materiale con cui viene realizzata la copertura della serra: trasparente alla componente infrarosso corto della radiazione solare e “opaco” alle radiazioni emesse dai corpi presenti all’interno della serra (Figura 2-1).

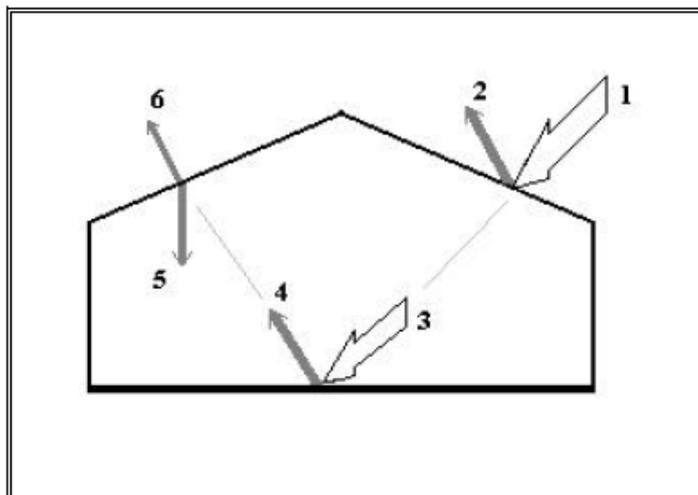


Figura 2-1: Schematizzazione dell’effetto serra. 1) radiazione solare incidente; 2) radiazione solare riflessa; 3) radiazione solare che ha attraversato il materiale di copertura; 4) radiazione emessa dal terreno e dagli altri corpi presenti all’interno della serra; 5) radiazione dispersa all’esterno della serra; 6) radiazione riflessa all’interno della serra

In questo senso, la capacità di utilizzare l’energia solare dipende innanzitutto dalle caratteristiche del luogo in cui è realizzata la struttura (orientamento, pendenza del terreno, altezza sul livello del mare, presenza di difese naturali) e dalle caratteristiche climatiche e microclimatiche (temperatura, ventosità, radiazione luminosa, ecc.). Tali aspetti devono essere considerati in

funzione delle esigenze delle colture che si desidera eseguire e di considerazioni di ordine economico legate alla redditività di queste. Per tali motivi, non esiste una serra “tipo” ma, in funzione delle caratteristiche dell’area in cui si opera, potrà essere individuata la soluzione più adatta a soddisfare le esigenze delle colture compatibilmente con le prospettive di ritorno economico dell’investimento.

Nel corso degli ultimi anni, i Paesi dell'area climatica del Mediterraneo sono diventati sempre più competitivi produttori di ortaggi in serra. In questo periodo c'è stata una rivoluzione nella tecnologia di produzione delle serra in termini di progettazione, il tipo e la qualità del materiale plastico di copertura, fertilizzanti, pacciamatura, l'uso di ibridi ad alto rendimento e cultivar, la formazione impianti e tecniche di potatura, la gestione dei parassiti integrata, l'uso di insetti impollinatori, controllo climatico, solarizzazione del terreno etc.

Le tecnologie di serricoltura odierne rendono possibile coltivare tutte le specie orticole in qualsiasi regione del mondo, purché la serra sia correttamente progettata e attrezzata per controllare i parametri climatici. Tuttavia, per una coltivazione redditizia e sostenibile della coltura scelta, è necessaria una scelta accurata del luogo di installazione, sulla base delle condizioni climatiche e alle caratteristiche della coltura orticola selezionato.

Alcuni tipi di coltivazioni hanno reso economicamente conveniente un condizionamento climatico della serra, legato sia alle caratteristiche ambientali sia alle specifiche condizioni di riscaldamento o raffrescamento richieste nella struttura. Il sistema serra è in questo caso molto complesso; il punto di partenza per comprenderne il funzionamento è comunque sempre l’analisi dei flussi di energia legati ai fattori naturali.

La radiazione solare è il parametro climatico principale necessario per valutare l'idoneità del clima di una regione per la coltivazione protetta. Lunghezza del giorno e la radiazione solare intercettata da una superficie orizzontale durante le ore diurne sono misurati per determinare radiazione solare totale giornaliera. Un altro parametro climatico fondamentale è la temperatura ambiente. La stabilità di entrambi i valori in diversi mesi dell'anno consente la rappresentazione dei loro valori medi mensili (ottenuto facendo la media di insieme di dati per diversi anni) per un dato luogo nel diagramma climatico, che rappresenta il clima della zona (Figura 2-2).

Altri parametri climatici, come la temperatura del suolo (strettamente legata alla temperatura dell'aria), vento, precipitazioni e composizione dell'aria (umidità e CO₂), l'influenzano in misura minore la valutazione della idoneità climatica per il tipo di coltura scelto. Il tipo di serra adottata dipende dalle caratteristiche climatiche della regione e dalle esigenze specifiche delle singole colture.

Estimation of climate suitability of Almería (Spain, 37°N) for cultivation of thermophilic vegetable species in greenhouses, from the monthly average values of ambient temperature and solar radiation

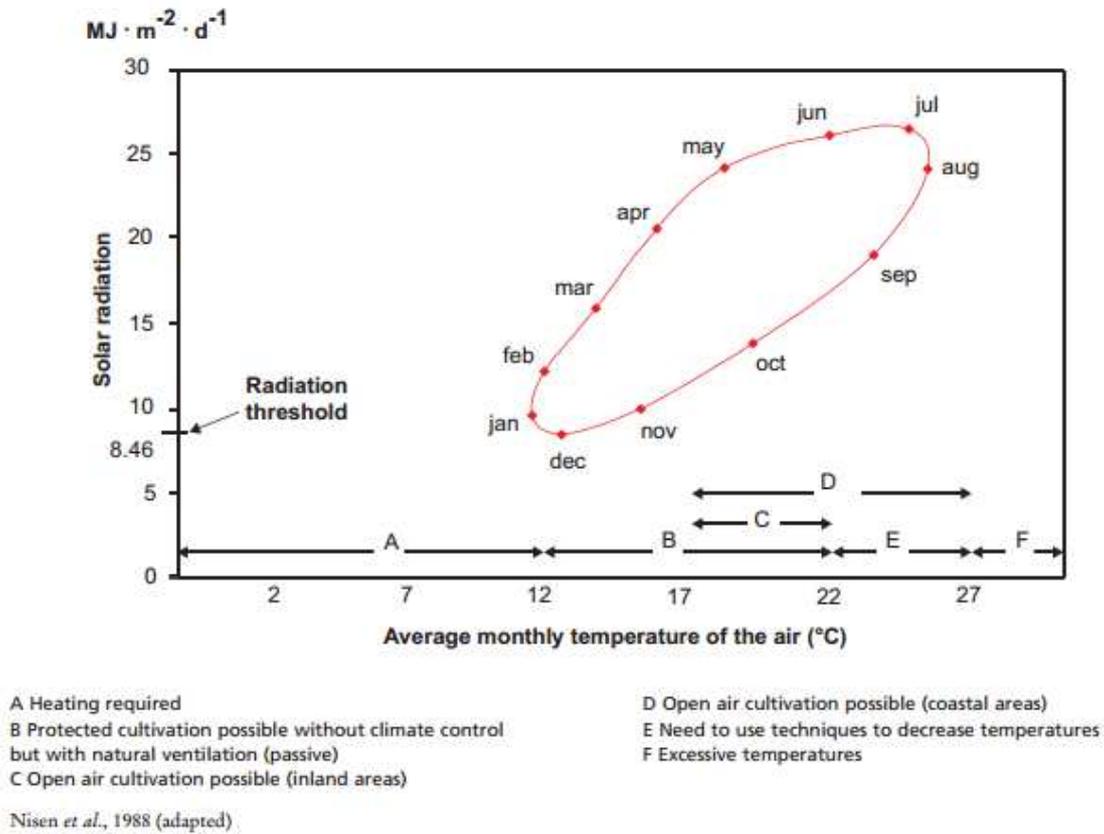


Figura 2-2: Stima di idoneità climatica per la coltivazione di specie vegetali termofile nelle serre (Spagna)

Di seguito verrà affrontata un'analisi dei parametri e processi legati al sistema serra sufficientemente esaustiva tale da fornire le conoscenze basilari della tematica oggetto di tale volume e per introdurre le grandezze fondamentali e relazioni di base utilizzati nelle attività di modellizzazione e simulazione dei capitoli successivi.

2.2 L'irraggiamento solare

Il principale fattore naturale che influenza il funzionamento del sistema serra è la radiazione solare.

Il Sole è fonte della maggior parte di energia sulla Terra ed è un fattore primario nella determinazione dell'ambiente termico di una località. È importante in ingegneria avere una conoscenza della relazione tra Terra e Sole, essere in grado di effettuare stime di intensità della radiazione solare, sapere come fare misure di radiazione solare, capire gli effetti termici della radiazione solare e sapere come utilizzarli e controllarli.

La Terra ruota sul proprio asse che va dal Polo Nord al Polo Sud, mentre orbita contemporaneamente intorno al Sole. La Terra impiega 23,934 ore per completare una rotazione sul proprio asse, e circa 365,24 giorni per completare un'orbita intorno al Sole. L'asse di rotazione

della Terra è inclinato rispetto al piano dell'eclittica in cui si trova l'orbita della Terra intorno al Sole. Questo significa che gli emisferi sono rivolti verso o nel verso opposto al Sole a seconda del periodo dell'anno, variando la quantità di luce che ricevono generando così le stagioni. L'orbita della Terra non è un cerchio perfetto, ma è piuttosto un'ellisse, come quello delle orbite di tutti gli altri pianeti. La Terra è più vicina al sole all'inizio di Gennaio e più lontana in Luglio, anche se questa variazione ha un effetto molto minore su riscaldamento e raffreddamento di quello causato dall'inclinazione dell'asse terrestre.

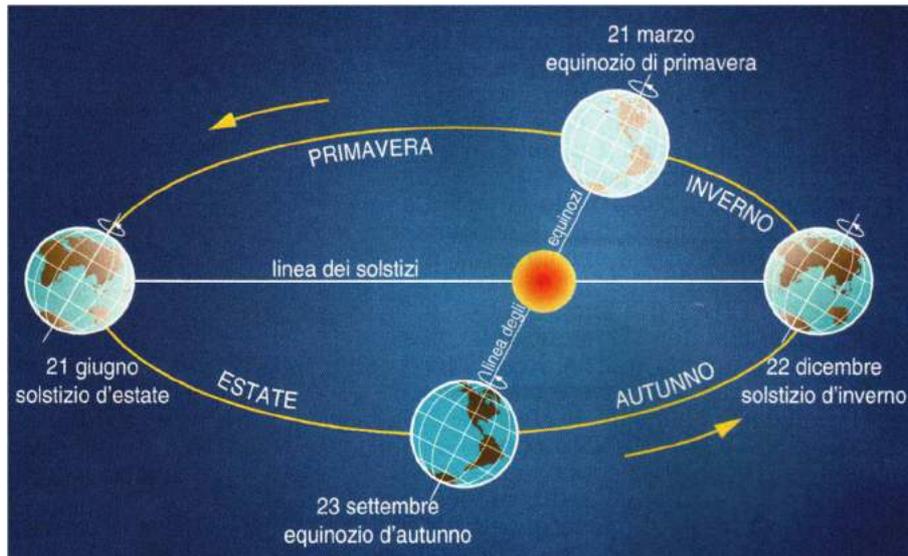


Figura 2-3: Movimento di rivoluzione terrestre

La Figura 2-3 mostra l'effetto dell'asse inclinato terrestre in diversi momenti dell'anno. La Figura 2-4 mostra la posizione della terra rispetto ai raggi del sole al momento del solstizio d'inverno.

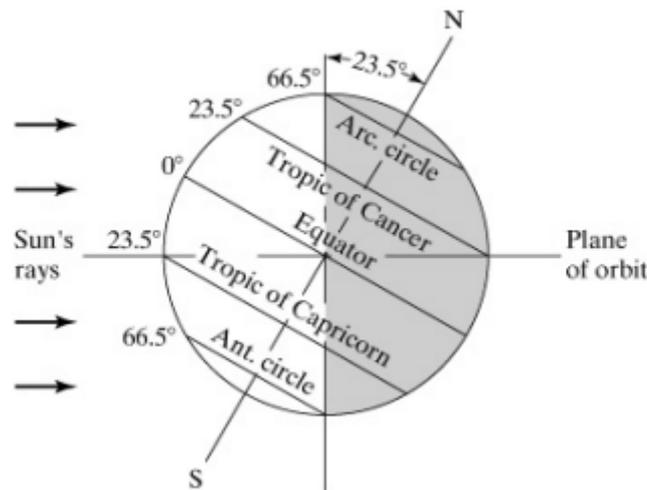


Figura 2-4: Solstizio di inverno

Al solstizio d'inverno (intorno al 22 dicembre), il Polo Nord è inclinato di 23,5 gradi di distanza dal sole. Tutti i punti sulla superficie terrestre a nord di 66,5 gradi di latitudine nord sono nel buio più

totale, mentre tutte le regioni entro 23,5 gradi del Polo Sud ricevono luce solare continua. Al momento del solstizio d'estate (circa 22 giugno), la situazione è invertita. Ai tempi dei due equinozi (circa 22 marzo e il 22 settembre), entrambi i poli sono equidistanti dal sole e tutti i punti sulla superficie terrestre sono 12 ore di luce e 12 ore di buio.

2.2.1 Angoli di riferimento del pianeta Terra in relazione al Sole

La posizione di un punto P sulla superficie terrestre rispetto ai raggi del Sole è noto ad ogni istante se la latitudine, l , e l'angolo orario, h , per il punto, e l'angolo di declinazione del sole, d , sono noti. La Figura 2-5 mostra questi angoli fondamentali.

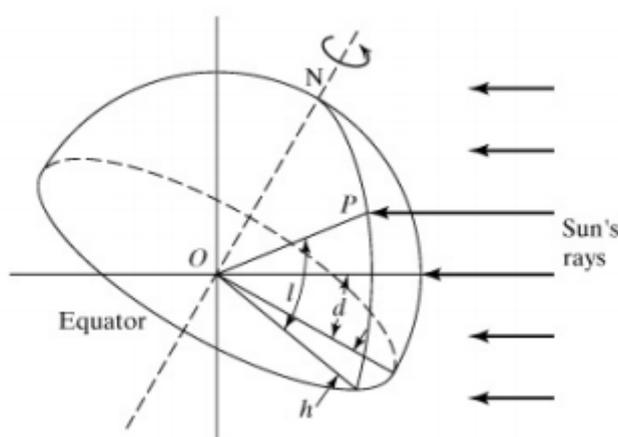


Figura 2-5: Latitudine, angolo orario, e angolo di declinazione solare

Il punto P rappresenta una posizione nell'emisfero settentrionale. La latitudine, l , è la distanza angolare del punto P nord (o sud) dell'equatore. È l'angolo tra la linea (\overline{OP}) e la proiezione (\overline{OP}) sul piano equatoriale. Il punto O rappresenta il centro della terra. Il calcolo dei vari angoli solari può essere semplificata con l'adozione di una convenzione di segni uniforme. Come parte di questo segno convenzione, latitudini nord sono positivi e le latitudini sud sono negativi.

L'angolo orario, h , è l'angolo misurato nel piano equatoriale della Terra fra la proiezione (\overline{OP}) e la proiezione di una linea dal centro del Sole al centro della Terra. A mezzogiorno solare, l'angolo orario è zero. L'angolo orario esprime l'ora del giorno rispetto a mezzogiorno solare. Un'ora di tempo è rappresentato da $360 \div 24 = 15$ gradi di angolo orario.

Sempre secondo la convenzione adottata, l'angolo orario è negativo prima di mezzogiorno solare e positivo dopo mezzogiorno solare.

$$h = (\text{ora solare} - 12) * 15$$

Angolo di declinazione solare, d , è l'angolo tra l'asse della Terra e un piano perpendicolare al piano dell'eclittica e perpendicolare alla al raggio terrestre in direzione del Sole. La declinazione è positiva quando i raggi del Sole sono a Nord dell'equatore e negativo quando sono a Sud

dell'equatore. Al momento del solstizio d'inverno, i raggi del Sole sono 23,5 gradi a Sud dell'equatore terrestre ($d = -23,5^\circ$). Al momento del solstizio d'estate, i raggi del sole sono 23,5 gradi a nord dell'equatore terrestre ($d = 23,5^\circ$). Agli equinozi, la declinazione del sole è pari a zero. L'angolo di declinazione durante tutto l'anno può essere ben approssimato dalla funzione di Cooper:

$$d = 23,45 * \sin\left(\frac{2\pi*(284+n)}{365}\right) \quad \text{dove } n \text{ è il giorno dell'anno.}$$

2.2.2 Angoli solari derivati

Oltre ai tre angoli di base (latitudine, angolo orario, e declinazione solare), molti altri angoli sono utili nei calcoli della radiazione solare. Tali angoli comprendono l'angolo zenitale del Sole θ_H , l'altitudine β , e l'azimut ϕ . Per un particolare orientamento superficiale possono anche essere definiti l'angolo di incidenza θ del Sole, e γ angolo azimutale superficie solare. Tutti questi angoli supplementari possono essere espressi in funzione dei tre angoli di base. La Figura 2-6 mostra schematicamente una traiettoria solare apparente e definisce lo zenith, l'altitudine e l'azimut.

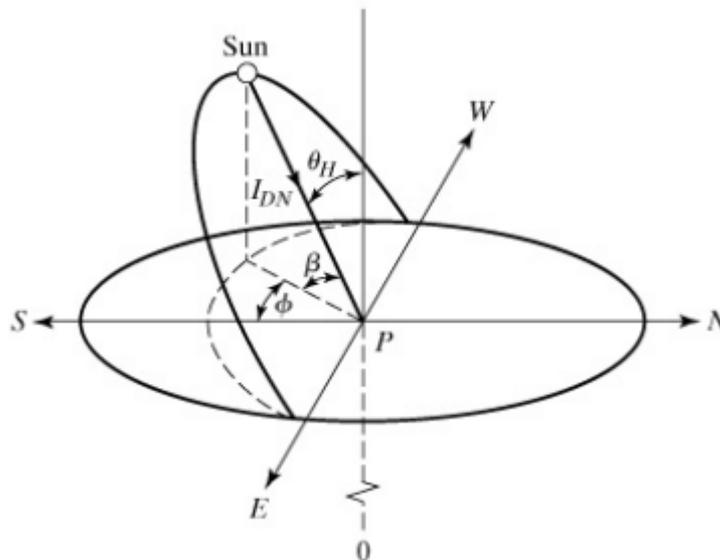


Figura 2-6: Definizione degli angoli di azimut, zenit e altitudine

Il punto P rappresenta la posizione dell'osservatore, punto O è il centro della Terra.

- L'angolo zenitale θ_H è l'angolo tra i raggi del Sole e la normale al piano, cioè una linea locale perpendicolare al piano orizzontale P.
- L'angolo β di altitudine solare è l'angolo in un piano verticale tra i raggi del Sole e la proiezione dei raggi del Sole sul piano orizzontale. Ne consegue che $\beta + \theta_H = \pi/2 = 90^\circ$.

- L'angolo azimutale ϕ è l'angolo sul piano orizzontale misurato tra la congiungente Sud e P e la proiezione orizzontale dei raggi del Sole.

Nei calcoli che coinvolgono superfici diverse da quella orizzontale, è conveniente esprimere la posizione del Sole rispetto alla superficie in termini di angolo di incidenza, θ . L'angolo di incidenza del Sole è l'angolo tra i raggi solari e la normale alla superficie. Per valutare l'angolo di incidenza è necessario specificare la direzione della normale alla superficie. Questo viene fatto in termini di angolo di inclinazione della superficie, Σ , e l'angolo di azimut superficiale, Ψ . Questi angoli sono definiti in Figura 2-7.

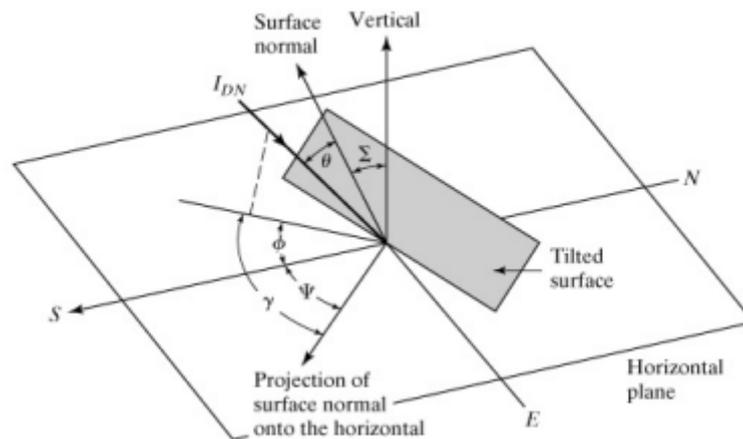


Figura 2-7: Definizione di angolo di azimuth superficiale, di tilt superficiale, e angolo di azimuth solare e superficie

- L'angolo di tilt della superficie è l'angolo tra la normale alla superficie e la verticale (normale al piano P).
- L'angolo di azimut superficiale è l'angolo tra il Sud e la proiezione orizzontale della normale alla superficie. La stessa convenzione di segno per l'angolo azimutale solare viene utilizzata per l'angolo di azimuth superficiale, cioè Ψ è negativo per una superficie affacciata a est del Sud e positiva per una superficie che si affaccia ad ovest del Sud. L'angolo di azimut per un piano orizzontale è indefinito.

2.2.3 Relazione tra ora solare e ora legale

I calcoli riguardanti la radiazione solare devono essere effettuati in termini di ora solare. Di seguito è brevemente descritto come convertire l'ora locale (legale) all'ora solare per i calcoli di ingegneria. Per descrivere la posizione del Sole in relazione al tempo locale è necessario conoscere il rapporto con il tempo solare. Infatti, l'ora locale è la stessa in ogni fuso orario, mentre la posizione del sole dipende dalla longitudine della posizione dell'osservatore.

$$\text{ora solare} = \text{ora locale} + \frac{Eq_t}{60} - \left(\frac{Long_{local} - Long_{sm}}{15} \right) - DLS [h]$$

Dove DSL è la correzione dell'ora legale spesso si applicano dal 1 aprile-30 ottobre (1 ora, DLS = 0, 1)), Longlocal è la longitudine del punto di osservazione, in gradi, e Longsm è la longitudine del meridiano standard del fuso orario locale.

Il tempo misurato dal moto giornaliero apparente del Sole è chiamato tempo solare. Sebbene un giorno civile sia di 24 ore esatte, un giorno solare è leggermente diverso a causa di irregolarità della rotazione della Terra, obliquità dell'orbita della Terra e di altri fattori. L'equazione del tempo in grado di correggere questo errore.

Un'espressione approssimativa della Equazione del Tempo è il seguente:

$$Eqt = -14,2 * \sin\left(\frac{\pi * (n + 7)}{111}\right) \text{ per i giorni dell'anno tra 1 e 106}$$

$$Eqt = 4,0 * \sin\left(\frac{\pi * (n - 106)}{59}\right) \text{ per i giorni dell'anno tra 107 e 166}$$

$$Eqt = -6,5 * \sin\left(\frac{\pi * (n - 166)}{80}\right) \text{ per i giorni dell'anno tra 167 e 246}$$

$$Eqt = 16,4 * \sin\left(\frac{\pi * (n - 247)}{113}\right) \text{ per i giorni dell'anno tra 247 e 365}$$

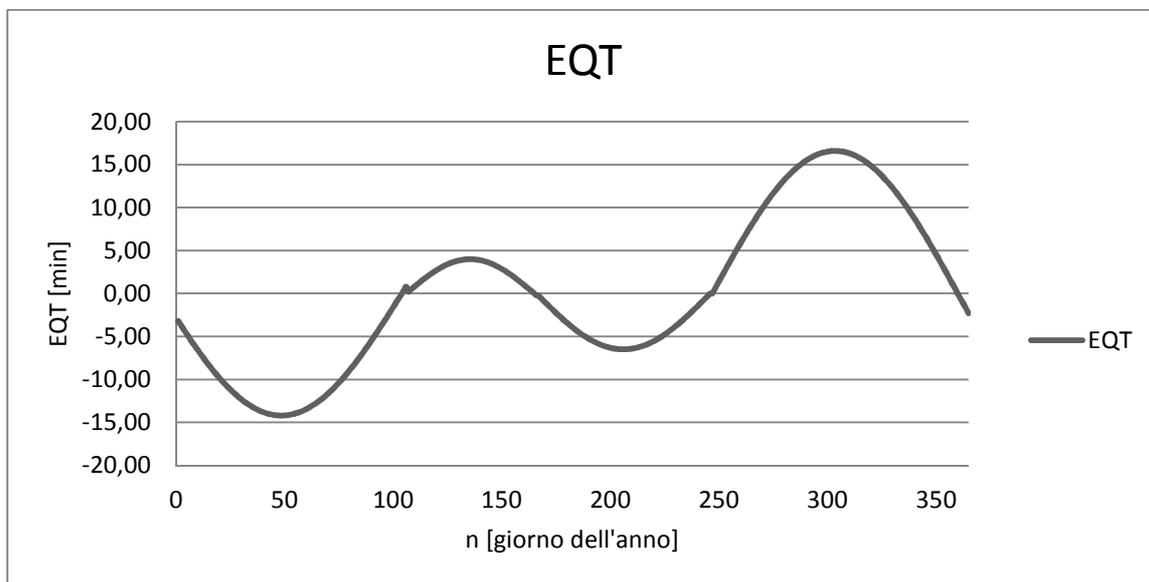


Figura 2-8: Equazione del tempo

L'equazione del tempo è il componente Est o Ovest dell'analemma, una curva che rappresenta l'offset angolare del Sole dalla sua posizione media sulla sfera celeste come visto dalla Terra. A causa della rivoluzione annuale della Terra intorno al Sole in un'orbita che è ellittica e inclinata rispetto al piano dell'equatore, un osservatore in un punto fisso sulla Terra vede il Sole muoversi in un analemma attorno a una posizione media, con durata di percorrenza pari ad un anno. La

posizione media sembra ruotare attorno alla Terra una volta ogni giorno solare medio, a causa della rotazione terrestre. Questa rivoluzione giornaliera non è considerata per ottenere la media. La posizione media del Sole è quindi nello stesso luogo nel cielo, allo stesso tempo ogni giorno, ma non in altri momenti. Pertanto, se la posizione osservata del Sole nel cielo viene tracciata o fotografata, allo stesso tempo ogni giorno, o solo alcuni giorni indicativi, per un anno, i punti tracciano un analemma.

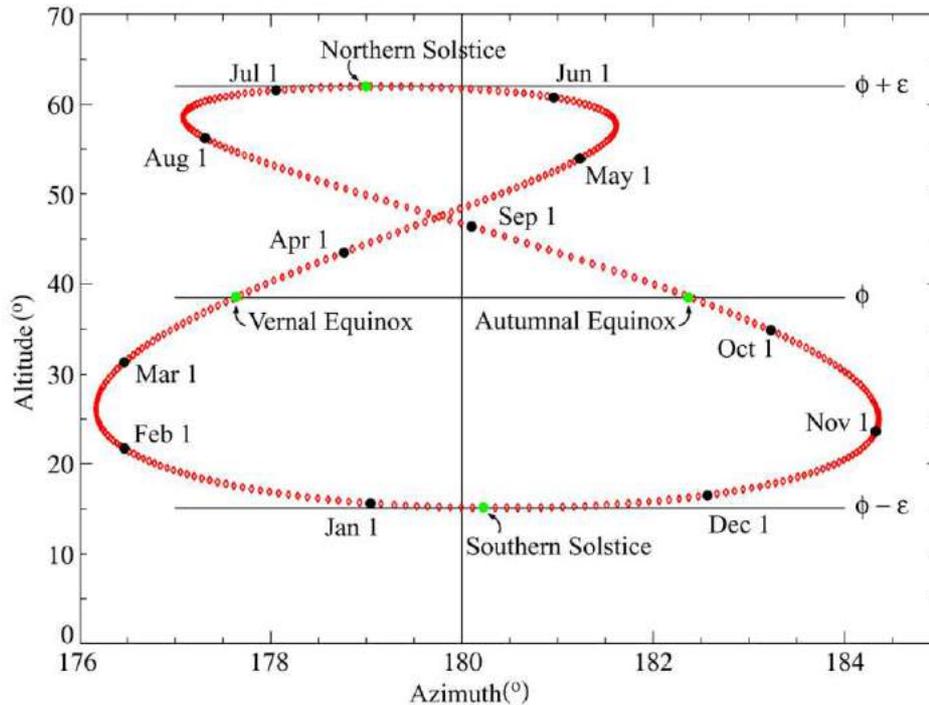


Figura 2-9: Analemma rilevato a mezzogiorno GMT dal Royal Observatory di Greenwich

2.2.4 Spettro solare e Costante Solare

Lo spettro di emissione continuo che un oggetto irradia è una rappresentazione della quantità di energia che emette a tutte le lunghezze d'onda. L'intero spettro elettromagnetico copre una vasta gamma di lunghezze d'onda, ripartita in regioni. Andando dalle lunghezze d'onda più brevi verso la più lunga, vi sono: raggi gamma, raggi X, radiazione ultravioletta, luce visibile, radiazione infrarossa, e onde radio.

La regione visibile occupa solo una piccola parte dell'intero spettro. Come mostra la Figura 2-10, la maggior parte dell'energia del nostro Sole è emessa negli intervalli del visibile, ultravioletto, ed infrarosso. Infatti, circa il 41% dell'energia emessa dal Sole è concentrata nella fascia di lunghezze d'onda tra 390 nm e 750 nm nel visibile. Dal momento che la temperatura della superficie del Sole è di circa 5.800 K, si può calcolare dalla legge dello spostamento di Wien che la massima quantità di energia viene emessa a circa 500 nm, proprio nel bel mezzo dello spettro visibile. Circa il 50% dell'energia emessa dal Sole risiede nelle infrarosso radio, con lunghezza d'onda superiore a 750 nm, e solo circa il 9% è nelle bande dell'ultravioletto, raggi X, e regioni di raggi γ , sotto i 390 nm.

<u>Comparazione delle regioni dello spettro</u>			
Nome	Lunghezza d'onda	Frequenza (Hz)	Energia fotonica(eV)
<u>Raggi gamma</u>	< 0.01 nm	> 30 EHz	124 keV – 300+ GeV
<u>Raggi X</u>	0.01 nm – 10 nm	30 EHz – 30 PHz	124 eV – 124 keV
<u>Ultravioletti</u>	10 nm – 380 nm	30 PHz – 790 THz	3.3 eV – 124 eV
<u>Visibile</u>	380 nm–700 nm	790 THz – 430 THz	1.7 eV – 3.3 eV
<u>Infrarosso</u>	700 nm – 1 mm	430 THz – 300 GHz	1.24 <u>meV</u> – 1.7 eV
<u>Microonde</u>	1 mm – 1 meter	300 GHz – 300 MHz	1.24 <u>µeV</u> – 1.24 meV
<u>Onde Radio</u>	1 mm – 100.000 km	<u>300 GHz</u> – <u>3 Hz</u>	12.4 <u>feV</u> – 1.24 meV

Tabella 2-1: Caratteristiche principali delle diverse regioni dello spettro emissivo continuo

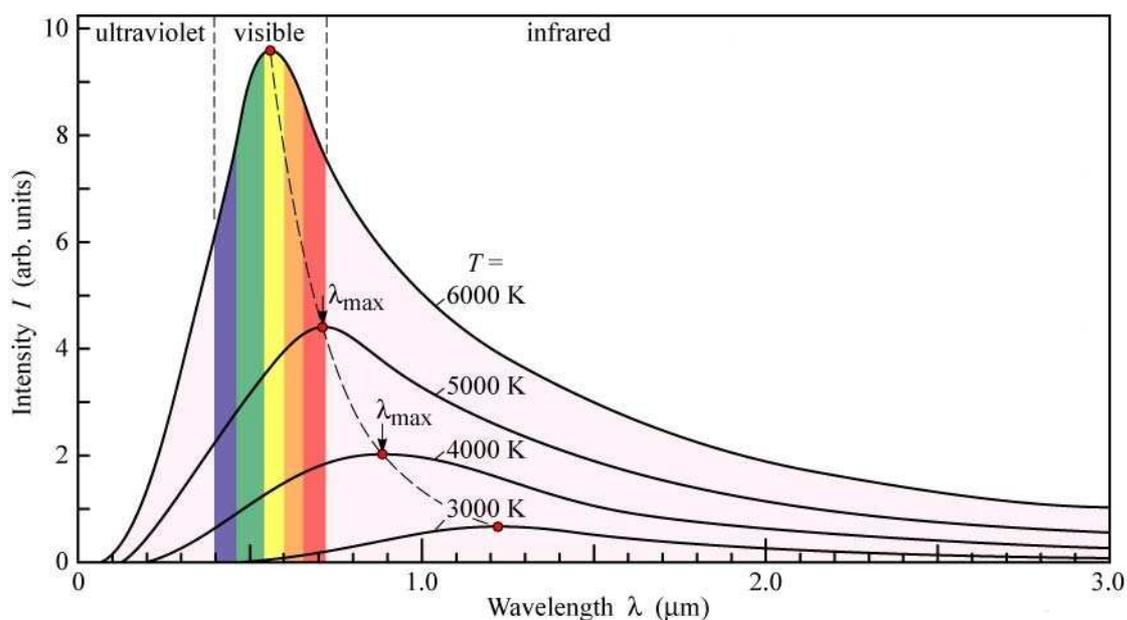


Figura 2-10: Spettro solare

La costante solare è la quantità di radiazione solare ricevuta fuori dell'atmosfera terrestre su una superficie normale alla radiazione incidente per unità di tempo e per unità di superficie alla distanza media della Terra dal Sole. La costante solare è un valore importante per gli studi di bilancio energetico globale e climatici. Misurazioni affidabili della costante solare possono essere effettuate solo dallo spazio ed un database di dati ricoprente più di 20 anni è stato ottenuto sulla base di osservazioni satellitari sovrapposte. L'analisi dei dati satellitari suggerisce una costante solare di 1.366 W/m² con una incertezza di misura di ± 3 W/m² dell'energia radiante emessa dal

Sole, dove circa il 50% si trova nella regione infrarossa ($> 0,7$ micron), circa il 40% nella regione del visibile ($0,4-0,7$ micron), e circa il 10% nella regione UV ($<0,4$ micron).

La costante solare non è infatti perfettamente costante, ma varia in relazione alle attività solari. Oltre la molto lenta evoluzione del Sole, una nota attività solare è quella relativa alle macchie solari, che sono regioni relativamente scure sulla superficie del Sole. La variazione periodica del numero di macchie solari è denominato ciclo solare, e dura circa 11 anni.

Il ciclo di macchie solari massima aventi la stessa polarità magnetica è indicato come il ciclo di 22 anni. Il Sole ruota anche sul suo asse una volta in circa 27 giorni. Osservazioni satellitari suggeriscono che la variazione della costante solare in relazione al ciclo solare della costante solare è dell'ordine di circa 0,1%, decisamente trascurabili in confronto alle variazioni dovute al nel clima troposferico. Tuttavia, alcune prove indirette indicano che variazioni della costante solare legati alla attività delle macchie solari potrebbe essere stato significativamente più grande nel corso degli ultimi secoli. Inoltre, la variabilità solare è molto più grande (in termini relativi) nella regione UV, e induce notevoli cambiamenti nella composizione chimica, la temperatura, e la circolazione della stratosfera, nonché nelle portate superiori dell'atmosfera superiore.

Ultravioletti(UV): è una radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda da 400 nm a 10 nm, inferiore a quella della luce visibile, ma maggiore a quella dei raggi X. Anche se di solito invisibile, in alcune condizioni bambini e giovani possono vedere la radiazione ultravioletta fino a lunghezze d'onda di circa 310 nm. Lo spettro elettromagnetico della radiazione ultravioletta, comprendente il range 10-400 nm, può essere ulteriormente suddiviso in un numero di intervalli così come consigliato dalla ISO-21348 ("Definitions of Solar Irradiance Spectral Categories" - Tabella 2-2).

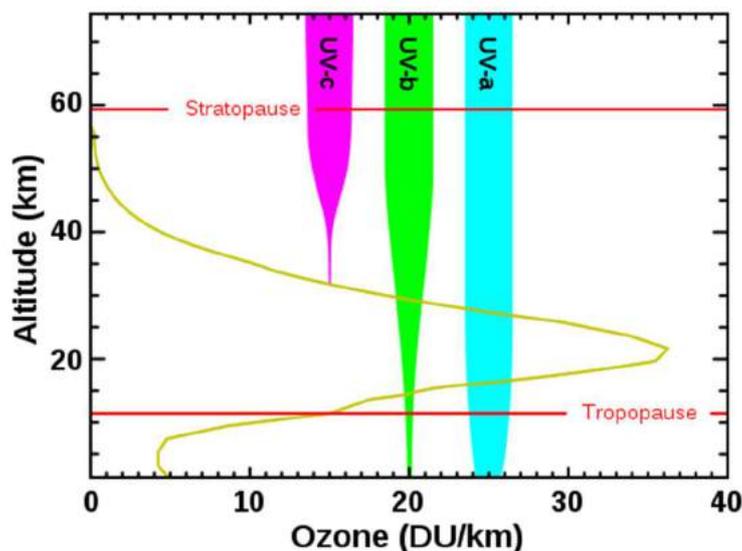


Figura 2-11: Assorbimento dei raggi UV da parte dell'atmosfera

I livelli di ozono a varie quote bloccano le diverse bande di radiazioni ultraviolette, ovvero tutti gli UVC sono bloccati dall'ossigeno biatomico (da 100-200 nm) o dall'ozono (ossigeno triatomico)

(200-280 nm) nell'atmosfera. Lo strato di ozono assorbe inoltre la maggior parte dei raggi UVB. Mentre invece i raggi UVA sono difficilmente influenzati dalla presenza di ozono e la maggior parte raggiunge il suolo. La quasi totalità dei raggi solari appartenenti alla categoria UV che penetra l'atmosfera terrestre UVA (costituente il 25% Solari che raggiungono il suolo terrestre) sono UVA (Figura 2-11).

Spectral category	Spectral sub-category	Wavelength range (nm)	Wavelength range (SI pre-fixes from Table 2)	Notes
Total Solar Irradiance				full-disk, 1 ua solar irradiance integrated across all wavelengths
Gamma-rays		$0.00001 \leq \lambda < 0.001$	$10 \text{ fm} \leq \lambda < 1 \text{ pm}$	
X-rays		$0.001 \leq \lambda < 0.1$	$1 \text{ pm} \leq \lambda < 0.10 \text{ nm}$	Hard X-rays
	XUV	$0.1 \leq \lambda < 10$	$0.10 \text{ nm} \leq \lambda < 10 \text{ nm}$	Soft X-rays
Ultraviolet	UV	$100 \leq \lambda < 400$	$100 \text{ nm} \leq \lambda < 400 \text{ nm}$	Ultraviolet
	VUV	$10 \leq \lambda < 200$	$10 \text{ nm} \leq \lambda < 200 \text{ nm}$	Vacuum Ultraviolet
	EUV	$10 \leq \lambda < 121$	$10 \text{ nm} \leq \lambda < 121 \text{ nm}$	Extreme Ultraviolet
	H Lyman- α	$121 \leq \lambda < 122$	$121 \text{ nm} \leq \lambda < 122 \text{ nm}$	Hydrogen Lyman-alpha
	FUV	$122 \leq \lambda < 200$	$122 \text{ nm} \leq \lambda < 200 \text{ nm}$	Far Ultraviolet
	UVC	$100 \leq \lambda < 280$	$100 \text{ nm} \leq \lambda < 280 \text{ nm}$	Ultraviolet C
	MUV	$200 \leq \lambda < 300$	$200 \text{ nm} \leq \lambda < 300 \text{ nm}$	Middle Ultraviolet
	UVB	$280 \leq \lambda < 315$	$280 \text{ nm} \leq \lambda < 315 \text{ nm}$	Ultraviolet B
	NUV	$300 \leq \lambda < 400$	$300 \text{ nm} \leq \lambda < 400 \text{ nm}$	Near Ultraviolet
	UVA	$315 \leq \lambda < 400$	$315 \text{ nm} \leq \lambda < 400 \text{ nm}$	Ultraviolet A
Visible	VIS	$380 \leq \lambda < 760$	$380 \text{ nm} \leq \lambda < 760 \text{ nm}$	optical
		$360 \leq \lambda < 450$	$360 \text{ nm} \leq \lambda < 450 \text{ nm}$	purple
		$450 \leq \lambda < 500$	$450 \text{ nm} \leq \lambda < 500 \text{ nm}$	blue
		$500 \leq \lambda < 570$	$500 \text{ nm} \leq \lambda < 570 \text{ nm}$	green
		$570 \leq \lambda < 591$	$570 \text{ nm} \leq \lambda < 591 \text{ nm}$	yellow
		$591 \leq \lambda < 610$	$591 \text{ nm} \leq \lambda < 610 \text{ nm}$	orange
		$610 \leq \lambda < 760$	$610 \text{ nm} \leq \lambda < 760 \text{ nm}$	red
Infrared	IR	$760 \leq \lambda < 1\,000\,000$	$760 \text{ nm} \leq \lambda < 1.00 \text{ mm}$	
	IR-A	$760 \leq \lambda < 1400$	$760 \text{ nm} \leq \lambda < 140 \text{ mm}$	Near Infrared
	IR-B	$1400 \leq \lambda < 3000$	$140 \text{ mm} \leq \lambda < 3.00 \text{ mm}$	Middle Infrared
	IR-C	$3000 \leq \lambda < 1\,000\,000$	$3.00 \text{ mm} \leq \lambda < 1.00 \text{ mm}$	Far infrared
Microwave		$1\,000\,000 \leq \lambda < 15\,000\,000$	$1.00 \text{ mm} \leq \lambda < 15.00 \text{ mm}$	
	W	$3.00 \times 10^8 \leq \lambda < 5.35 \times 10^8$	$3.00 \text{ mm} \leq \lambda < 5.35 \text{ mm}$	$(100.0 \geq \nu > 56.0) \text{ GHz}$
	V	$5.35 \times 10^8 \leq \lambda < 6.52 \times 10^8$	$5.35 \text{ mm} \leq \lambda < 6.52 \text{ mm}$	$(56.0 \geq \nu > 46.0) \text{ GHz}$
	Q	$6.52 \times 10^8 \leq \lambda < 8.33 \times 10^8$	$6.52 \text{ mm} \leq \lambda < 8.33 \text{ mm}$	$(46.0 \geq \nu > 36.0) \text{ GHz}$
	K	$8.33 \times 10^8 \leq \lambda < 2.75 \times 10^7$	$8.33 \text{ mm} \leq \lambda < 27.5 \text{ mm}$	$(36.0 \geq \nu > 10.90) \text{ GHz}$
	X	$2.75 \times 10^7 \leq \lambda < 5.77 \times 10^7$	$27.50 \text{ mm} \leq \lambda < 57.70 \text{ mm}$	$(10.90 \geq \nu > 5.20) \text{ GHz}$
	C	$4.84 \times 10^7 \leq \lambda < 7.69 \times 10^7$	$48.40 \text{ mm} \leq \lambda < 76.90 \text{ mm}$	$(6.20 \geq \nu > 3.90) \text{ GHz}$
	S	$5.77 \times 10^7 \leq \lambda < 1.93 \times 10^8$	$57.70 \text{ mm} \leq \lambda < 193.00 \text{ mm}$	$(5.20 \geq \nu > 1.55) \text{ GHz}$
	L	$1.93 \times 10^8 \leq \lambda < 7.69 \times 10^8$	$193.00 \text{ mm} \leq \lambda < 769.00 \text{ mm}$	$(1.550 \geq \nu > 0.390) \text{ GHz}$
P	$7.69 \times 10^8 \leq \lambda < 1.33 \times 10^9$	$769.00 \text{ mm} \leq \lambda < 1.33 \text{ m}$	$(0.390 \geq \nu > 0.225) \text{ GHz}$	
Radio		$100\,000 \leq \lambda < 100\,000\,000\,000$	$0.10 \text{ mm} \leq \lambda < 100 \text{ m}$	measurements: $(1\,000\,000 \leq \lambda < 10\,000\,000\,000) \text{ nm}$
	EHF	$1.00 \times 10^8 \leq \lambda < 1.00 \times 10^7$	$1.00 \text{ mm} \leq \lambda < 10.00 \text{ mm}$	Extremely High Frequency ($300 \geq \nu > 30$) GHz
	SHF	$1.00 \times 10^7 \leq \lambda < 1.00 \times 10^8$	$10.00 \text{ mm} \leq \lambda < 100.00 \text{ mm}$	Super-High Frequency ($30 \geq \nu > 3$) GHz
	UHF	$1.00 \times 10^8 \leq \lambda < 1.00 \times 10^9$	$100.00 \text{ mm} \leq \lambda < 1.00 \text{ m}$	Ultra-High Frequency ($3000 \geq \nu > 300$) MHz
	VHF	$1.00 \times 10^9 \leq \lambda < 1.00 \times 10^{10}$	$1.00 \text{ m} \leq \lambda < 10.00 \text{ m}$	Very-High Frequency ($300 \geq \nu > 30$) MHz
	HF	$1.00 \times 10^{10} \leq \lambda < 1.00 \times 10^{11}$	$10.00 \text{ m} \leq \lambda < 100.00 \text{ m}$	High Frequency ($30 \geq \nu > 3$) MHz

Tabella 2-2: Definizioni delle categorie spettrali di irraggiamento solare secondo la Norma ISO 21348

Con il termine “luce” solitamente ci si riferisce alla luce nello **spettro del visibile**, che è una radiazione elettromagnetica visibile all'occhio umano e legata al senso della vista. La luce visibile

viene solitamente definita come avente lunghezza d'onda nell'intervallo da 400 (nm) a 700 nm, tra l'infrarosso e l'ultravioletto.

I raggi infrarossi (IR) è energia radiante invisibile, una radiazione elettromagnetica con lunghezze d'onda maggiori di quelle della luce visibile, si estende dal bordo rosso nominale dello spettro visibile a 700 nm a 1 mm. La maggior parte della radiazione termica emessa da oggetti ad una temperatura prossima a quella ambiente fa parte dello spettro dell'infrarosso.

2.2.5 Distribuzione della radiazione solare all'esterno dell'atmosfera

La radiazione solare è la quantità effettiva di irraggiamento solare incidente su una superficie orizzontale unitaria per un periodo di tempo specificato per una data località. Essa dipende fortemente dall'angolo zenitale θ_H e anche dal rapporto (d / dm) tra le distanze effettiva e media della Terra dal Sole.

La radiazione solare all'esterno dell'atmosfera può essere così espressa:

$$G_o = 1366 * \left(\frac{d}{dm}\right)^2 \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Un'equazione approssimativa per definire il rapporto d / dm è la seguente:

$$\left(\frac{d}{dm}\right)^2 = 1,00011 + 0,034221 * \cos(b) + 0,001280 * \sin(b) + 0,000719 * \cos(2b) + 0,00077 * \sin(2b)$$

dove:

$$b = \frac{2\pi n}{365} [rad], \quad n = \text{numero dei giorni dell'anno}$$

L'irradianza solare sulla superficie orizzontale può essere espressa come segue:

$$G_{o,H} = 1366 * \left(\frac{d}{dm}\right)^2 * \cos \theta_H \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

L'angolo zenitale solare dipende dalla latitudine, giorno dell'anno, e ora del giorno, ed è dato da:

$$\cos \theta_H = \sin l * \sin d + \cos l * \cos d * \cosh$$

dove l è la latitudine, d la declinazione solare, e h l'angolo orario. L'angolo orario è pari a zero a mezzogiorno solare e aumenta di 15 ° per ogni ora. L'angolo zenitale solare è di 90 ° al tramonto e all'alba.

L'irraggiamento solare inoltre per un determinato periodo di tempo tra t_1 e t_2 è dato da:

$$\begin{aligned} (E_{o,H})_{day} &= \int_{t_2}^{t_1} G_o * f(n) * \cos \theta_H dt \\ &= 1366 * 3600 * \frac{24}{\pi} \left[1 + 0,033 * \cos \left(\frac{360 * n}{365} \right) \right] \\ &\quad * [\sin l * \sin d + \cos l * \cos d * \cosh] \left[J/m^2 day \right] \end{aligned}$$

La radiazione solare entra nell'atmosfera terrestre è assorbita e diffusa dai gas atmosferici, aerosol, nuvole e la superficie della Terra. La radiazione assorbita diviene componente nel bilancio di calore, mentre la radiazione diffusa è parte restituita allo spazio ed in parte continua il suo percorso attraverso il sistema Terra-atmosfera dove è sottoposta a ulteriori diffusioni ed assorbimenti. La frazione della radiazione solare incidente che viene riflessa e diffusa verso lo spazio è chiamato albedo.

2.2.6 Unità di misura base in fotometria e radiometria

Le proprietà fisiche della radiazione elettromagnetica sono caratterizzati da unità radiometriche. Utilizzando unità radiometriche, siamo in grado di caratterizzare la luce in termini di quantità fisiche; per esempio, il numero di fotoni, energia fotonica, e flusso radiante. Tuttavia, le unità radiometriche sono irrilevanti quando si tratta di percezione della luce da parte di un essere umano. Ad esempio, la radiazione infrarossa non provoca alcuna sensazione luminosa nell'occhio. Per caratterizzare la luce e la percezione del colore dell'occhio umano, sono necessari diversi tipi di unità. Queste unità sono chiamate unità fotometriche.

L'**intensità luminosa**, che è una quantità fotometrica, rappresenta l'intensità luminosa di una sorgente ottica, come percepito dall'occhio umano. L'intensità luminosa è misurata in candela (cd), che è una unità di base del Sistema Internazionale (SI).

La definizione di intensità luminosa è la seguente: una sorgente di luce monocromatica che emette una potenza ottica (flusso radiante) di (1/683) Watt a 555 nm nell'angolo solido di 1 steradiano (sr) ha una intensità luminosa di 1 candela (cd).

Il **flusso luminoso F_L** , che è anche la grandezza fotometrica, rappresenta la potenza luminosa di una fonte come percepita dall'occhio umano. L'unità di flusso luminoso è il lumen (lm). Esso è definito come segue: una sorgente di luce monocromatica che emette una potenza ottica di (1/683) watt a 555 nm ha un flusso luminoso di 1 lumen (lm). Il lumen è un'unità SI.

Un confronto tra le definizioni di candela e lumen rivela che 1 candela equivalente a 1 lumen per steradiano o $cd = lm / sr$. Così, una sorgente luminosa che emette isotropicamente con intensità luminosa di 1 cd ha un flusso luminoso di $4\pi lm = 12,57 lm$.

Importante è il rapporto tra l'irradianza spettrale $J_\lambda [W/nm]$ (la potenza irradiata per unità di lunghezza d'onda) ed il flusso luminoso. Introducendo funzione di efficienza luminosa fotonica

spettrale relativa V_λ (Standard CIE 1931, Figura 2-12), che è legato alla sensibilità dell'occhio a lunghezze d'onda, il flusso luminoso è dato dalla seguente espressione:

$$F_L = 683.002 \text{ lm/W} * \int_0^\infty \bar{y}(V_\lambda) J(V_\lambda) dV_\lambda$$

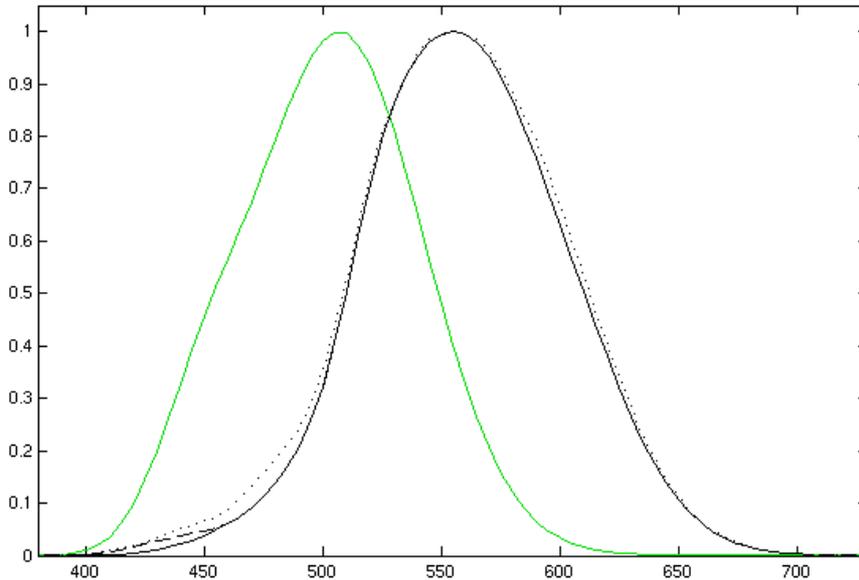


Figura 2-12: funzione di efficienza luminosa spettrale relativa fotopica (nero) e scotopica (verde). Per visione fotopica si intende la visione dell'occhio, in condizioni ben illuminate. Con visione scotopica invece si intende la visione dell'occhio in condizioni di scarsa illuminazione.

L'emetenza luminosa o "luminosità" (E) è il flusso luminoso per unità di superficie emettente.

$$E = \frac{d\Phi_L}{dA} [lux]$$

L'emetenza luminosa è misurata in lux ($lux = lm/m^2$). Si tratta di una unità del SI utilizzata nella caratterizzazione di condizioni di illuminamento. La Tabella 2-3 riporta i valori tipici di emetenza luminosa in ambienti differenti.

<i>Condizione ambientale</i>	<i>Illuminamento medio</i>
Luce solare diretta	50.000 lux
Luce del giorno indiretta con cielo sereno	10.000 – 20.000 lux
Luce del giorno indiretta con cielo coperto	1.000 – 5.000 lux
Interno ufficio	200-500 lux
Illuminazione corridoi	50 – 100 lux
Tramonto (inizio)	10 lux
Tramonto (fine)	1 lux
Notte di luna piena	0,3 lux
Notte con quarto di luna	0,1 lux
Notte senza lune e cielo stellato	0,001 lux
Notte senza luna e cielo coperto	0.0001 lux

Tabella 2-3: Valori tipici di emetenza luminosa

Rapporto tra intensità luminosa emessa da una superficie in una data direzione La luminanza di una sorgente di superficie (cioè una sorgente quale un display o un LED) è il rapporto tra l'intensità luminosa emessa in una certa direzione (misurato in cd) e l'area della superficie apparente (misurata in m²). La luminanza è misurata in unità di cd / m².

Ci sono diverse unità che vengono utilizzate per caratterizzare la luminanza di una sorgente. I nomi di queste unità non del SI sono riportate nella Tabella 2-4.

Unit	Common name	Unit	Common name
1 cd/cm ²	1 stilb	(1/π) cd/m ²	1 apostilb
(1/π) cd/cm ²	1 lambert	(1/π) cd/ft ²	1 foot-lambert
1 cd/m ²	1 nit		

Tabella 2-4: Conversione tra unità di misura della luminanza

Photometric unit	Dimension	Radiometric unit	Dimension
Luminous flux	lm	Radiant flux (optical power)	W
Luminous intensity	lm / sr = cd	Radiant intensity	W / sr
Illuminance	lm / m ² = lux	Irradiance (power density)	W / m ²
Luminance	lm / (sr m ²) = cd / m ²	Radiance	W / (sr m ²)

Tabella 2-5: Corrispondenza tra grandezze fotometriche e radiometriche

La corrispondenza tra le grandezze ed unità di misura fotometriche e radiometriche è riportata in Tabella 2-5.

2.3 Il processo di fotosintesi

La fotosintesi avviene in molti tipi di batteri e alghe, e nelle foglie (ed a volte negli steli) delle piante verdi. La Figura 2-13 descrive i livelli di organizzazione in una foglia della pianta. Le cellule delle foglie vegetali contengono organelli chiamati cloroplasti che in realtà svolgono il processo fotosintetico. Nessun altra struttura in una cellula vegetale è in grado di svolgere la fotosintesi.

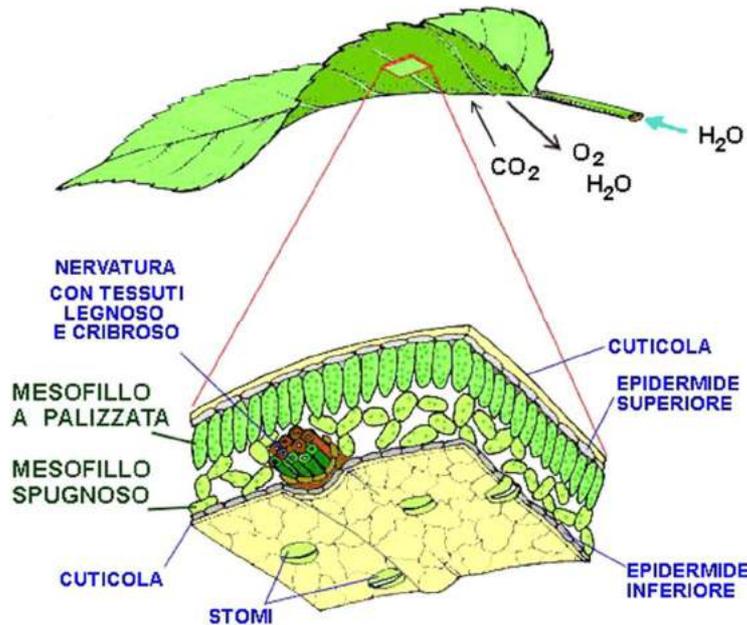


Figura 2-13: La foglia di una pianta possiede uno spesso strato di cellule (mesofillo) ricche di cloroplasti. I tilacoidi di forma piatta nel cloroplasto sono impilati in colonne denominate grana (singolare, Granum). Le reazioni di luce si svolgono sul tilacoide

2.3.1 Fotosintesi clorofilliana (fase luminosa)

La fotosintesi clorofilliana è il meccanismo biochimico degli organismi autotrofi che trasforma l'energia luminosa in energia chimica, queste reazioni avvengono in corrispondenza dei tilacoidi (introflessioni della membrana dei cloroplasti) che si organizzano in grana all'interno del cloroplasto (Figura 2-14). Nei tilacoidi la clorofilla e le altre molecole sono ammassate in unità dette fotosistemi; ogni unità contiene dalle 250 alle 400 molecole di pigmento che funzionano come antenne per catturare la luce. L'energia luminosa, quando è assorbita da uno dei pigmenti antenna, passa saltando da un pigmento all'altro del fotosistema, fino a raggiungere la clorofilla a che è considerato il centro di reazione del fotosistema.

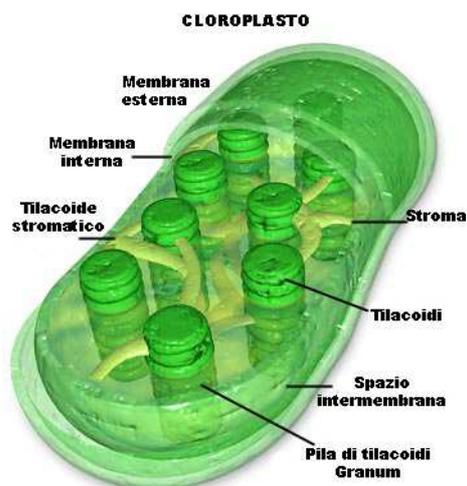


Figura 2-14: Schematizzazione di un cloroplasto e sui componenti

Le conoscenze attuali indicano che nelle cellule vegetali ci sono due tipi di fotosistemi; osserviamo ora la Figura 2-15 incominciando dal fotosistema II in quanto agisce utilizzando elettroni posti a un livello energetico inferiore che provengono dalla fotolisi dell'acqua.

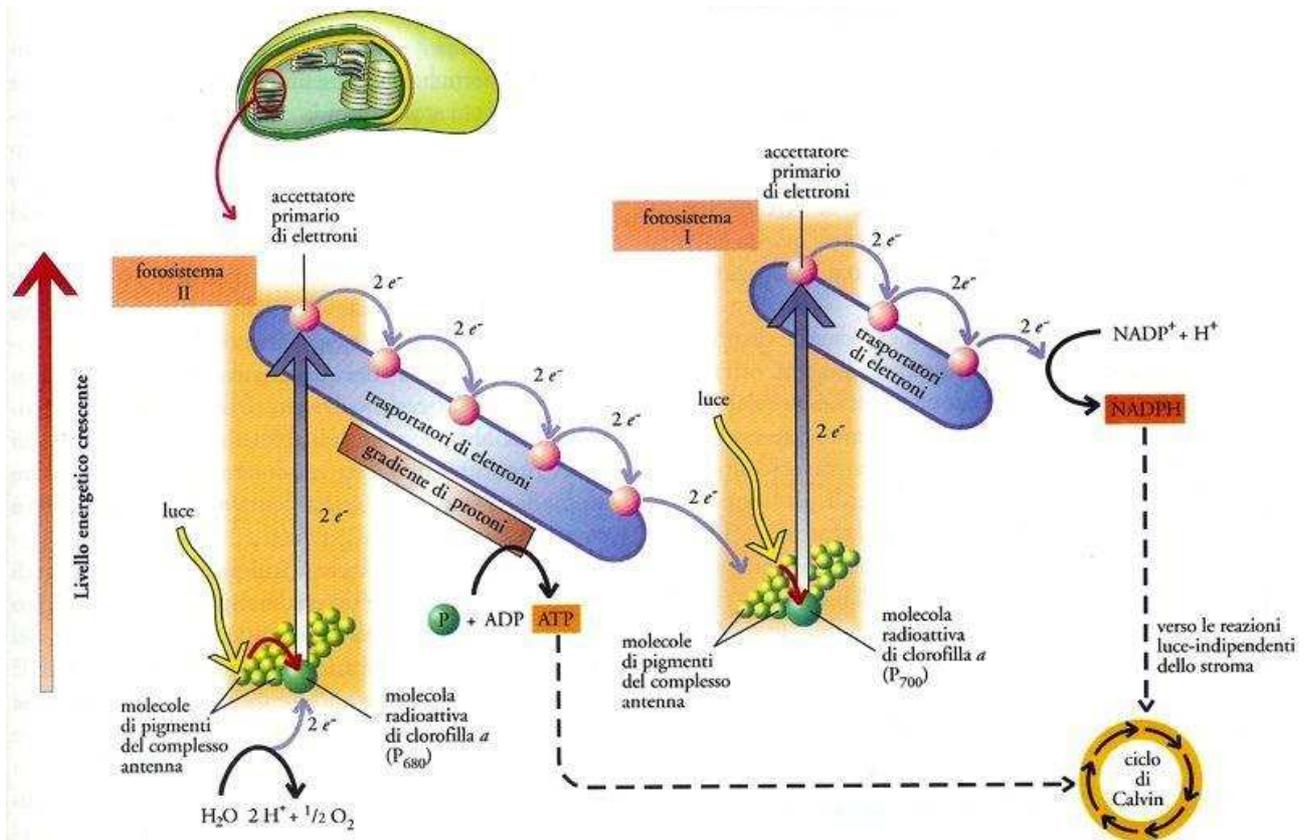


Figura 2-15: Rappresentazione schematica delle reazioni luce-dipendenti dalla fotosintesi

Nel fotosistema I la molecola reattiva di clorofilla a è detta P 700 poiché uno dei picchi del suo spettro di assorbimento è a 700 nanometri, una lunghezza d'onda leggermente maggiore del picco normale della clorofilla a. L'energia luminosa spinge gli elettroni della molecola P700 a un altro accettore primario di elettroni. Da questo accettore essi passano al NADP+ attraverso altri trasportatori. Un protone (H+) e due elettroni si combinano con una molecola di NADP+ per formare una molecola di NADPH. L'altro ione H+ liberato da ogni molecola d'acqua che si è scissa nel fotosistema II rimane in soluzione nello spazio del tilacoide. Gli elettroni rimossi dal fotosistema I sono rimpiazzati da quelli del fotosistema II. L'ATP e il NADPH rappresentano il guadagno netto delle reazioni luce-dipendenti. Per ottenere una molecola di NADPH è necessario che due elettroni siano spinti fuori dal fotosistema II e due elettroni dal fotosistema I.

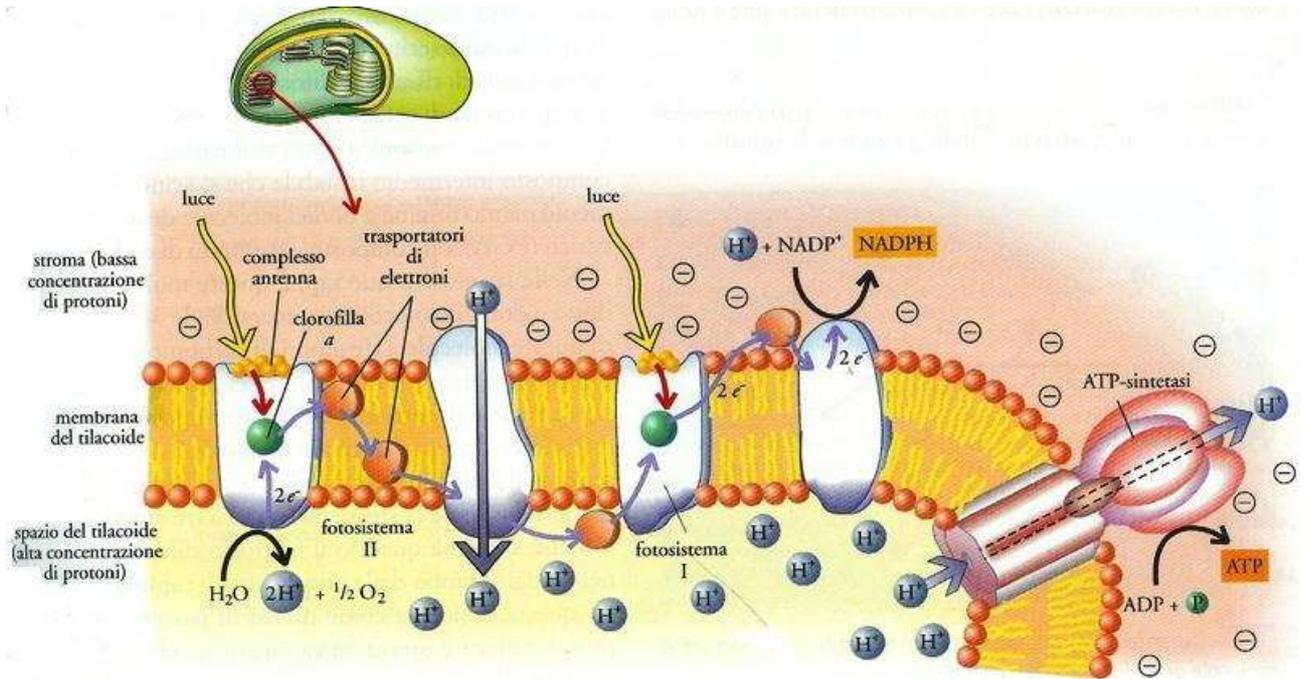


Figura 2-16: Disposizione dei foto sistemi I e II e del complesso enzimi ATP-sintetasi all'interno della membrana di un tilacoide

Per comprendere in che modo si forma ATP mentre gli elettroni passano lungo la catena di trasporto dal fotosistema II al fotosistema I, occorre osservare attentamente la Figura 2-16.

L'energia che essi liberano è utilizzata per pompare protoni dallo stroma allo spazio del tilacoide. Attraverso la membrana del tilacoide si instaura perciò un gradiente di protoni; particolari enzimi, cioè i complessi ATP-sintetasi inseriti nella membrana dei tilacoidi, forniscono un canale attraverso cui i protoni possono scendere lungo il gradiente e tornare nello stroma. Mentre ciò avviene, l'energia potenziale del gradiente elettrochimico consente la sintesi di ATP a partire da ADP. Questo processo chemiosmotico è detto fotofosforilazione ed è simile alla fosforilazione ossidativa che si svolge nei mitocondri in quanto utilizza analoghi trasportatori di elettroni ed enzimi. Durante la fotofosforilazione si svolgono contemporaneamente altri tre eventi:

1. La molecola di clorofilla P 680 che ha perso due elettroni, cerca di sostituirli subito, e ci riesce prendendoli da una molecola d'acqua, che viene privata di due elettroni e viene quindi scissa in protoni e ossigeno;
2. Altra energia luminosa è catturata dalla molecola reattiva di clorofilla (P700) del fotosistema I. La molecola si ossida e gli elettroni sono spinti verso un accettore primario di elettroni dal quale passano al NADP+.
Due elettroni e un protone si combinano con il NADP+ per formare il NADPH;
3. Gli elettroni rimossi dalla molecola P700 del fotosistema I vengono sostituiti dagli elettroni che provengono dall' accettore primario di elettroni del fotosistema II.

2.3.2 Ciclo di Calvin (fase oscura)

La riduzione del carbonio avviene nello stroma in una serie ciclica di reazioni che prende il nome dallo scienziato che l'ha osservata per primo, il chimico statunitense Melvin Calvin.

Il ciclo di Calvin è analogo al ciclo di Krebs in quanto, a ogni giro, il composto iniziale viene rigenerato. Il composto iniziale (e anche quello finale) del ciclo di Calvin è costituito da uno zucchero a cinque atomi di carbonio legato a due gruppi fosfato, il ribulosio difosfato (RuDP), che fu scoperto nelle alghe e nelle foglie di spinacio.

Il ciclo comincia quando l'anidride carbonica si lega al RuDP. Per identificare il prodotto di questa reazione, Melvin Calvin e i suoi collaboratori fecero crescere per un breve periodo di tempo alcune alghe fotosintetiche in presenza di molecole di anidride carbonica i cui atomi di carbonio erano stati resi radioattivi. Il primo prodotto in cui trovarono gli atomi di carbonio marcati fu l'acido fosfoglicerico (PGA); ciò indicava che, quando l'anidride carbonica si lega, al RuDP, la molecola si scinde immediatamente per formare due molecole di PGA. Questa reazione è catalizzata da un enzima specifico, la Ru-1,5DiPcarbossilasi (oggi nota come "rubisco"), che costituisce più del 15% del quantitativo proteico del cloroplasto; la RuDP-carbossilasi, in effetti, è ritenuta la proteina più abbondante sulla Terra. Ogni molecola di PGA prodotta in quest'a reazione iniziale contiene tre atomi di carbonio; per questo motivo, il ciclo di Calvin è conosciuto anche come "via del C3".

Come nel ciclo di Krebs, ogni passaggio del ciclo di Calvin è catalizzato da un enzima specifico. A ogni giro completo una molecola di anidride carbonica entra nel ciclo, viene ridotta e si riforma una molecola di RuDP tre giri del ciclo fanno entrare tre molecole di anidride carbonica, sufficienti per ottenere uno zucchero a tre atomi di carbonio, la gliceraldeide 3-fosfato (G3P). Occorrono sei giri completi del ciclo, con l'introduzione di sei molecole di anidride carbonica, per produrre l'equivalente di una molecola di zucchero a sei atomi di carbonio, con il glucosio. L'equazione complessiva è la seguente:



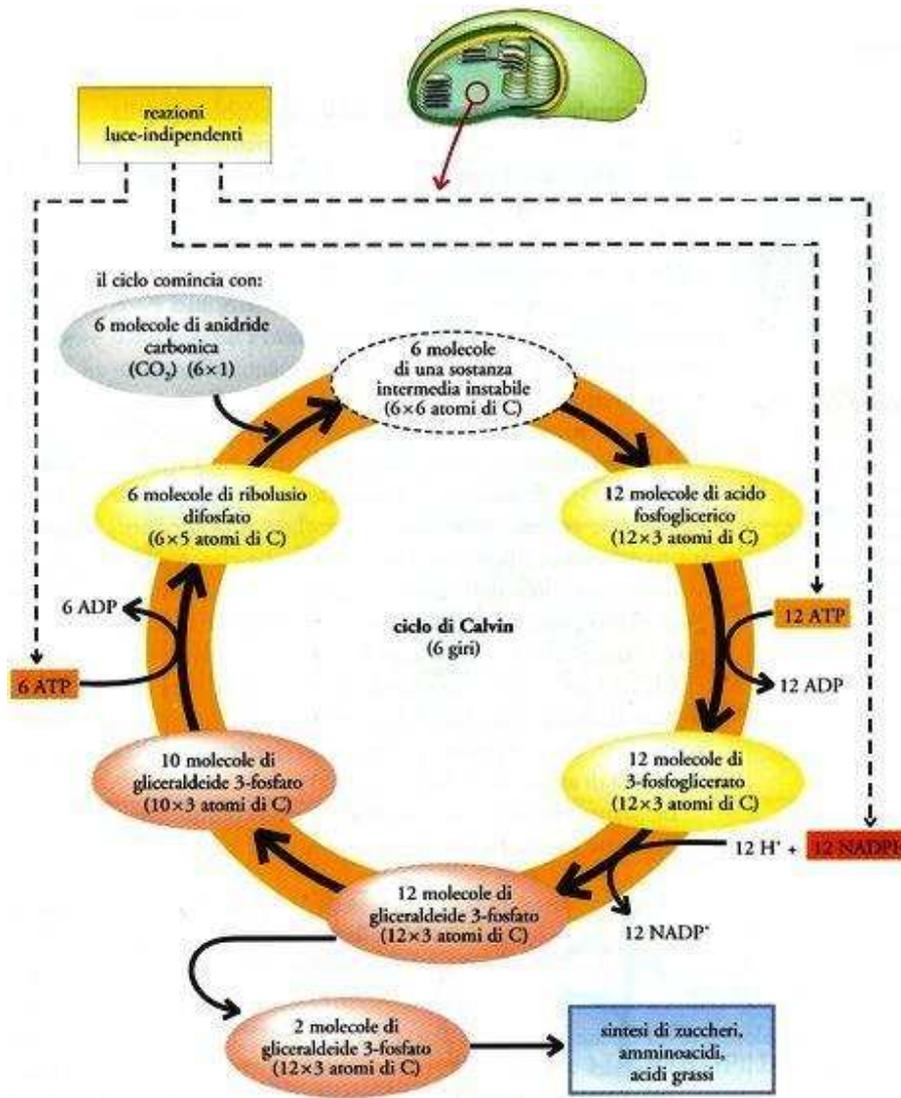


Figura 2-17: Ciclo di Calvin. In figura sono indicati sei giri, il numero necessario per ottenere due molecole di gliceraldeide 3-fosfato.

Partendo dalla scritta in alto a sinistra, si può notare che sei molecole di ribulosiodifosfato (RuDP), un composto a cinque atomi di carbonio, si combinano con sei molecole di anidride carbonica. Ciò produce sei molecole di un composto intermedio instabile che si scinde immediatamente dando origine a dodici molecole di acido fosfoglicerico (PGA), un composto a tre atomi di carbonio. Nelle successive due tappe queste molecole sono ridotte a dodici molecole di gliceraldeide 3-fosfato. Dieci di queste molecole a tre atomi di carbonio si combinano e si riasssemblano per riformare sei molecole di RuDP a cinque atomi di carbonio (ossia, il composto iniziale). Le due molecole «in più» di gliceraldeide 3-fosfato rappresentano il guadagno netto del ciclo di Calvin. La gliceraldeide 3-fosfato è la stessa molecola a tre atomi di carbonio che si forma quando il fruttosio difosfato si scinde nella quarta tappa della glicolisi. Usando questa molecola come punto di partenza, la cellula può sintetizzare una certa varietà di zuccheri, amminoacidi e acidi grassi.

Una soluzione alla carenza di CO₂: la fotorespirazione.

In presenza di una grande quantità di anidride carbonica, il ciclo di Calvin si svolge in genere regolarmente; invece, quando nella foglia la concentrazione di anidride carbonica è bassa, se paragonata a quella dell'ossigeno, l'enzima RuDP-carbossilasi catalizza una reazione tra RuDP e ossigeno invece che tra RuDP e anidride carbonica.

Questa reazione è la prima tappa di un processo conosciuto come fotorespirazione, in cui i carboidrati vengono ossidati in presenza di luce con formazione di acqua e dell'anidride carbonica; in altre parole, la cellula si autoproduce la CO₂ di cui necessita. Tuttavia, in modo diverso dalla respirazione dei mitocondri, la fotorespirazione, infatti, non è un processo redditizio dal punto di vista energetico in quanto non produce né ATP né NADH. In alcune piante più del 50% del carbonio fissato nella fotosintesi può essere riossidato ad anidride carbonica durante il processo di fotorespirazione.

Le condizioni che possono innescare la fotorespirazione sono piuttosto comuni. L'anidride carbonica non è sempre disponibile per le cellule fotosintetiche di una pianta. Come abbiamo visto, questo gas entra nella foglia attraverso gli storni, pori specializzati che si aprono e si chiudono in seguito alla pressione dell'acqua e ad altri fattori. Quando una pianta si trova in un ambiente caldo e asciutto deve chiudere i suoi storni per conservare l'acqua; ciò impedisce il rifornimento di anidride carbonica e favorisce invece l'accumulo di ossigeno prodotto dalla fotosintesi. Come conseguenza si hanno concentrazioni basse di anidride carbonica e alte di ossigeno, fattori che inducono la fotorespirazione.

Una seconda soluzione: la via del C₄

Il problema della carenza di CO₂ viene risolto da alcune piante grazie a una via alternativa per catturare questo gas. In queste piante la prima tappa della fissazione del carbonio consiste nel legame tra l'anidride carbonica e un composto chiamato acido fosfoenolpiruvico (PEP), e nella formazione di un composto a quattro atomi di carbonio, l'acido ossalacetico. (L'acido fosfoenolpiruvico è un prodotto intermedio della glicolisi e l'acido ossalacetico è un prodotto intermedio del ciclo di Krebs.)

Inizialmente, nelle cellule del mesofillo della foglia, l'acido ossalacetico viene trasformato in acido malico. Attraverso i plasmodesmi l'acido malico passa nelle cellule della guaina vascolare, che formano un rivestimento intorno ai fasci vascolari e che, a differenza delle cellule della guaina delle piante C₃, contengono i cloroplasti. Qui l'acido malico è demolito in acido piruvico e anidride carbonica, che entra nel ciclo di Calvin l'acido piruvico passa attraverso i plasmodesmi verso le cellule del mesofillo, dove viene ritrasformato in acido fosfoenolpiruvico, pronto per ricevere un'altra molecola di anidride carbonica.

Le piante che utilizzano questa via sono comunemente chiamate piante C₄, per distinguerle dalle piante C₃ in cui inizialmente il carbonio viene catturato per formare un composto a tre atomi di carbonio, l'acido fosfoglicerico (PGA).

La PEP-carbossilasi, l'enzima che catalizza la sintesi di acido ossalacetico nelle piante C₄, ha un'affinità maggiore per l'anidride carbonica rispetto alla RuDP-carbossilasi, l'enzima che catalizza la

formazione di PGA. Se gli stomi devono rimanere chiusi gran parte del loro tempo, come accade, per esempio, nei climi caldi e secchi per conservare acqua, la pianta con metabolismo C4 prenderà più anidride carbonica a ogni, per così dire, «respiro», rispetto alla pianta con metabolismo C3. Le piante C4 si sono evolute principalmente nelle zone tropicali e si sono adattate particolarmente bene a un'alta intensità luminosa, alle alte temperature e alla siccità; la canna da zucchero e il granturco sono tra le piante C4 più conosciute.

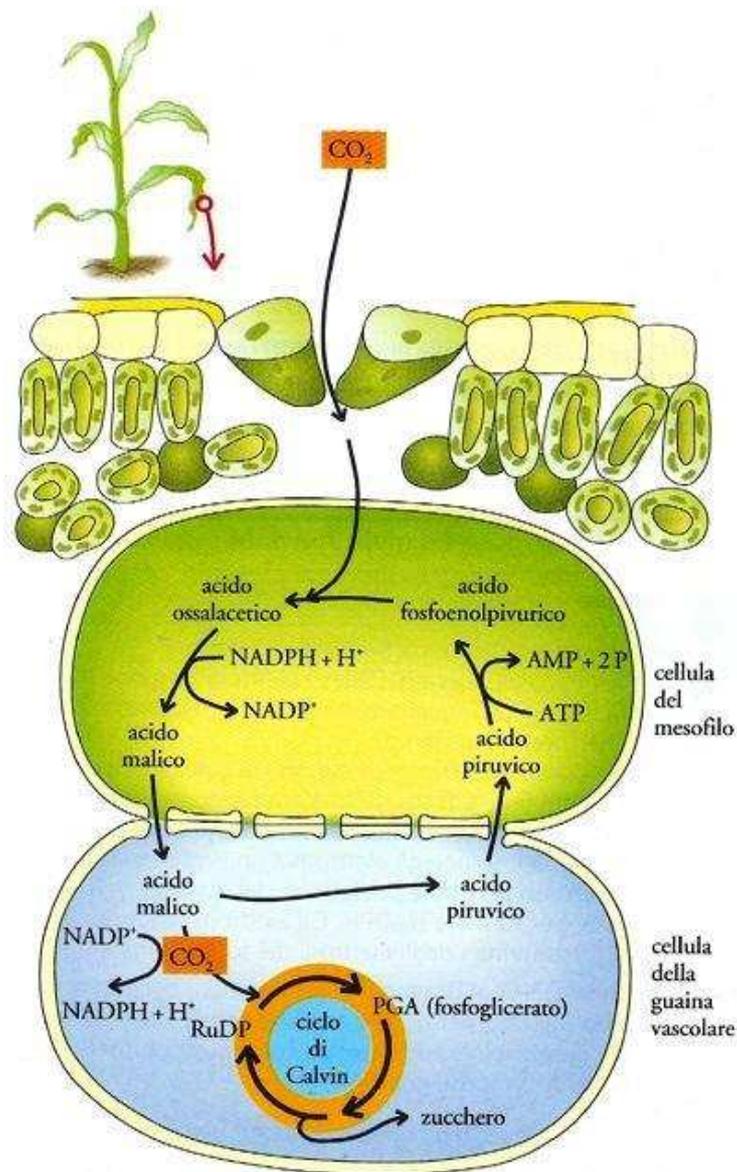


Figura 2-18: Serie di reazioni per la fissazione del carbonio nelle piante C₄

Una terza soluzione: le piante CAM.

Di solito gli stomi delle piante si aprono durante il giorno e si chiudono durante la notte, ma in alcune specie accade esattamente il contrario. Di notte, non solo la temperatura è più bassa, ma l'umidità è in genere più alta; entrambi questi fattori riducono la velocità di traspirazione. Le specie che aprono gli stomi soltanto di notte comprendono una certa varietà di piante adattate ai

climi caldi e secchi, come, per esempio, i cactus, gli ananas e i membri della famiglia delle crassulacee come, per esempio, il genere *Sempervivum* che cresce in montagna. Queste piante assorbono anidride carbonica di notte, trasformandola in acidi a quattro atomi di carbonio; durante il giorno, quando gli stomi si chiudono, l'anidride carbonica viene liberata da questi acidi organici e utilizzata immediatamente per la fotosintesi. Questo processo è detto metabolismo acido delle crassulacee e le piante che lo compiono sono dette piante CAM. Il metabolismo acido è analogo alla via del C4 della fotosintesi, sebbene si sia evoluto probabilmente in maniera indipendente.

2.3.3 *Il ruolo del suolo e dell'acqua e la scoperta delle reazioni indipendenti dalla luce*

Il medico olandese Jan Ingenhousz ha dimostrato che l'aria è stata ripristinata in una pianta solo in presenza di luce solare, e solo dalle foglie verdi di una pianta, e non dalle sue radici. Egli ha proposto che le parti verdi della pianta svolgono un processo (che noi oggi chiamiamo fotosintesi) che utilizza la luce solare per dividere l'anidride carbonica (CO₂) in carbonio e ossigeno. Egli ha suggerito che l'ossigeno è stato rilasciato come gas O₂ in aria, mentre l'atomo di carbonio combinato con acqua per formare carboidrati. La sua proposta era una buona congettura, anche se la fase successiva è stata successivamente modificata. I chimici successivamente hanno scoperto che le proporzioni di atomi di carbonio, ossigeno e idrogeno in carboidrati sono infatti circa un atomo di carbonio per molecola di acqua (come il termine carboidrato indica). Un botanico svizzero ha scoperto nel 1804 che l'acqua fosse un reagente necessario.

Alla fine del secolo la reazione globale per la fotosintesi potrebbe essere scritta come segue:



Che ruolo gioca la luce nella fotosintesi? All'inizio del secolo scorso, fisiologo vegetale inglese F.F. Blackman ha cominciato ad affrontare la questione del ruolo della luce nella fotosintesi. Nel 1905, giunse alla sorprendente conclusione che la fotosintesi è in realtà un processo in due fasi, una sola delle quali utilizza la luce diretta. Blackman misurò gli effetti di diverse intensità di luce, le concentrazioni di CO₂ e le temperature sulla fotosintesi. Fintanto che l'intensità della luce era relativamente bassa, trovò che la fotosintesi potesse essere accelerata aumentando la quantità di luce, ma non aumentando la temperatura o concentrazione di CO₂ (Figura 2-19).

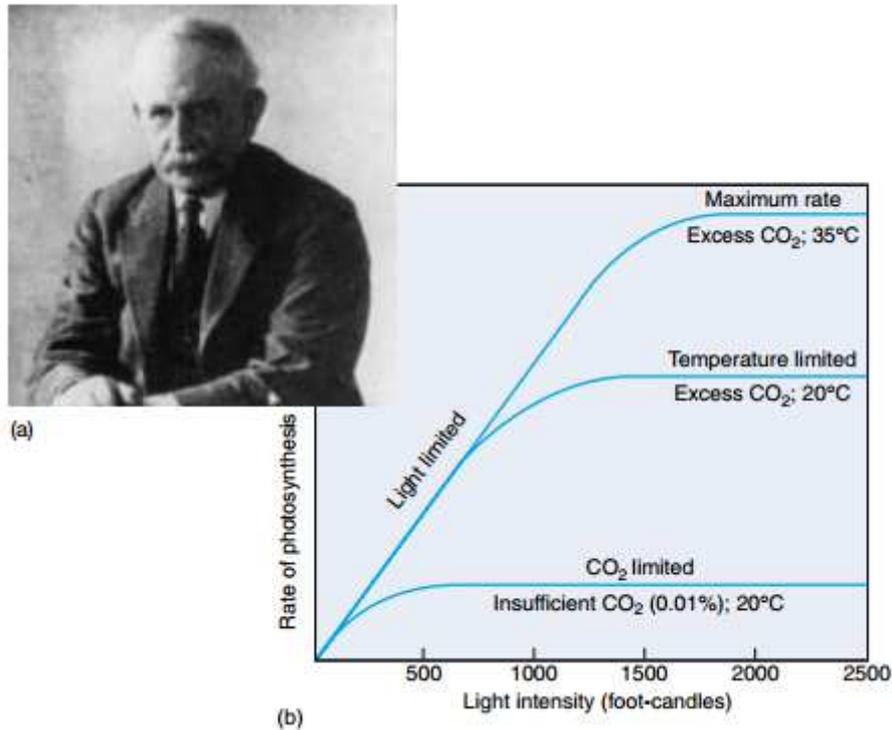


Figura 2-19: Scoperta delle "reazioni scure". (a) Blackman ha misurato valori di fotosintesi sotto diverse intensità di luce, concentrazioni di CO₂ e temperature. (b) Il grafico mostra che la luce è il fattore limitante a basse intensità di luce, mentre la temperatura e concentrazione di CO₂ sono i fattori limitanti a intensità di luce più elevate.

Alle alte intensità di luce, tuttavia, un aumento della temperatura o della concentrazione di CO₂ accelera notevolmente fotosintesi. Blackman ha concluso che la fotosintesi consiste da una serie iniziale di quelle che definisce reazioni della "fase luminosa", che sono ampiamente indipendente dalla temperatura, ed una seconda serie di reazioni della "fase oscura", che sembra essere indipendente dalla luce ma piuttosto limitata dalla CO₂. Non ci si deve confondere di fronte alle etichette utilizzate da Blackman – le cosiddette reazioni "oscure" si verificano in presenza in luce (infatti, richiedono i prodotti delle reazioni "luminose"); il loro nome indica semplicemente che la luce non è direttamente coinvolta in queste reazioni. Blackman ha rilevato che l'aumento della temperatura aumenta la velocità delle reazioni oscure di riduzione della CO₂, ma solo fino a circa 35 ° C. Temperature più elevate hanno causato l'incremento del tasso di decadimento. Poiché 35 ° C è la temperatura alla quale molti enzimi vegetali cominciano ad essere denaturata (i legami idrogeno che tengono un enzima nella sua particolare forma catalitica cominciano ad essere interrotti), Blackman ha concluso che gli enzimi effettuavano reazioni oscure.

2.3.4 Effetto della luce sul tasso di assimilazione netta

Poiché la luce fornisce tutta l'energia necessaria per la fotosintesi, non sorprende che questo sia uno dei fattori più importanti che influenzano l'assimilazione netta. Chiaramente più una pianta è illuminata più sarà in grado di accumulare materia secca, ma in qualsiasi momento l'intensità della luce che cade su una pianta influisce sul tasso di assimilazione netta.

Nel buio assoluto, il tasso di fotosintesi è pari a zero. La respirazione continua tuttavia, per cui il tasso di assimilazione netto è negativo. Alla luce, la fotosintesi può procedere, e all'aumentare dell'intensità luminosa il tasso di fotosintesi aumenta. Ad un certo valore di intensità luminosa il tasso di assimilazione netta passa da negativo a positivo. Questa intensità luminosa in cui fotosintesi e respirazione sono in esatto equilibrio l'uno con l'altro, e in quale tasso di assimilazione netta è pertanto pari a zero, è chiamato punto di compensazione della luce (Figura 2-20)

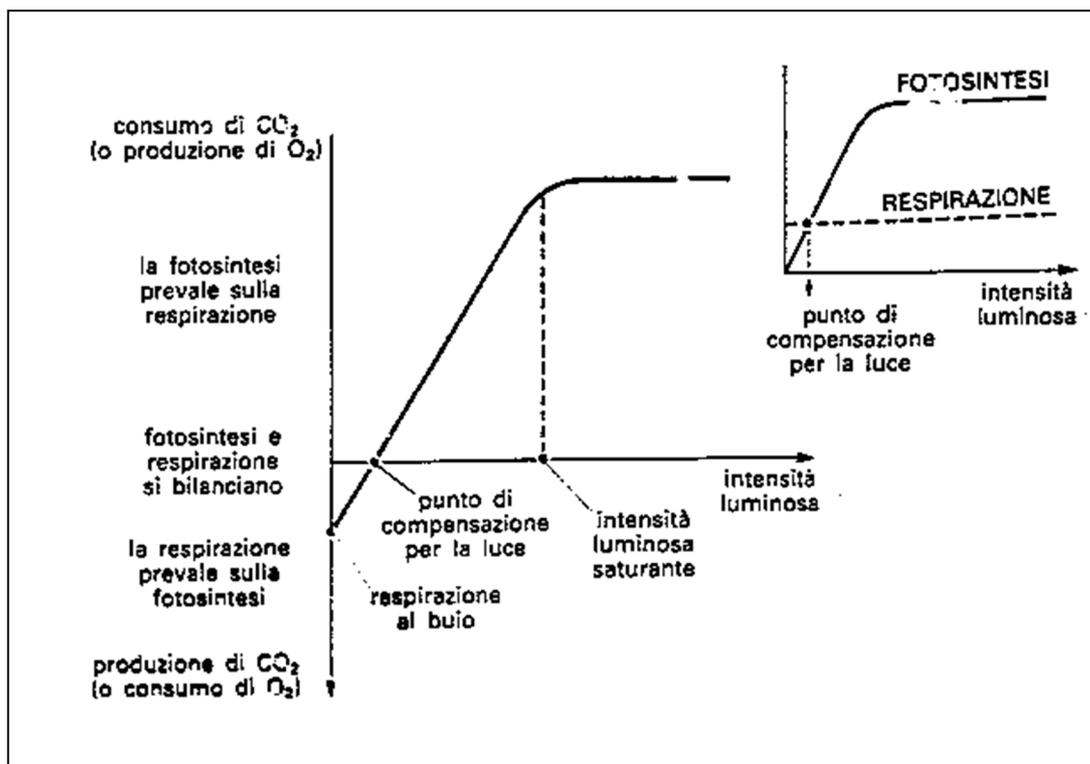


Figura 2-20: Effetto dell'intensità luminosa sul processo di fotosintesi

Il valore di questo dipende dalla temperatura, come si vedrà più avanti, e anche varia da pianta a pianta, ma in generale è relativamente elevata per la maggior parte delle colture agricole. Questo significa che i raccolti sono di regola non tolleranti all'ombreggiamento. Piante tolleranti all'ombreggiamento, ad esempio quelle che si trovano comunemente nei boschi, hanno bassi punti di compensazione della luce.

Mano a mano che l'intensità luminosa continua a salire, il tasso di fotosintesi sale meno lentamente, fino a raggiungere un asintoto. Eventuali ulteriori aumenti di intensità luminosa non hanno alcun effetto sul tasso di fotosintesi. Per la maggior parte delle colture in climi temperati l'asintoto si raggiunge tra circa un quarto e metà del punto più alto del Sole nella stagione estiva. L'intensità della luce in cui viene raggiunto l'asintoto viene chiamato punto di saturazione della luce, anche se, come mostrato chiaramente nella Figura 2-20, questo è un parametro meno preciso rispetto al punto di compensazione della luce, poiché la saturazione è raggiunta gradualmente in un range di intensità luminosa.

Anche quando altri fattori ambientali sono ideali per la fotosintesi, il fenomeno di saturazione della luce è osservabile. Ciò significa che gran parte dell'energia luminosa assorbita dalle foglie ad alta intensità di luce è in realtà sprecata, poiché un pari livello di fotosintesi si raggiungerebbe anche a intensità di luce inferiore.

La il fenomeno di saturazione della luce avviene per due ragioni.

In primo luogo, in una trappola di luce di clorofilla solo poche molecole sono della giusta configurazione per rilasciare elettroni ad alta energia. Per ogni particolare molecola di clorofilla che espelle un elettrone ce ne sono 200-300 la cui funzione è quella di venire 'eccitate' dalla luce e passare la loro energia di eccitazione allo speciale emettitore di elettroni. C'è quindi un collo di bottiglia nel punto di emissione di elettroni nella trappola di luce. Questo non importa a basse intensità di luce, tuttavia, non ci sono abbastanza emettitori di elettroni per gestire tutta l'energia disponibile.

Le foglie che si sviluppano in condizioni di alti livelli di illuminazione si adattano a queste condizioni in certa misura avendo meno molecole di clorofilla non specializzate per ogni emettitore di elettroni specializzato. Esse tendono ad avere quindi più alti punti di saturazione della luce. Queste foglie sono, tuttavia, meno efficienti per bassi livelli di illuminamento e per questo motivo hanno anche punti di compensazione di luce maggiori rispetto a quelle che si sviluppano in condizioni ombreggiate. Ci possono essere anche altre distinzioni tra "foglie soleggiate" e "foglie ombreggiate" che danno origine a differenze di capacità fotosintetica. Le foglie di colture che si sviluppano all'ombra di erbacce spesso non eseguono la fotosintesi in modo efficiente anche dopo la rimozione della erbaccia, a causa dei più bassi punti di saturazione della luce.

La seconda causa di saturazione della luce è fotorespirazione. Una rapida fotosintesi ad elevate intensità luminose esaurisce l'anidride carbonica nell'aria in prossimità della foglia e allo stesso tempo produce in abbondanza ossigeno. In questo modo vi sono le condizioni che favoriscono un alto tasso di fotorespirazione. Qualsiasi aumento di assimilazione dell'anidride carbonica all'aumentare dell'intensità luminosa è annullato da un aumento della liberazione di anidride carbonica in fotorespirazione.

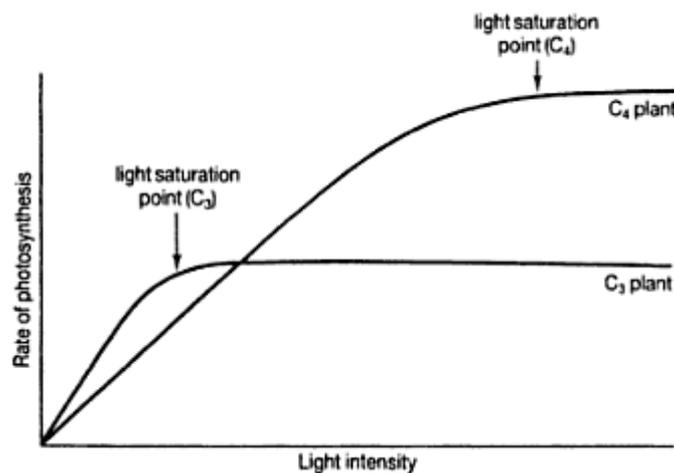


Figura 2-21: Effetto dell'intensità luminosa sul tasso di fotosintesi in piante C₃ e C₄. Le piante C₄ hanno punti di saturazione alla luce maggiori delle piante C₃

Nelle piante C4 l'anidride carbonica liberata in fotorespirazione è riassimilata prima che possa fuggire e le piante mostrano quindi reazioni di fotosintesi a intensità luminose molto elevate. I loro punti di saturazione alla luce sono tipicamente molto più alti di quelli delle piante C3. Questo rende le colture C4 come ad esempio il mais efficaci utilizzatori di alte intensità luminose, rispetto a colture C3 come il grano. Ad intensità luminose inferiori, tuttavia, le piante C3 sono avvantaggiate grazie alla maggiore efficienza energetica.

A livelli di illuminamento al di sotto del punto di saturazione, l'intensità della luce è il fattore limitante il tasso di fotosintesi, vale a dire che la fotosintesi è crescente al crescere dell'intensità luminosa.

Bohning e Burnside (1956) hanno classificato le piante in due gruppi in base al loro punto di saturazione all'intensità luminosa, ovvero le colture sciafile o le colture eliofile. Secondo i loro risultati sperimentali, le specie eliofile, alle quali appartengono la maggior parte delle colture erbacee, raggiungono la saturazione della luce a circa 2.500 *footcandle* (Unità di misura utilizzata negli Stati Uniti, che non fa parte del sistema SI, letteralmente "piede-candela", = 10,764 lux).

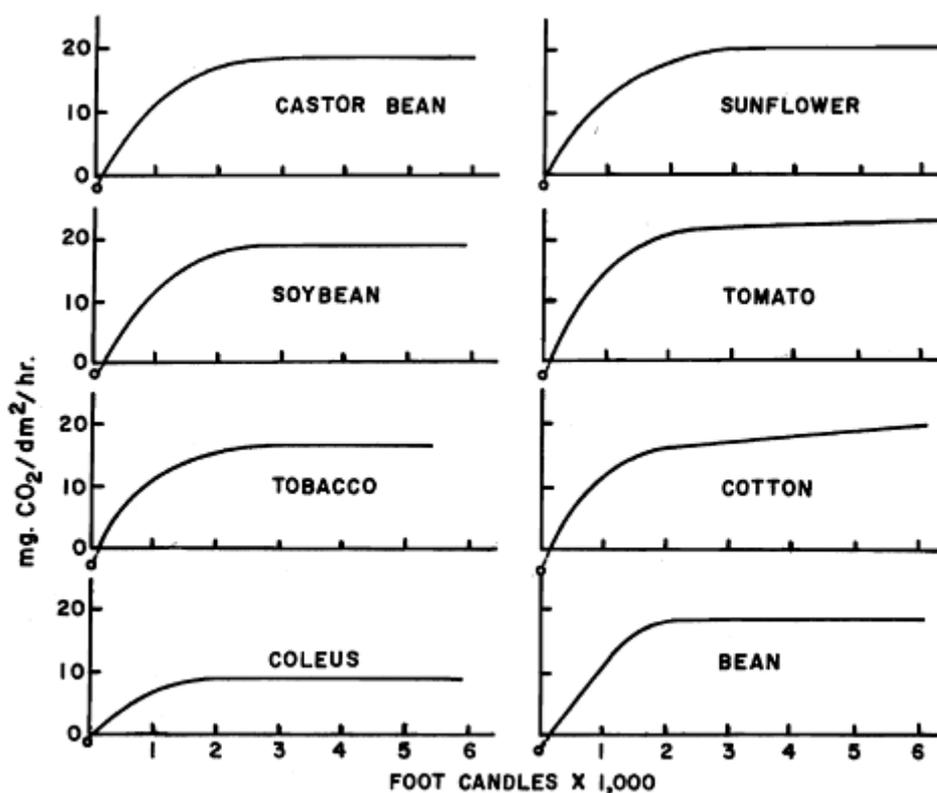


Figura 2-22: Curve di saturazione dell'assimilazione netta (o fotosintesi apparente) per specie eliofile. I cerchi rappresentano la respirazione oscura (dopo Bohning e Burnside)

Le specie sciafile invece raggiungono saturazione ad un massimo di 1.000 *footcandles*.

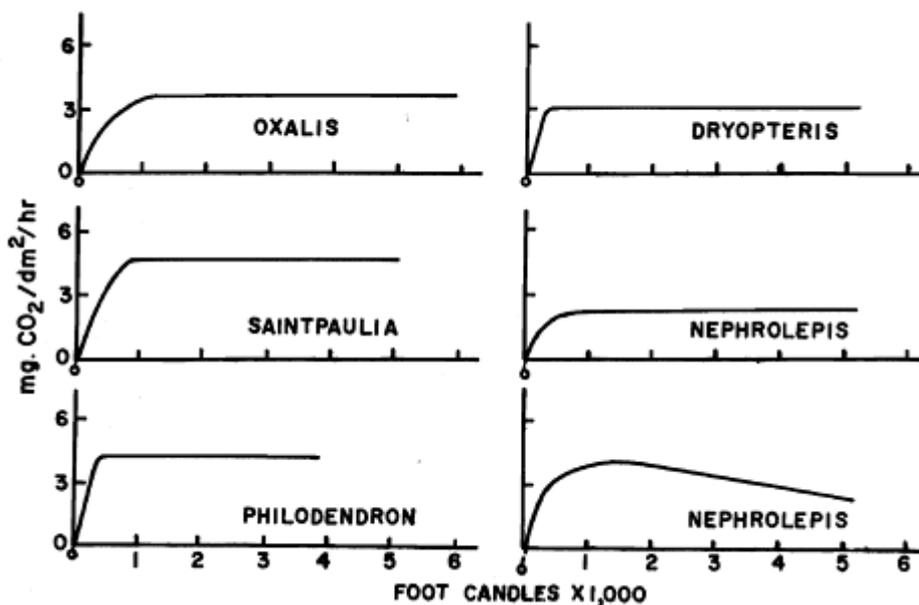


Figura 2-23: Curve di saturazione dell'assimilazione netta (o fotosintesi apparente) per specie sciafile. I cerchi rappresentano la respirazione oscura (dopo Bohning e Burnside)

Tuttavia, le intensità saturazione della luce di 2.500 piedi-candele fornite dal Bohning e Burnside per diverse colture in pieno campo sono inferiori a quelle trovate da altri ricercatori come riassunto nella Tabella 2-6. **L'origine riferimento non è stata trovata.**

Crop	Saturation light intensity (foot-candle) ^a	Reference
Sugar beets	4,400 (Aug.-Oct.)	Thomas and Hill (1949)
Wheat	5,300 (June-July)	Thomas and Hill (1949)
Alfalfa	4,700 (summer) 3,400 (winter)	Thomas and Hill (1949)
Rice	5,000-6,000	Yamada, Murata, Osada, and Iyama (1955)
Rice	3,800	Matushima, Yamaguchi, and Okabe (1955)
Corn	2,500-3,000	Verduin and Loomis (1944)
Apples	4,050-4,400	Heinicke and Childers (1937)
Potatoes	3,000	Chapman and Loomis (1953)
Sugar cane	6,000	Hartt (1965)

Tabella 2-6: Intensità luminosa i saturazione per diverse colture

Le intensità di saturazione della luce della canna da zucchero fornite dal Haett (1965) e del riso da Yamada, Murata, Osada, e Iyama (1955) sono particolarmente alte. Ma anche il più alto valore di 6.000 piedi-candele è soltanto la metà circa del valore corrispondente con Sole allo zenit, che supera di solito i 10.000 piedi-candele e può raggiungere 14.000 piedi-candele in alcune zone. Così, le foglie non ombreggiate sono solitamente in condizioni di saturazione alla luce da circa le 10:00 alle 16:00.

Per alcune piante, i tassi di assorbimento netto possono anche diminuire leggermente all'aumentare della luce al di là del punto di saturazione.

Una foglia totalmente esposta ai raggi solari non può essere completamente efficiente nell'utilizzo di energia luminosa per il processo di fotosintesi. Bonner (1962) ha utilizzato la curva dell'assorbimento netto per le foglie della barbabietola da zucchero, ottenute da Haastra (1958) per calcolare l'efficienza dell'utilizzo dell'energia luminosa (Figura 2-24)

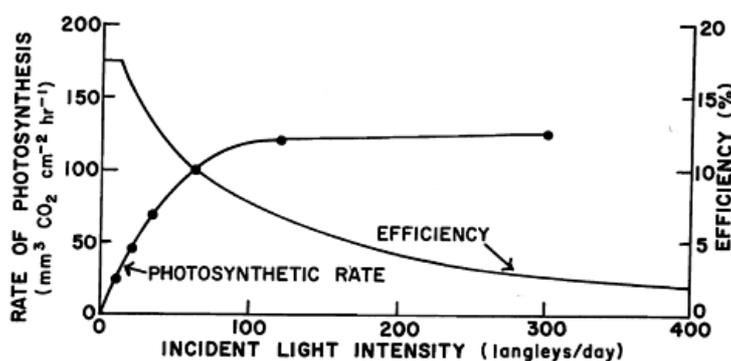


Figura 2-24: Tasso di fotosintesi della foglia di barbabietola da zucchero in funzione della radiazione incidente ed efficienza di utilizzo della radiazione nella fotosintesi (Bonner). I valori in MJ / m2 sono ottenuti moltiplicando valori dell'asse x per un fattore di conversione pari a 0,0418

La diminuzione della efficienza di utilizzo della radiazione luminosa al crescere dell'intensità luminosa è dovuta alla resistenza finita alla diffusione di anidride carbonica attraverso la.

2.3.5 Effetto della temperatura sul tasso di assimilazione netta

Quasi tutte le reazioni chimiche procedono più rapidamente a temperature più elevate. Tra 0 °C e circa 40 °C, ciò vale anche per le reazioni enzimatiche. Così una reazione enzimatica avviene più rapidamente a 30 °C che a 20 °C. Sopra circa i 40 °C, la struttura tridimensionale della maggior parte degli enzimi comincia ad essere distrutta, riducendo la loro attività e provocando il rallentamento delle reazioni che essi controllano.

Sia la respirazione che la fotosintesi coinvolgono un'ampia gamma di reazioni enzimatiche. Con un aumento di temperatura da 0 °C a 40 °C, la velocità di respirazione aumenta progressivamente. Tuttavia, l'aumento del tasso di fotosintesi all'aumentare della temperatura avviene solo fino a un certo punto, oltre il quale la fotosintesi è limitata da inadeguati livelli di luce o apporti di anidride carbonica. Questo punto è in genere raggiunto intorno ai 10-15 °C per la maggior parte delle coltivazioni agricole nelle zone temperate. Sopra questa temperatura, la respirazione aumenta ma la fotosintesi rimane allo stesso livello. Il tasso di assimilazione netta quindi diminuisce, ed il punto di compensazione alla luce viene aumentato.

In pratica, temperature più elevate sono generalmente associate a intensità della luce elevate. Qualsiasi effetto inibitorio dovuto all'aumento della temperatura sul tasso di assimilazione netta quindi tende ad essere mascherato dall'effetto stimolante di una maggiore intensità luminosa. L'evaporazione dell'acqua dalle foglie ha un effetto di raffreddamento, mantenendo la temperatura interna alcuni gradi inferiore alla temperatura dell'aria esterna. Per queste ragioni, la

riduzione del tasso di assimilazione netta a causa dell'alta temperatura è raramente significativo, tranne in condizioni asciutte quando la chiusura degli stomi inibisce la fotosintesi.

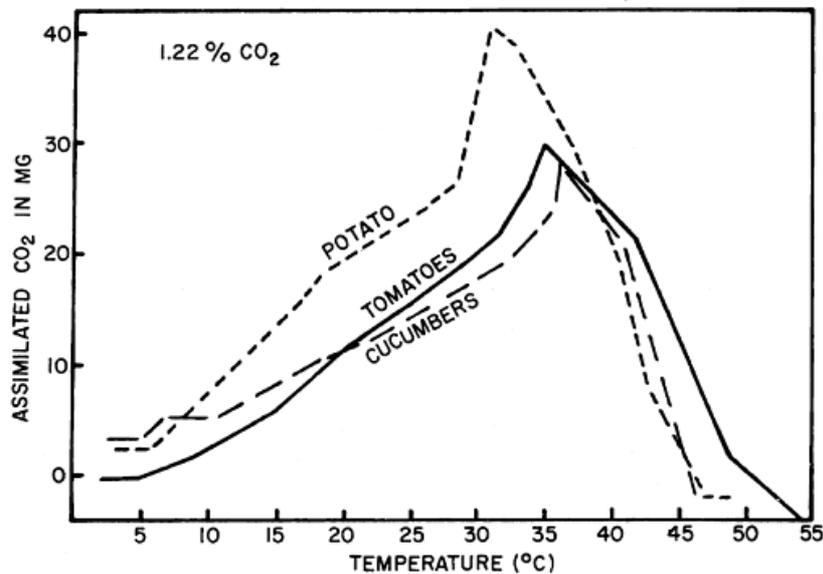


Figura 2-25: Relazione tra tasso di fotosintesi delle foglie di patata, pomodoro e cetriolo, e temperatura delle foglie (Molga)

2.4 Radiazione fotosinteticamente attiva (PAR)

La radiazione fotosinteticamente attiva (abbreviato PAR acronimo in lingua inglese di o Photosynthetically Active Radiation) designa l'intervallo spettrale (banda di lunghezze d'onda) della radiazione solare da 400 a 700 nanometri che gli organismi sono in grado di utilizzare nel processo di fotosintesi. Questa regione spettrale corrisponde più o meno alla banda della luce visibile all'occhio umano. I fotoni a lunghezze d'onda più corte tendono ad essere così energico che possono essere dannosi per le cellule e tessuti, ma principalmente sono filtrati dallo strato di ozono nella stratosfera. I fotoni a lunghezze d'onda più lunghe non trasportano energia sufficiente per permettere alla fotosintesi di avere luogo.

Altri organismi viventi, come i batteri verdi, batteri viola e Heliobacteria, possono sfruttare la luce solare in regioni spettrali leggermente più estese, come il vicino infrarosso. Questi batteri vivono in ambienti, come il fondo di stagni, sedimenti e profondità oceaniche. A causa dei loro pigmenti, formano tappeti colorati di verde, rosso e viola.

La clorofilla, il pigmento vegetale più abbondante, è il più efficace nel catturare la luce rossa e blu. Pigmenti accessori quali caroteni e xantofille raccolgono parte della luce verde e passano per il processo fotosintetico, ma gran parte delle lunghezze d'onda verdi vengono riflesse dando alle foglie il loro caratteristico colore. Un'eccezione alla predominanza di clorofilla avviene in autunno, quando la clorofilla viene degradata (perché contiene N e Mg), ma i pigmenti accessori no (perché contengono solo C, H e O) e rimangono nella foglia producendo fogliame di colore rosso, giallo e arancione.

La misurazione della PAR viene utilizzata in agricoltura, silvicoltura e oceanografia. Uno dei requisiti per la produttività dei terreni agricoli è un'adeguata PAR, dunque la PAR è utilizzata per valutare il potenziale di un investimento agricolo. Sensori di PAR disposti a vari livelli della copertura forestale misurano le caratteristiche di disponibilità ed utilizzo della PAR. Il tasso fotosintetico e i relativi parametri possono essere misurati in modo non distruttivo utilizzando un sistema di fotosintesi, e questi strumenti misurano la PAR e, talvolta, controllano la PAR a volute intensità.

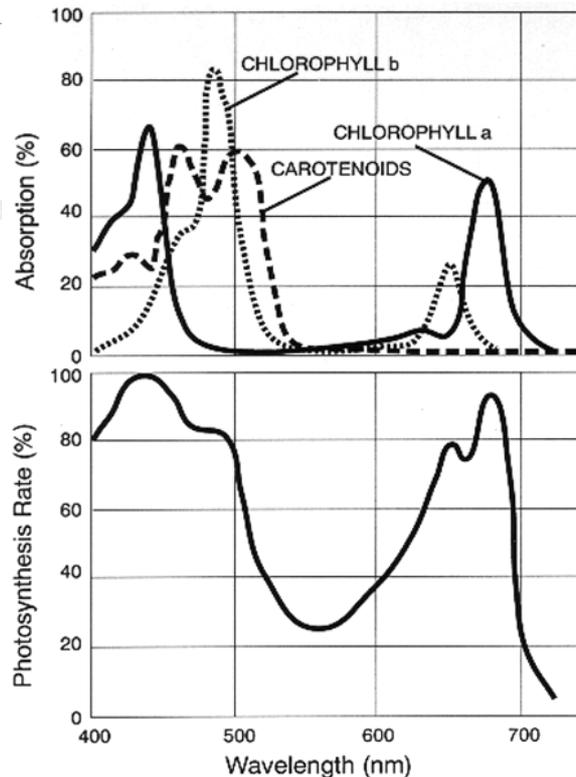


Figura 2-26: Spettro tipico di azione PAR in confronto a spettri di assorbimento di clorofilla A, clorofilla B e carotenoidi

Normalmente la PAR è quantificata come $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 * \text{s})$, che è una misura della densità (di superficie) di flusso di fotoni fotosintetico, o PPFD. La PAR può anche essere espressa in unità energetiche (irraggiamento, W / m^2); questo è utile nella considerazione riguardo il bilancio energetico per gli organismi fotosintetici. Perché la fotosintesi è un processo quantistico, la PPFD è generalmente utilizzato dai biologi vegetali.

Solitamente l'irraggiamento di una sorgente luminosa è espresso in W/m^2 . L'irraggiamento viene definito come il flusso di radiazione elettromagnetica incidente su una superficie per unità di area. Per i processi biologici del flusso quantico di luce con una data lunghezza d'onda ha una rilevanza maggiore dell'irradianza. Il flusso quantico (detto anche flusso di fotoni) è definito come il numero di fotoni in $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 * \text{s})$ su una superficie ed espresso in μE (μ Einstein). Questa quantità nell'intervallo 300-700 nm è coincidente con la densità di flusso di fotoni fotosintetico, PPFD. Per convertire l'irradianza nel flusso quantico e viceversa i seguenti punti devono essere considerati:

Un fotone ha un'energia quantica E_p definita da:

$$E_p = h * f = h * \left(\frac{c}{\lambda}\right)$$

Dove:

- h = Planck constant $6.626 * 10^{-34}$ [Js] oppure $4.135 * 10^{-15}$ [eV s];
- c = speed of light = $2.998 * 10^8$ [m/s];
- f = frequency [1/s];
- λ = wavelength [m]

Se la lunghezza d'onda è misurata in μm allora l'energia fotonica E_p è uguale a $1.24/\lambda$ [eV/ μm]

Il numero di fotoni N_p può essere calcolato come segue (lunghezza d'onda λ misurata in nm):

$$N_p = \frac{E}{E_p} = E * \left(\frac{\lambda * 10^{-9}}{h * c}\right) = \frac{E_m * \lambda * 10^{-9}}{1.988 * 10^{25}} = E_m * \lambda * 5.03 * 10^{15} \left[\frac{1}{\text{m}^2 * \text{s}}\right]$$

Con E_m [$\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$] irradianza monocromatica

Il flusso fotonico può essere calcolato dalla relazione seguente:

$$E_{QF} = N_p / N_A$$

Dove $N_A = 6.022 * 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ è il Numero di Avogadro

Unendo si giunge all'equazione seguente di conversione tra l'irradianza monocromatica ed il flusso quantico [μE] per una data lunghezza d'onda:

$$E_{QF,\lambda} = \frac{N_p}{N_A} = \frac{E_m * \lambda * 5.03 * 10^{15}}{6.02 * 10^{17}} \left[\frac{1}{\text{m}^2 * \text{s}}\right] * \left[\frac{1}{\mu\text{mol}}\right]$$

Lunghezza d'onda λ [nm]	Energia fotonica E_p [Ws]	Energia per μmol $E_p * N_A$ [Ws]	Numero di fotoni N_p for 1W [$1/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	Flusso fotonico E_{QF} [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
470	$4.229 * 10^{-19}$	0.255	$2.365 * 10^{18}$	3.926
520	$3.823 * 10^{-19}$	0.230	$2.616 * 10^{18}$	4.344
660	$3.012 * 10^{-19}$	0.181	$3.320 * 10^{18}$	5.513
730	$2.723 * 10^{-19}$	0.164	$3.672 * 10^{18}$	6.098

$$E_{QF,\lambda} = E_\lambda * \lambda * 0.836 * 10^{-2} [\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})/\text{nm}]$$

Infine, integrando nel range della PAR si ottiene:

$$PPFD = 0.00836 \sum_{400}^{700} E_\lambda * \lambda * d\lambda [\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$$

2.5 Tipologie di serre

Negli anni si sono susseguite sempre più svariate tipologie costruttive di serre, diverse in concezione, materiali, e finalità. Nella Figura 2-27 di seguito si riporta la codifica riconosciuta da EFSA (2008).

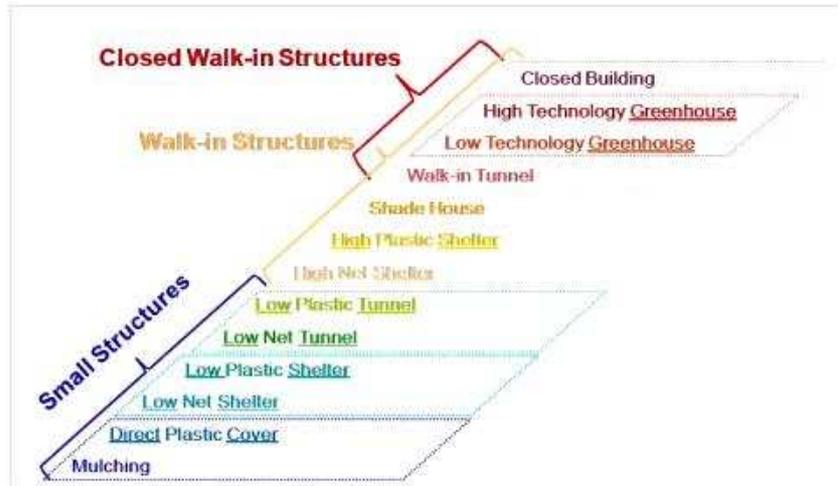


Figura 2-27: Classificazione EFSA tipologie di apprestamenti protetti (2008)

“*Low Net Shelter*”: protezioni realizzate con rete ombreggiante utilizzati per coprire parti di piante coltivate, soprattutto per colture da frutto, per la protezione contro eventi meteorici o animali.

“*Low Plastic Shelter*”: protezioni realizzate con materiali continui, utilizzati per la protezione di fruttiferi (es. vite) contro eventi meteorici e climatici in generale. In alcuni casi la copertura può essere discontinua.



Figura 2-28: Esempio di Low Plastic Shelter



Figura 2-29: Esempio di Low net tunnel

“*Low Net Tunnel*”: semplice copertura in rete, solitamente associata alla pacciamatura. Si tratta di una protezione temporanea, rimossa poco prima della raccolta.

“*Low Plastic Tunnel*”: semplice copertura plastica solitamente associata alla pacciamatura. Si tratta di una protezione temporanea, rimossa poco prima della raccolta.



Figura 2-31: Esempio di High Net Shelter



Figura 2-30: Esempio di Low Plastic Tunnel

“*High Net Shelter*”: copertura in rete realizzata per la protezione delle coltivazioni, contro l'eccessivo calore o luce e per la protezione contro animali. Impianti non chiusi.

“*High Plastic Shelter*”: copertura plastica realizzata per la protezione delle coltivazioni, contro l'eccessivo calore o luce e per la protezione contro animali. Impianti non chiusi.

“*Shade House*”: ombraio chiuso in forma di tunnel o di piccolo serra. Utilizzo di reti colorate (prevalentemente bianchi), con differenti valori di filtraggio della luce (anche oltre l'80%).

“*Walk-In Tunnel*”: strutture non riscaldate, realizzate con uno strato singolo di film plastico, supportato da archi o travi metalliche o in altro material (es. legno). Altezza e larghezza sono sufficienti per permettere l'accesso ed il lavoro dell'uomo. Strutture generalmente temporanee, rimosse a fine produzione.



Figura 2-33: Esempio di High Plastic Shelter



Figura 2-32: Esempio di Walk-In Tunnel

“*Low Technology Greenhouse*”: struttura accessibile per le lavorazioni, non mobile, coperta con film plastic, pannellature di material rigido trasparente o vetro. Dimensioni molto variabili; strutture prive di impianti e sistemi per il controllo del clima.

“*High Technology Greenhouse*”: strutture ad alta tecnologia per la produzione orto-floricola, coperte con materiali rigidi trasparenti (policarbonato, vetro, ...) ed equipaggiati con sofisticati sistemi di controllo e gestione del clima, anche con sistemi computerizzati.

“*Closed Building*”: strutture completamente chiuse per produzioni speciali che non richiedono luce in parte o in tutto il proprio ciclo produttivo (es. funghi, witloof).



Figura 2-35: Esempio di Low Technology Greenhouse



Figura 2-34: Esempio di High Technology Greenhouse

La classificazione delle aziende che commercializzano serre prefabbricate, è basata sulla geometria della sezione trasversale; come si vede in Figura 2-36 avviene una suddivisione in:

- serre a padiglione regolare (serre a doppia falda);
- serre a padiglione a tetto semicircolare (serre a volta ellittica su piedritti);
- serre a tunnel (serre a volta semicircolare)

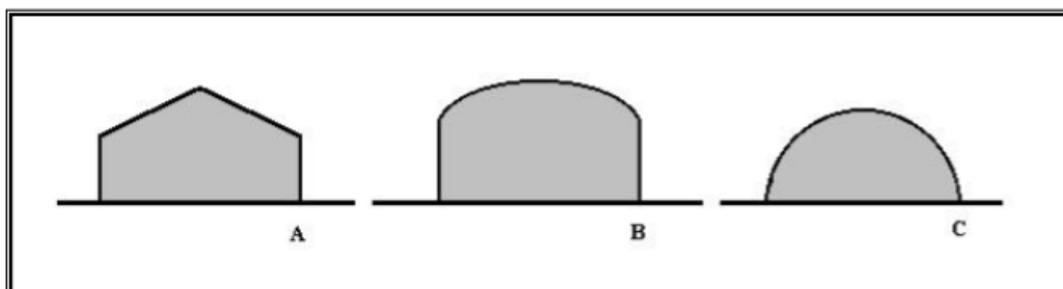


Figura 2-36: Classificazione delle serre in funzione delle geometrie strutturali: A) serra a falde simmetriche, B) serra a tetto semicircolare, C) serra a tunnel

Le serre a padiglione regolare così come quelle a tetto semicircolare possono essere affiancate formando delle strutture a più campate.

Inoltre nel caso di serre a padiglione regolare, vengono costruite strutture a più falde sulla singola campata. Questa tipologia di serra ha un costo sensibilmente maggiore rispetto alle serre a doppia falda ma presenta i seguenti vantaggi:

- maggiore pendenza delle falde con migliore trasmissione della radiazione solare incidente e minore formazione di condensa;
- altezza al colmo contenuta e alleggerimento alla spinta del vento;
- aumento delle aperture di ventilazione e loro protezione dall'azione dei venti;
- possibilità di installare aperture più efficienti;
- possibilità di installare facilmente un telo ombreggiante esterno a sviluppo orizzontale.

I principali parametri dimensionali delle serre, riportati in Figura 2-37 e Tabella 2-7, sono:

- la larghezza o luce della campata (L_a);
- la lunghezza della serra (L_u);
- il modulo strutturale (I), ovvero l'interasse tra due elementi strutturali (travi e pilastri);
- l'altezza di colmo (H_c);
- l'altezza di gronda (H_g).

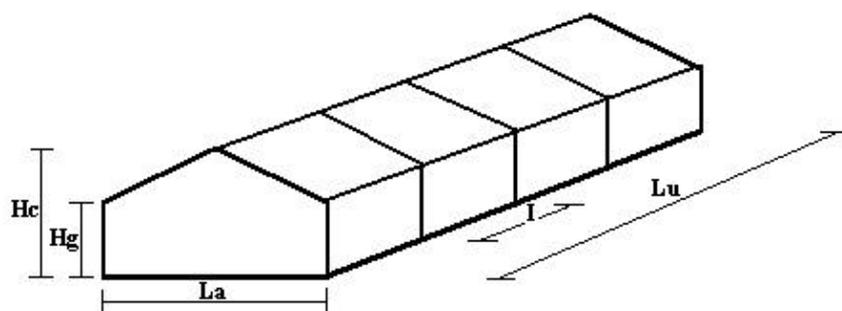


Figura 2-37: I principali parametri dimensionali di una serra

	Serre a padiglione regolare (doppia falda)	Serre a padiglione a tetto semicircolare	Serre a tunnel
Luce della campata	6,4 – 16 m	6,4 m (fino a 9 m)	6 – 7 – 8,5 – 9 m
Modulo strutturale	3 – 3,1 – 3,72 – 3,85 m	1,5 – 3 – 4 m	1,5 – 2 – 2,5 m
Lunghezza	60 o 100 m max.	30 o 42 m max.	30 – 42 – 61,5 – 100m max.
Altezza di gronda	2 – 3 m	2 – 3 m	-
Altezza di colmo	3,5 – 6 m	3 – 5 m	2,8 – 3,3 m
Inclinazione delle falde	21° - 23°	-	-

Tabella 2-7: I più diffusi valori dei parametri dimensionali per le principali tipologie di serra

La forma della struttura della serra condiziona il rendimento energetico complessivo; ad esempio il rapporto tra superficie esterna e superficie coperta è un primo indice dell'efficienza della serra, in quanto a parità di superficie coperta, più grande è la superficie esterna, maggiori sono le dispersioni di calore. Questo significa che serre più piccole hanno in proporzione maggiori dispersioni di calore rispetto a serre di dimensioni più grandi. Affiancare più moduli, creando delle strutture a due, tre o più campate, può portare a dei vantaggi in termini di efficienza energetica perché si ha una diminuzione della superficie esterna per metro quadro coperto, ma allo stesso tempo provoca problemi relativi all'illuminazione e alla ventilazione del locale.

Un altro indice dimensionale di una certa importanza è il rapporto tra volume della serra e superficie coperta che è funzione soprattutto dell'altezza di colmo. Una cubatura elevata fa sì che la massa d'aria riscaldata dall'effetto serra costituisca una sorta di volano termico che ostacola improvvise variazioni di temperatura. Questo è un fenomeno particolarmente utile nelle serre fredde, ma in quelle riscaldate la maggiore cubatura comporta sicuramente un consumo energetico più elevato.

Tra le tecnologie produttive più recenti, con una particolare attenzione all'aspetto del controllo climatico, in bibliografia si può trovare la seguente classificazione/descrizione di diverse tipologie e delle soluzioni tecnologiche più comuni per quando riguarda il riscaldamento associato.

Serre Free Standing/Gutter-Connected

Le serre Free Standing hanno superfici notevolmente maggiori, con conseguente maggiore dispersione termica. La costruzione di serre Gutter-Connected elimina alcune pareti laterali. La maggior parte del calore perduto da una serra è perso attraverso superfici laterali, frontali ed i tetti. Minimizzare il rapporto tra superficie laterale della serra e la superficie di terreno coperto riduce la perdita di calore e aumenta l'efficienza.



Figura 2-38: Esempio di Gutter-Connected Greenhouse

Serre “Curved Roof”

Serre con tetti curvi sono disponibili in diverse forme e dimensioni. Tali serre sono generalmente progettati per essere coperte con due strati di film di polietilene. L'aria viene soffiata per riempire lo spazio tra gli strati e fornire un effetto isolante. LE “Curved Roof greenhouses” sono meno costose da costruire rispetto a serre con struttura in vetro e sono una scelta popolare per i coltivatori che desiderano spazio di produzione al costo iniziale più basso.

Serre Arched/Bowed/Quonset/Gothic Arch

Questa tipologia di serra possono essere costruite su muri o montanti di 4 metri o più in altezza. Serre di tipologia “Quonset” sono di solito autoportanti con le basi del tetto ricurvo con origine a livello del suolo. Serre con arco gotico hanno un tetto curvo ma presentano una cuspide nel centro. Spesso le case in stile gotico hanno ventilazione a tetto che consente tramite apposita intelaiatura.



Figura 2-39: Esempio di Arched poly green house

Serre a dente di sega

Le serre a dente di sega sono costruite su montanti, senza un apice nel centro. Il tetto si estende dalla minima alla massima altezza da una grondaia all'altra. Una parete verticale scende dal vertice alla base creando una presa d'aria. Solitamente si trovano in climi caldi dove, se richiesto, il riscaldamento necessario è minimo.

Serre “Venlo”

Le serre nominate “Venlo” hanno avuto origine con semplici strutture strette ricoperte con strati singoli di vetro dalla base all’apice. Erano larghe circa 3,2 m, con montanti a 3 m di distanza. Divenendo una soluzione costruttiva diffusa, i costruttori hanno adattato le capriate in modo che due o tre campate del tetto potessero essere supportati da una fila di montanti. Questo ha permesso una maggiore libertà alle attrezzature di lavoro ed a layout delle superfici coltivate.

Serre a tetto retraibile

Le serre a tetto retraibile presentano un design tradizionale a punta, ma invece di un tetto fissato in modo permanente, viene utilizzata una copertura flessibile rinforzata. La copertura del tetto permette di regolare da completamente aperto a chiuso. Hanno un tetto a punta per consentire un'adeguata altezza per fissare i sistemi. Serre a tetto retraibile non sono a tenuta d'aria come altri tipi di serra. Il maggior numero di ricambi d'aria in una serra a tetto retraibile deve essere preso in considerazione quando si progetta un sistema di riscaldamento.



Figura 2-40: Esempio di serra a tetto retraibile

Serre “Cold Frames” e “Hoop”

Questa tipologia di serre è costruita per fornire una protezione minima per le piante. A causa del loro profilo basso e stretto di solito non presentano sistema di riscaldamento. [13]

2.6 Materiali di copertura

La scelta del materiale di copertura durante la fase progettuale non è dettata solo da problematiche economiche di sostenibilità dell’investimento rispetto alla redditività della coltura, ma anche da considerazioni tecniche che condizionano la scelta della tipologia costruttiva e le sue dimensioni.

Le principali caratteristiche che devono presentare i materiali di copertura delle serre sono:

- *Ridotto costo economico*: la scelta del materiale in funzione di questo parametro è un problema complesso, che si risolve trovando un compromesso tra sostenibilità dell'investimento in funzione di redditività della coltivazione, proprietà fisiche e ottiche, durata stimata della struttura (legata al degrado delle stesse caratteristiche ottiche e di resistenza alle intemperie), e facilità di montaggio della copertura.
- *Ridotta conducibilità termica*: il calore è inevitabilmente trasmesso all'esterno della serra attraverso la copertura, ma l'utilizzo di materiali con bassa conducibilità termica può determinare riduzioni delle dispersioni di calore (spesso a tal proposito si agisce installando coperture doppie con intercapedini d'aria);
- *Elevata trasparenza alle radiazioni PAR e all'infrarosso corto*: in generale tutti i materiali utilizzati hanno buone caratteristiche di trasparenza alle radiazioni nel campo del PAR, vitali per la fotosintesi e la foto morfogenesi della coltura;
- *Opacità alle radiazioni nel campo dell'infrarosso lungo*: questa caratteristica è quella che determina il cosiddetto "effetto serra";
- *Ridotto coefficiente di dilatazione termica*: al variare delle stagioni e delle temperature si possono verificare dei rigonfiamenti o delle fessure nella copertura che, oltre a danneggiare la struttura, fanno aumentare sensibilmente le perdite di calore. Il vetro ha valori molto bassi di dilatazione termica al contrario dei materiali plastici;
- *Leggerezza e facilità di montaggio*: questi due parametri influenzano in fase progettuale la tipologia di struttura da adottare e quindi i costi iniziali dell'investimento. In particolare il peso della struttura condiziona il calcolo statico, insieme a eventuali carichi dovuti agli effetti climatici, quali neve o vento che rappresentano il cosiddetto "carico permanente".
- *Durata e resistenza alle intemperie*: i materiali plastici al contrario del vetro possono presentare una degradazione delle caratteristiche fisiche e ottiche marcata con il passare del tempo. Per quanto concerne la resistenza alle intemperie, anche in base alle caratteristiche meteorologiche del sito della serra, occorre considerare in fase progettuale l'eventualità di grandine, neve o forte vento.

L'esame dei materiali utilizzati per la copertura delle serre, in funzione delle caratteristiche elencate, si effettua distinguendo le diverse tipologie di vetro o materiali plastici semitrasparenti. Questi ultimi a loro volta possono essere suddivisi in film plastici, laminati semirigidi o ondulati, lastre rigide o alveolari.

Il **vetro**, largamente utilizzato perché commercialmente reperibile con diverse caratteristiche a seconda delle possibili esigenze di impiego, ha tra i suoi punti di forza un'elevata trasmissione delle radiazioni nel campo del visibile (91%), bassa trasmissione dell'infrarosso lungo (1%), elevata resistenza alla trazione, inerzia nei confronti dei pesticidi, basso coefficiente di dilatazione lineare e buona durata, non essendo soggetto ad alterazioni da agenti fisici o chimici.

Numerosi e diversi sono altrettanto i **materiali plastici** che sono utilizzati nella realizzazione delle serre, che possono essere suddivisi in:

- laminati flessibili o film plastici;
- polietilene (PE);
- cloruro di polivinile (PVC);
- etilvinilacetato (EVA);
- laminati semirigidi o ondulati;
- poliestere (vetroresina) (PRFV);
- polimetacrilato ondulato (vedrilser) (PMMA);
- lastre rigide o alveolari;
- policarbonato (PC);
- polimetalacrilato (vedril) (PMMA)

Nei materiali plastici la trasmissione delle radiazioni nel campo del visibile è in molti casi inferiore rispetto al vetro, con differenze ancora di più accentuate se si esamina la trasmissione della radiazione diffusa. Per quanto riguarda l'opacità alle radiazioni nel campo dell'infrarosso lungo il comportamento è generalmente analogo al vetro, ad eccezione dei film plastici, che hanno valori piuttosto elevati e comportano un "effetto serra" meno accentuato.

Tra i vantaggi che alcuni tipi di materiali plastici hanno sul vetro, possiamo citare invece la minore conducibilità termica e la maggiore leggerezza, che permette generalmente strutture più leggere ed economiche.

Anche nel caso della durata, i materiali plastici presentano caratteristiche dissimili a seconda del tipo: il policarbonato manifesta una diminuzione della trasparenza dopo alcuni anni (diminuzione del 10% in 5 anni), mentre il polimetacrilato può rimanere pressoché inalterato per 15 anni. I film plastici sono piuttosto fragili e soggetti a una rapida degradazione delle caratteristiche ottiche: la trasparenza diminuisce del 5 – 10% all'anno per cui la loro vita media è limitata a un massimo di 4 anni.

Indipendentemente dalla scelta del materiale di copertura è importante considerare nella valutazione del rendimento energetico di una serra la sua ermeticità. Tale caratteristica, come la solidità e la durata della serra, dipende da come è stato effettuato il fissaggio del materiale di copertura. Nelle serre sono comunemente utilizzati dei profili porta vetro metallici cui sono fissate in vario modo le lastre della copertura. Le soluzioni energeticamente più efficienti sono quelle che vedono la presenza dei profili metallici limitata e non direttamente esposta su entrambi i lati della copertura, per non dar luogo a possibili "ponti termici". A tale proposito, si ricorda che l'alluminio, se pur più leggero, ha una conducibilità termica circa tre volte maggiore rispetto all'acciaio.

Per avere maggiore ermeticità nelle coperture è frequente l'utilizzo di guarnizioni, profili para-aria e profili per i punti di giuntura delle lastre, che nel caso di materiali plastici caratterizzati da un

elevato coefficiente di dilatazione, possono anche risolvere il rischio di spaccature e deformazioni se le lastre sono perfettamente incastrate nella struttura di supporto.

2.7 Orientamento della serra

Lo studio dell'orientamento ottimale di una serra, è un aspetto fondamentale per captare la maggiore quantità di luce possibile durante l'inverno. Una buona luminosità all'interno di una serra velocizza la crescita delle piante e delle radici, aumentando la produttività e le fioriture e ritardandone la senescenza. Poiché nei materiali la trasmittività della radiazione solare è molto dipendente dall'angolo d'incidenza della radiazione stessa, la condizione migliore si verifica quando i raggi solari formano con la superficie della copertura della serra un angolo compreso tra i 45 e i 90°.

V.P. Sethi (2009), della Punjab Agricultural University, ha approfondito lo studio dell'orientamento e dell'irradianza solare incidente sulle pareti di cinque tipologie di serre (Figura 2-41), attraverso la realizzazione di un codice di calcolo che consente la determinazione dell'energia incidente su ogni superficie inclinata di ogni serra in base all'ora solare per tutti i giorni dell'anno.

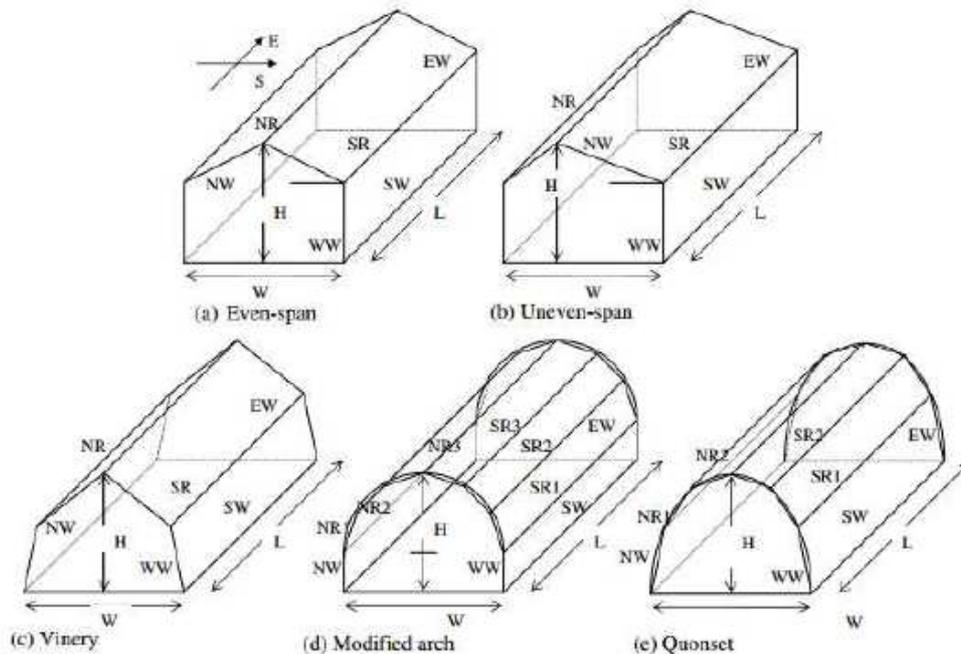


Figura 2-41: Modelli di serre considerati dall'Università di Punjab

Come si evince dalle figure seguenti (Figura 2-42, Figura 2-43), la geometria con il soleggiamento migliore è sempre quella a falde non simmetriche ("uneven-span"), seguita da quella a falde

simmetriche (“even-span”) e a copertura ellittica (“modified arch”), praticamente identiche, e per ultime a struttura “vinery” e a tunnel (“quonset”). Questa tendenza rimane costante per tutto l’anno ad ogni latitudine, ad eccezione dei soli periodi invernali a latitudini elevate (maggiori di 45° - 50°), dove a causa del ridotto angolo di incidenza dei raggi solari gli andamenti risultano praticamente equivalenti.

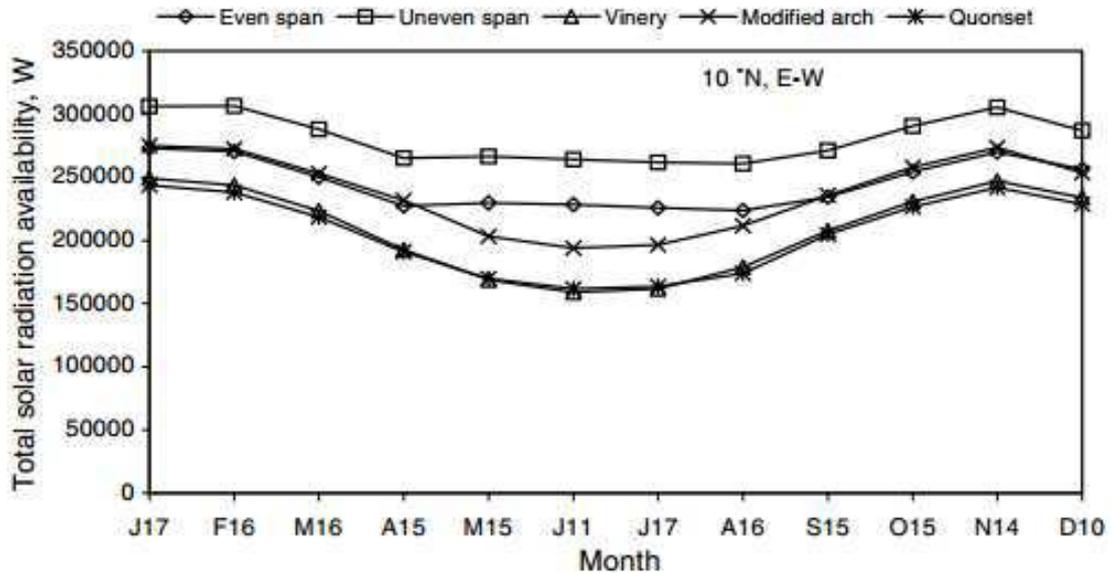


Figura 2-42: Confronto tra le tipologie di serre a 10°N di latitudine

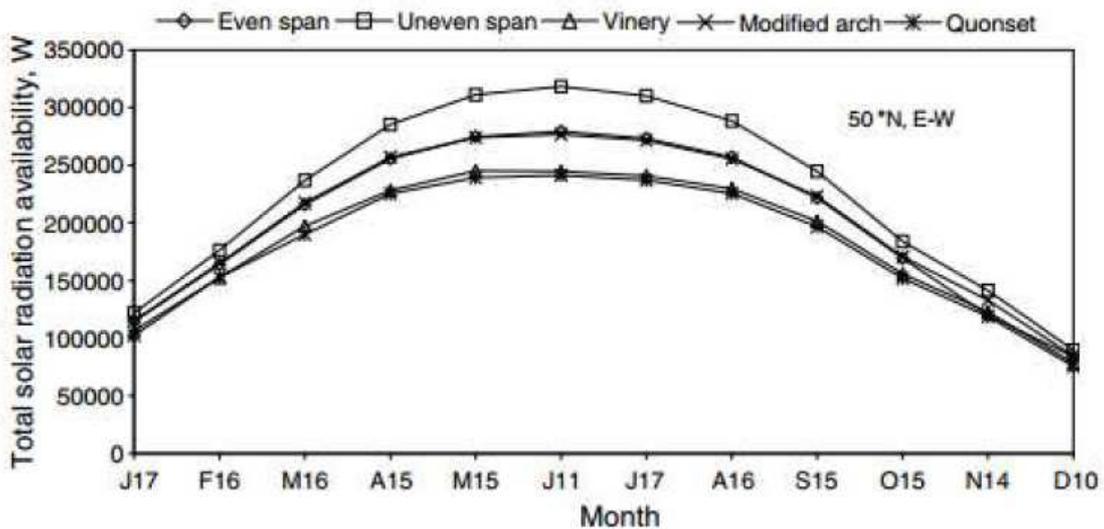


Figura 2-43: Confronto tra le tipologie di serre a 50°N di latitudine

La studio quindi prosegue con il confronto tra le orientazioni Est-Ovest e Nord-Sud, e verifica che alle nostre latitudini l’orientamento Est-Ovest permette di avere maggiore illuminazione da

ottobre a marzo, e l'orientamento Nord-Sud nel rimanente periodo. Questa analisi, valevole per qualsiasi tipologia di serra, è stata condotta dall'Università Indiana confrontando i dati di irradiazione incidente sulle pareti della medesima serra a doppia falda simmetrica, disposta a latitudini via via sempre maggiori. Come è evidente dal confronto visivo nelle figure che riportiamo in seguito, si è dimostrato che a latitudini vicine all'equatore l'orientamento Nord-Sud risulta quello che capta la maggiore quantità di radiazione solare (Figura 2-44), mentre a latitudini maggiori, come per esempio quella media europea di 45° - 50° Nord (Figura 2-45), è evidente una maggiore efficienza dell'orientamento Est-Ovest nel periodo invernale. Questo effetto della latitudine si accentua ulteriormente a latitudini ancora maggiori.

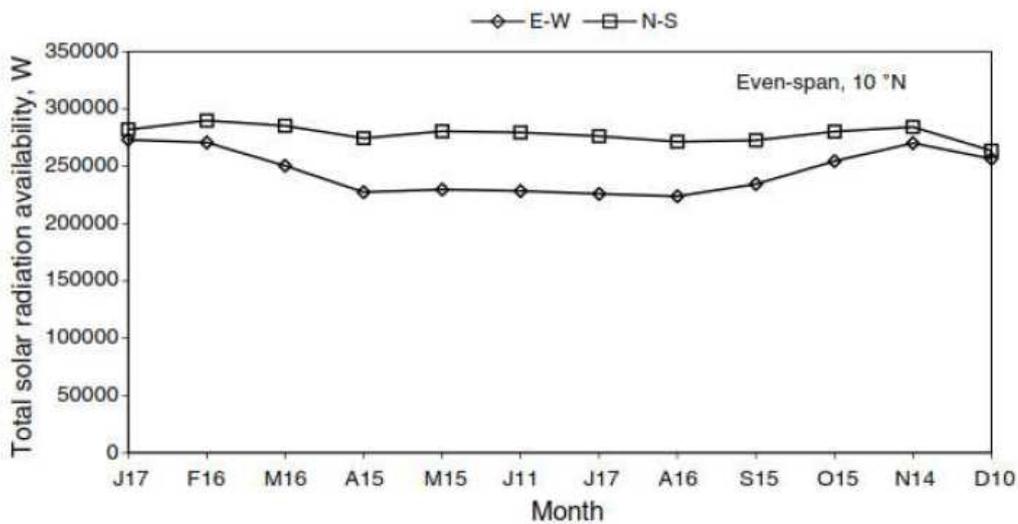


Figura 2-44: Confronto tra orientazione E-O e N-S di una serra a due falde a 10°N di latitudine

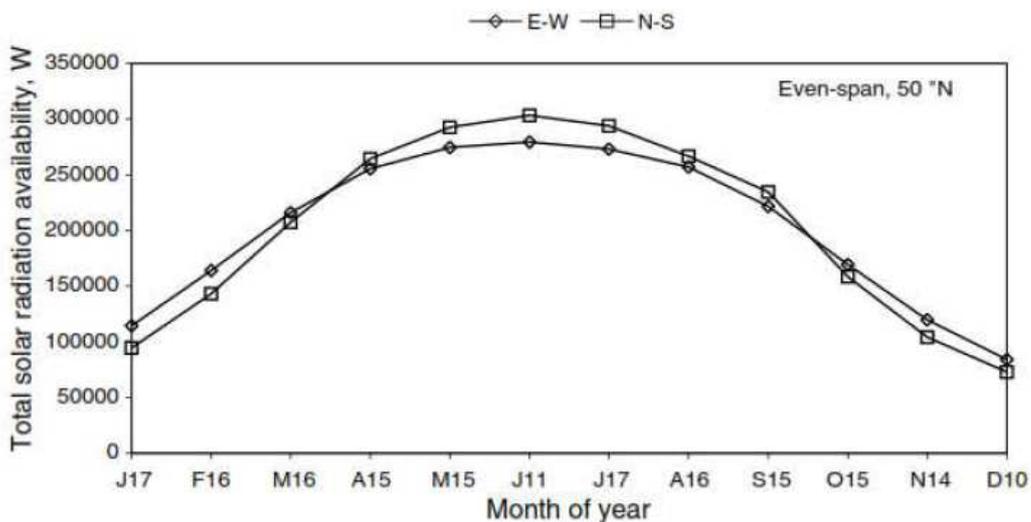


Figura 2-45: Confronto tra orientazione E-O e N-S di una serra a due falde a 50°N di latitudine

In conclusione, per stabilire quale orientamento sia più conveniente alle nostre latitudini è necessario conoscere l'utilizzo della serra: serre stagionali con colture invernali trovano nell'orientamento Est-Ovest senza dubbio la soluzione migliore; serre annuali con colture a più

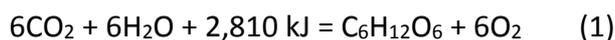
cicli, non trovando riscontri altrettanto inequivocabili nelle simulazioni, permettono una certa discrezionalità.

In quest'ultimo caso comunque, l'orientamento Est-Ovest generalmente è ancora la scelta migliore, perché presenta una maggiore captazione della radiazione solare durante il periodo invernale e allo stesso tempo ne limita la ricezione durante l'estate, quando prevale la necessità di raffrescare e si presenta il rischio di seccare le colture per l'eccessivo soleggiamento.

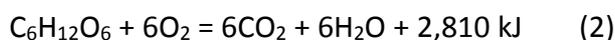
2.8 Principali parametri bioclimatici per il sistema serra

Uno dei compiti principali nella costruzione di una serra è quello di ottimizzare le condizioni per lo sviluppo delle piante, in genere durante il periodo fuori stagione da produzione normale in campo aperto. I fattori "interni" o climatici della serra necessari per lo sviluppo ottimale delle piante coinvolgono fotosintesi e respirazione.

Riprendendo quanto approfondito nei capitoli precedenti, la fotosintesi, o processo attivo, è la formazione di anidride carbonica attraverso radiazione solare e può essere espresso dalla seguente equazione di bilancio semplificata:



La foto respirazione è al contrario espressa dall'equazione seguente:



Queste equazioni non rappresentano la situazione reale, che è più complicata, ma possono essere utilizzati per definire l'aspetto energetico relativo alle condizioni bioclimatiche della serra: trasporto di acqua, separazione di CO_2 e apporto energetico, insieme alla creazione di clorofilla e O_2 che risultano dall'apporto di luce naturale o artificiale.

Non è possibile comprendere richieste energetiche della serra al fine di calcolare le esigenze in termini di energia termica o frigorifera, senza la conoscenza essenziale del "clima serra". Questo clima è composto da parametri che sono variabili e interdipendenti, e sono influenzati dai cambiamenti climatici esterni, dal livello di sviluppo delle piante e di altri fattori.

In linea di principio, quattro fenomeni fisici sono responsabili delle differenze tra clima all'interno della serra e le condizioni climatiche esterne:

- a. **La radiazione solare**, in particolare le onde corte, penetra la copertura della serra in vetro o plastica che sia praticamente senza alcuna perdita. Raggiunta la superficie del suolo, la pianta, l'impianto di riscaldamento, ecc, la radiazione diventa ad onde lunghe, e non può più attraversare la copertura, o con difficoltà. La maggior parte della radiazione è intrappolata nel volume della serra, aumentando la temperatura interna;
- b. L'**aria** racchiusa all'interno della serra è stagnante: la velocità dell'aria interna è molto minore di quella esterna e gli effetti sullo scambio termico sono completamente diversi;

- c. La **concentrazione di massa vegetale** nel volume della serra è molto superiore a quella esterna. Un controllo di umidità e condensa (non naturali) chiaramente crea diversi meccanismi di trasferimento di massa rispetto all'esterno della serra, e
- d. La presenza di riscaldamento e altri **impianti** cambia alcune caratteristiche energetiche del clima serra.

Tenendo conto del vero significato delle equazioni (1) e (2), ed i fenomeni fisici associati, è possibile semplificare la definizione del clima serra e affermare che è un processo fisico di carattere prevalentemente energetico. I processi principali sono il trasporto di acqua tra lo strato vegetale, l'aria ed il suolo nella serra, la composizione e la degradazione della clorofilla sotto l'influenza della luce solare, del bilancio energetico e dei flussi di CO₂ e O₂. I valori di questi parametri, le loro interdipendenze e variazioni determinano le condizioni limitanti e le caratteristiche del clima serra.

2.8.1 Intensità luminosa

La luce è il parametro più significativo per lo sviluppo e la sopravvivenza della pianta.

Quando si parla di luce naturale, che significa luce solare, è necessario distinguere

- La radiazione solare con l'influenza diretta sui processi biologici delle piante, e
- La radiazione solare di carattere energetico con influenza diretta o indiretta sulle piante attraverso l'influenza dell'ambiente.

Solo la parte del totale spettro solare compresa tra i 400 e 700 nm influenza in modo significativo i processi vitali delle piante. Conseguenza diretta di tale fenomeno è la scelta del materiale trasparente coprente la struttura della serra, che deve essere il più possibile e a questa banda dello spettro solare.

L'intensità della parte dello spettro totale della radiazione solare importante energeticamente (cioè, quella infrarossa) offre l'energia necessaria per la pianta (Equazione 1). A seconda della sua intensità, i processi vitali della pianta sono più o meno favoriti. Fino ad alcuni livelli caratteristici (diversi per le diverse specie) i processi vitali aumentano le loro attività; ma, dopo un certo punto, iniziano a diminuire. Al di sotto ed al di sopra dei suddetti livelli caratteristici di intensità di luce, non vi è alcuna attività vitale nella pianta. Al di sotto, poiché i processi vitali hanno bisogno di luce per essere attivati. Al di sopra, perché la pianta è "surriscaldata" e vengono dunque attivati processi di "raffreddamento".

Per migliorare le condizioni di illuminamento, viene utilizzata la luce artificiale quando quella naturale non è disponibile o sufficiente, oppure viene ombreggiato quando l'intensità della luce naturale è troppo alta. L'intensità della luce influenza anche i valori degli altri parametri del clima serra.

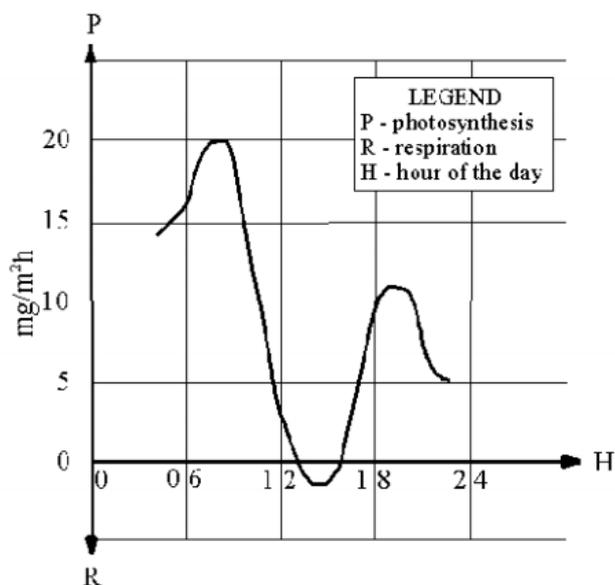


Figura 2-46: Andamento dell'attività fotosintetica durante un giorno tipico della stagione estiva (Kamenev, 1975)

2.8.2 Temperatura dell'aria

La temperatura dell'aria influenza il bilancio energetico dello strato vegetale attraverso lo scambio di energia termica convettiva attraverso foglie e fusti. A seconda delle caratteristiche di diffusione dell'aria all'interno della serra è maggiore o minore la differenza di temperatura tra l'ambiente interno e la pianta stessa. Il livello ottimale della temperatura dell'aria nella serra dipende dall'attività di fotosintesi della pianta in questione, in relazione all'intensità della radiazione solare ceduta (cioè per ogni livello di intensità luminosa, c'è una temperatura dell'aria (foglia) ottimale, associata alla massima attività fotosintetica).

Data la natura mutevole del clima serra, non è possibile fornire la temperatura dell'aria "ottimale" per alcune piante a causa interdipendenze dell'intensità luminosa e altri parametri del clima serra. Le prove per estrapolare relazioni indicanti temperature o intervalli di temperatura ottimali (es. Tabella 2-8) non dovrebbero essere intesi come strumento per la determinazione del "clima perfetto" all'interno della serra, ma piuttosto come punto di partenza per le scelte in fase di progettazione e per il calcolo del fabbisogno termico e consumi della serra.

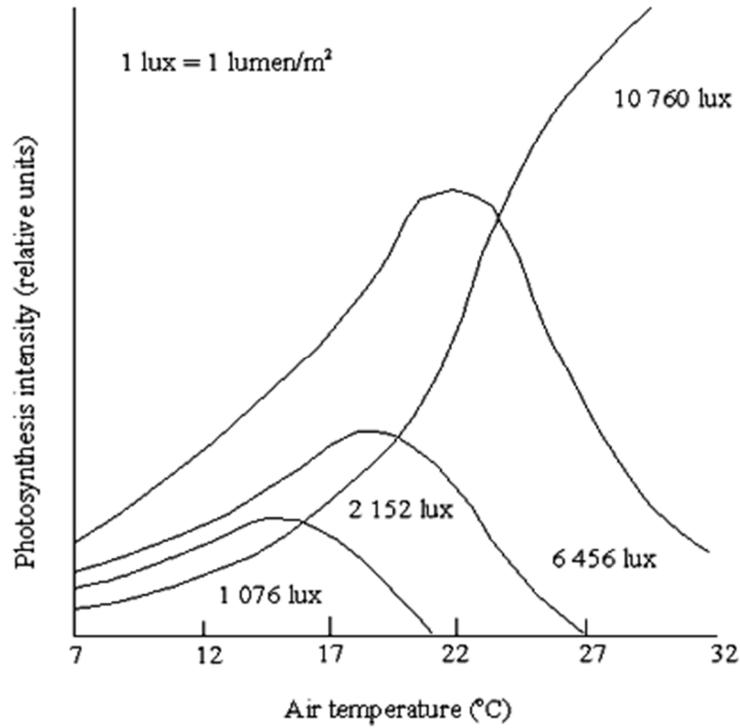


Figura 2-47: Attività fotosintetica al variare di luce e temperatura dell'aria per il pomodoro (Kamenev, 1975)

Vegetable	Inside Air Temperature (°C)							Relative Humidity of the Air (%)
	Germination	Development			Harvesting		Young Plants	
		Day*	Day*	Night	Day	Night		
Cucumbers	17-18	22-25	27-30	17-18	25-30	18-20	13-15	85-95
Watermelon and melons	17-18	22-25	27-30	17-18	25-30	18-20	13-15	65-75
Tomatoes, apple, paprika, and beans	10-12	20-22	25-27	10-13	22-28	15-17	8-10	50-60
Lettuce, celery and garlic	8-9	17-18	20-26	8-12				70-80
Spinach and parsley	8-9	15-16	20-21	8-9				70-80
Radish and cabbage	6-7	12-13	16-18	7-8				65-75

* Inside design temperature ranges for different crops.

Tabella 2-8: Esempio di intervalli ottimali di temperatura per alcune colture

2.8.3 Temperatura del terreno (o substrato)

Anche la temperatura del terreno, o della base di una pianta, influenza il bilancio energetico della chioma delle piante. L'influenza è data dagli scambi termici per conduzione con la struttura del suolo e per convezione tra le radici delle piante e il flusso d'acqua che li circonda. Attraverso un gran numero di esperimenti e ricerche, si è dimostrato che:

- La temperatura ottimale del terreno (o base) dipende dallo stadio di sviluppo della pianta in questione (Tabella 2-9)
- La temperatura ottimale del terreno (o base) dipende dalla intensità della luce disponibile
- La temperatura del suolo (o base) influenza il valore della temperatura dell'aria ottimale (ossia, una temperatura del suolo maggiore richiede una temperatura dell'aria minore, e viceversa).

Phase of Development	Optimal Soil Temperature Intervals	
	Low Intensity of Light (°C)	Strong Intensity of Light (°C)
Development before flowering	13-14	17-20
Flowering	15-16	19-22
Harvesting	20-22	23-25

Tabella 2-9: Temperatura ottimale del terreno per il pomodoro

È necessario sottolineare che allontanarsi dai valori ottimali influenza lo sviluppo dell'apparato radicale della pianta, la capacità produttiva e la qualità del prodotto. Portarsi a valori inferiori significa diminuire la produzione mentre andare a valori più alti significa essiccamento dell'apparato radicale, e di conseguenza riduzione della capacità produttiva e della qualità dei prodotti. Pertanto, conoscendo la natura e le esigenze delle piante, è possibile influenzare significativamente il consumo di calore di una serra attraverso l'equilibrio tra le temperature dell'aria e del suolo durante la coltivazione delle piante.

2.8.4 Concentrazione di CO₂

La concentrazione di CO₂ in atmosfera normale è di circa 0,035%. Nel caso di una camera chiusa sotto l'influenza di un'elevata intensità luminosa e, di conseguenza, elevata attività foto sintetica (Equazione 1), esso cambia rapidamente. Durante un giorno ben illuminato, la sua concentrazione

può diminuire al 0,01% in solo un paio di ore in una serra stretta e ben progettata. Poiché la CO₂ partecipa attivamente dell'assimilazione clorofilla, è un parametro di cruciale importanza per la serra. Anche in questo caso attraverso un lungo processo di sperimentazione e ricerca, si è dimostrato che:

- In condizioni di temperatura di serra costante, la concentrazione di CO₂ influenza direttamente l'intensità dell'attività fotosintetica,
- La concentrazione ottimale di CO₂ in serra dipende direttamente dall'intensità della luce disponibile

La letteratura evidenzia che per esempio attraverso la ventilazione di una serra chiusa con un ricambio di aria di circa 5-6 vol/h, è possibile mantenere una concentrazione CO₂ pari allo 0,02%. Si tratta di un compromesso, perché valori ricambi d'aria di 9-10 vol/h permettono di mantenere una concentrazione dello 0,035%, ma questo influenza significativamente il consumo di energia termica della serra. Le condizioni climatiche dell'Europa Centrale e Nordoccidentale richiedono l'uso di misure artificiali per mantenere la necessaria concentrazione di CO₂ ottimale; ma, nelle regioni meridionali, una ventilazione controllata di solito è sufficiente.

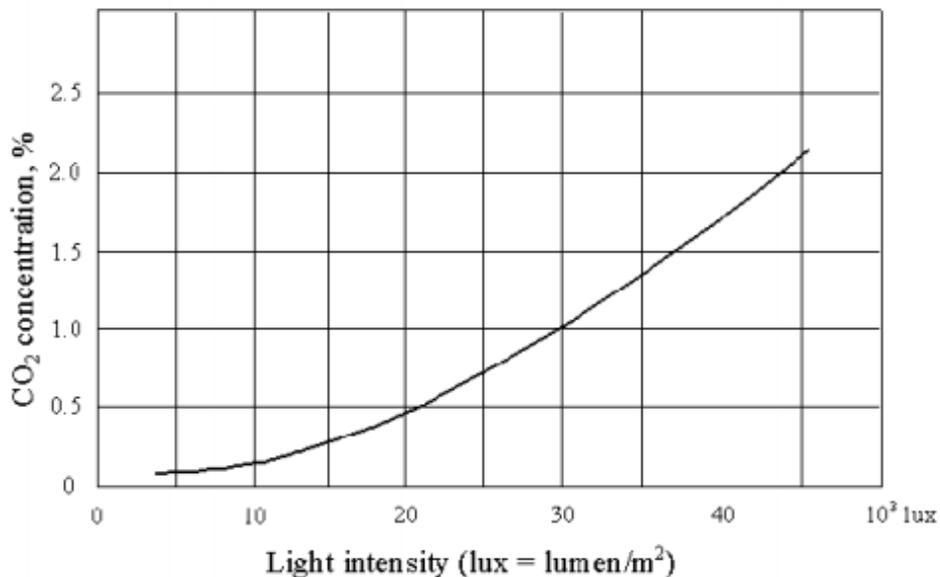


Figura 2-48: Concentrazione ottimale di CO₂ in serra in funzione dell'intensità luminosa

2.8.5 Circolazione dell'aria interna

Le caratteristiche e la velocità di diffusione dell'aria all'interno della serra condiziona:

- Lo scambio termico tra superficie vegetale ed aria ambiente,
- Il trasporto d'acqua tra superficie vegetale ed aria ambiente.

Allo stesso tempo, entrambi i processi sono collegati direttamente al bilancio energetico della superficie vegetale, e conseguentemente ai processi vitali al suo interno. Si è constatato che velocità dell'aria tra 0,2 e 0,7 m/s portano a valori di scambio termico ottimali se il flusso d'aria è verticale (cioè dal basso verso l'alto). Con alcuni tipi di impianti di riscaldamento, è facile ottenere questa condizione ma, nella maggior parte dei casi, ne risente il consumo di calore della serra. Prima di effettuare la scelta finale dell'impianto di riscaldamento per una serra, è molto importante indagare sui lati positivi e negativi connessi alle caratteristiche di circolazione dell'aria all'interno serra.

2.8.6 Trasporto dell'acqua (diffusione di materia)

la diffusione del contenuto d'acqua dalla superficie vegetale della pianta e l'ambiente è uno dei parametri più importanti dell'attività fotosintetica (Equazione 1). È stato dimostrato che dipende principalmente da:

- L'intensità luminosa disponibile;
- La temperatura dell'ambiente,
- Le caratteristiche delle radici della pianta, in combinazione con la "capacità" della base della coltivazione di fornire la quantità di acqua necessaria, ma anche dall'umidità dell'aria dell'ambiente attorno alla pianta.

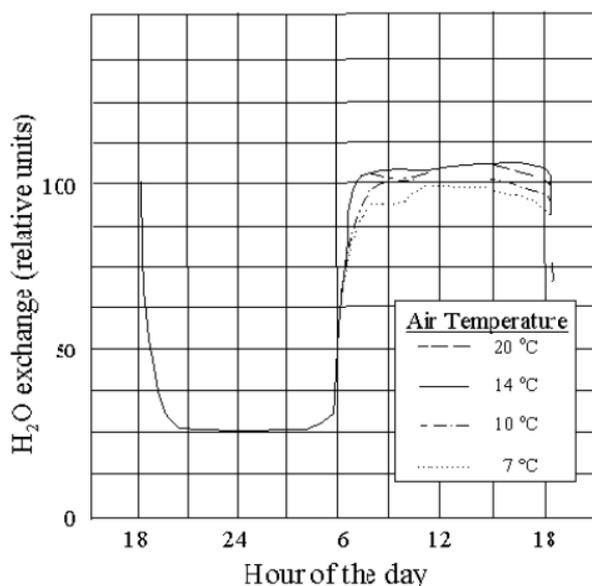


Figura 2-49: Traspirazione dell'acqua in piante di pomodori prima della fioritura

Gli ultimi parametri sono di particolare interesse, in quanto influenzano le caratteristiche climatiche nella serra. Esiste una relazione diretta tra l'umidità dell'aria e dell'umidità del suolo (substrato artificiale di base) in una serra. L'umidità dell'aria influenza direttamente la traspirazione delle foglie delle piante. Intervalli ottimali sono piuttosto ristretti e difficili da

raggiungere in un ambiente chiuso, piena di coltivazioni con elevati livelli di traspirazione. Valori di umidità inferiori significano essiccamento della pianta e produzione ridotta. Al contrario valori di umidità superiori producono più foglie, qualità inferiore dei frutti e innalzamento alla sensibilità a differenti patologie nelle piante. L'intensità del traspirazione dell'acqua nelle piante dipende direttamente dall'intensità luminosa (Curve PTE condizioni di luce esterna)). Normalmente è minore in serra ed è collegata alla trasmittanza dei materiale (Curve ETP condizioni interne di luce). A seconda della fase di sviluppo delle radici delle piante e dell'umidità dell'aria nell'ambiente chiuso, la traspirazione d'acqua reale è minore anche di quella interna (Curva reale ETP).

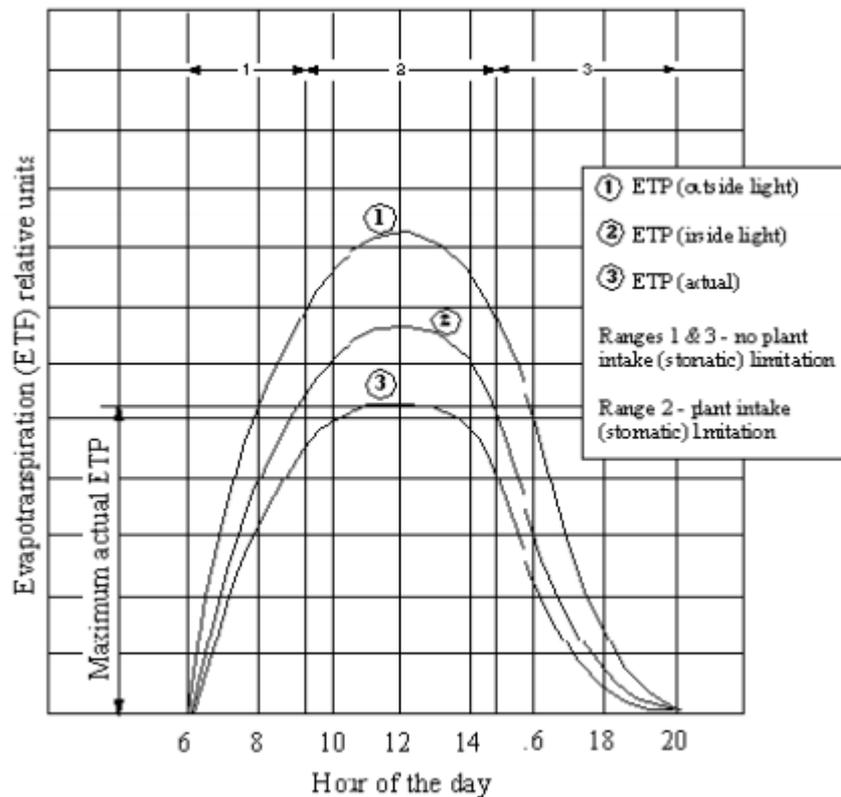


Figura 2-50: Evapotranspirazione potenziale in serra (Dogniaux, Nisen, 1975).

2.9 Le esigenze colturali delle principali specie floricole e orticole

Una serra deve essere progettata e costruita considerando le caratteristiche ambientali del luogo in cui sarà posizionata e quindi in modo da sfruttare il più efficientemente possibile quanto è offerto da tale ambiente. Inoltre il monitoraggio e controllo dei fattori ambientali di rilievo è determinante per l'ottenimento delle caratteristiche volture per la coltura in oggetto.

Tra i fattori principali da tenere in considerazione vi sono:

- Temperatura
- Radiazione
- Umidità relativa
- Composizione dell'atmosfera

Le piante sono individui peciclotermi, ciò significa che per ogni coltura bisogna tener conto di:

- Temperatura ottimale
- Temperature cardinali (max e min)
- Temperature critiche
-

Inoltre opportuna distinzione andrà fatta tra le specie *macroterme* e *microterme*.

Il fattore temperatura può avere influenza sulla distribuzione delle specie nei differenti areali geografici, influenza sullo sviluppo e la crescita delle colture, ed influenza le reazioni metaboliche e fisiologiche.

Temperature troppo alte possono portare ad un rapido sviluppo a discapito di una riduzione della qualità del prodotto, identificabile per esempio con:

- Steli più lunghi
- Steli più sottili
- Fiori più piccoli
- Germogli ciechi (rose)
- Aborto delle gemme
- Mancata apertura dei fiori
- Bruciatura delle foglie
- Clorosi
- Necrosi

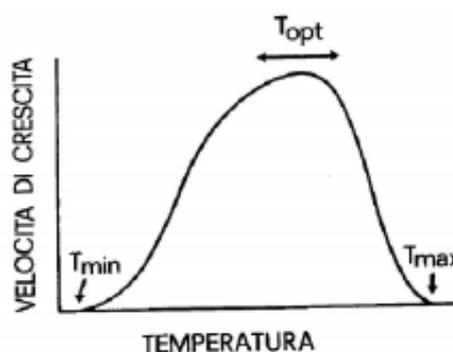


Figura 2-51: Velocità di crescita di una coltura in funzione della temperatura

La temperatura media è parametro fondamentale per il controllo della crescita delle piante: controlla il tasso di sviluppo delle piante, è un possibile strumento per la programmazione dei cicli di alcune specie, soprattutto quelle non dipendenti dal fotoperiodo. Inoltre la relazione tra temperatura e radiazione porta effetti congiunti sulle piante non trascurabili, ad esempio:

- Basse intensità radiative → crescita debole; il fenomeno è accentuato tanto più è alta la temperatura
- Alte temp. medie giornaliere → possono causare ritardo dell'iniziazione a fiore
- Basse temp. medie giornaliere → possono indurre prematura iniziazione fiorale e dormienza.

La differenza di temperatura tra giorno e notte è direttamente collegata all'altezza delle piante (allungamento internodo). Nella di seguito un esempio:

Temp giorno	Temp notte	Media	DIF	Valore	Altezza piante
16	10	13	6	positivo	ALTE
13	13	13	0	nullo	MEDIE
10	16	13	-6	negativo	BASSE

Tabella 2-10: Esempio di correlazione tra temperatura media giorno/notte e altezza delle piante in coltura protetta

Nel caso in esempio si otterrà che essendo la temperatura media giornaliera è di 13°C in tutti i casi tutte le piante fioriranno allo stesso tempo e avranno lo stesso numero di foglie, però si avranno piante disponibili sul mercato al medesimo periodo, ma con tre altezze diverse. La differenza di temperatura media giorno/notte ha dunque effetto sulla lunghezza degli internodi e non sul numero di nodi.

Ulteriore parametro di rilevanza è la radiazione. La radiazione può essere definita con tre parametri, ossia qualità, intensità e durata della radiazione; la combinazione di tali parametri determina comportamenti specifici delle piante.

Due importanti fenomeni correlati radiazione luminosa sono i seguenti:

- Fotomorfogenesi: fenomeno che induce crescita e sviluppo delle piante in funzione della radiazione luminosa percepita dalle stesse a livello di fotorecettori specifici: Es. fitocromo, crittocromo
- Fototropismo: Fenomeno che induce le piante a crescere, per distensione cellulare, in favore della direzione prevalente della luce

Si possono inoltre distinguere le specie in funzione della *durata* del periodo di illuminazione (fotoperiodismo) tra:

- Specie LONGIDIURNE: fase vegetativa → fase riproduttiva se periodo illuminazione > 14 ore
- Specie BREVIDIURNE: fase vegetativa → fase riproduttiva; se periodo illuminazione < 12 ore
- Specie NEUTRODIURNE o FOTOINDIFFERENTI

Si possono in aggiunta distinguere le specie in funzione della necessità di luce (*intensità*) tra:

- Specie ELIOFILE: richiedono elevate intensità luminose
- Specie SCIAFILE: richiedono limitate intensità luminose [sciafilia, disposizione a vivere all'ombra]

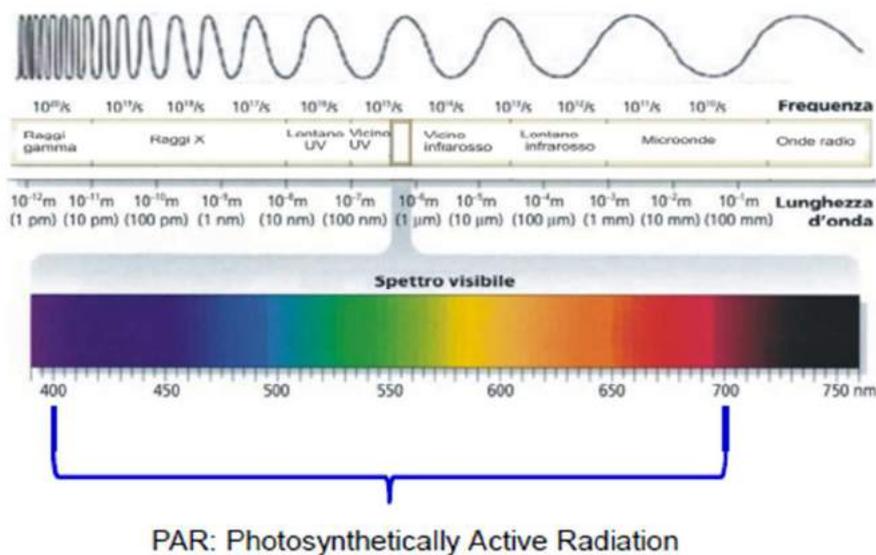


Figura 2-52: Spettro della radiazione (indice di "qualità" della radiazione)

Il PAR è Fondamentale per la fotosintesi e per risposte fotomorfogeneti delle specie, ad esempio:

- solo radiazione blu: piante compatte con tessuti rigidi e di colore scuro
- solo radiazione rossa: piante con tessuti teneri, internodi allungati e sviluppate in altezza.
- Luce rossa (IR corto): piante nane con colore verde intenso e ben ramificate
- Luce rossa (IR lungo): distensione internodi, incremento della taglia delle foglie, riduce la ramificazione, riduce il colore dei fiori e delle foglie.

Un'intensità troppo elevata di radiazione può portare a macchie di bruciatura sulle foglie, perdita del colore dei fiori, ecc, mentre un'intensità troppo bassa porta ad allungamento delle piante, a cattiva qualità, ridotta produttività, ridotta resa, ridotta durata post-raccolta.

Andrà inoltre considerato che la radiazione incidente all'esterno della serra sarà differente da quella percepita all'interno dalle colture, per cui di seguito un elenco di fattori fondamentali che influenzano l'irradianza all'interno della serra:

- Tipologia materiale di copertura
- Età materiale di copertura (stabilizzanti)
- Fotoselettività materiale
- Pulizia materiale di copertura
- Angolo di incidenza della copertura
- Orientamento della serra
- Forma della serra
- Strutture componenti lo scheletro della serra

[8] [11] [13] [14] [15] [16] [17] [19]

3 Controllo climatico ed energie rinnovabili per serre

3.1 Controllo climatico

3.1.1 Introduzione

L'agricoltura in se è essa stessa un processo di conversione di energia, cioè la conversione dell'energia solare attraverso la fotosintesi in energia alimentare per l'uomo e mangimi per animali. L'agricoltura primitiva includeva poco più dello spargere semi sul terreno con scarsi rendimenti. L'agricoltura moderna richiede un apporto di energia in tutte le fasi della produzione agricola come l'uso diretto di energia nelle macchine agricole, la gestione delle acque, l'irrigazione, la coltivazione e la raccolta. L'uso dell'energia nella fase post-raccolta comprende l'energia per l'industria alimentare, stoccaggio e nel trasporto ai mercati. In aggiunta, ci sono molti input energetici indiretti o remoti utilizzati in agricoltura in forma di concimi minerali e di pesticidi chimici, insetticidi ed erbicidi.

Negli ultimi anni, i ricercatori hanno studiato un gran numero di tecniche di riduzione dei consumi energetici per la climatizzazione delle serre e dei sistemi di coltivazione tramite studi, simulazioni e sperimentazioni. La maggior parte delle tecniche di risparmio energetico è stata sviluppata sia per ridurre la temperatura dell'aria interna che per migliorare l'isolamento della serra senza compromettere la produzione vegetale. Sembra ormai assodato che il consumo di energia da fonte fossile per la climatizzazione di serre dedicate ad attività ortofloricola può essere diminuito con diversi apporti, di cui i più importanti sono: il miglioramento dell'efficienza energetica dei sistemi di riscaldamento e di raffreddamento, l'applicazione di tecnologie ad energie rinnovabili, le tecniche di isolamento e la corretta manutenzione de sistemi e strutture di climatizzazione.

Per sostenere l'innovazione delle serre in Italia, tuttavia, ENEA effettuata a livello nazionale alcune valutazioni specifiche per definire i consumi energetici in termini di riscaldamento, raffreddamento ed elettricità. In sintesi, è stato calcolato un consumo totale di energia associata a produzione in serra pari a 0,73 Mtep che potenzialmente equivale a circa 2,06 Mton di emissioni di CO₂. Una raccolta dati a livello internazionale, nazionale e regionale, più approfondita, è riportata nell'apposito capitolo all'interno del Volume.

Climate area (days-degrees)	Green-houses (ha)	Heating (MWh)	Cooling (MWh)	Electric consumption (MWh)
B (Sicily, Sardinia)	2200	220000	42768	14331
C (Campania, Latium)	3000	4312500	28350	19542
D (Liguria, Tuscany)	400	870000	1800	2606
E (Veneto)	400	1050000	864	2606
TOTAL	6000	8432500	73782	39085
TOE		706786	16232	8598

Tabella 3-1: Stima dei consumi energetici di combustibili fossili per importanti zone d'Italia

Total area greenhouses (ha)	Total annual consumptions (MWh)	TOE	CO ₂ emissions (Tons)
6000	8545366	731617	2055842
* Conversion factor utilized for the tables above reported: 0.0860 TOE/MWh; 0.201 TOE/MWhe. 1 TOE equal to 2.81 tons of CO ₂ emissions. Source: AEEG (The Regulatory Authority for Electricity and Gas) 2009.			

Tabella 3-2: Consumo energetico totale ed emissione di CO₂ per la serricoltura in Italia

L'efficienza energetica in agricoltura è generalmente definita come il consumo diretto di energia per unità di produzione "fisica". Poiché il rapporto di energia utilizzata per unità di produzione può essere migliorata sia aumentando la produzione che riducendo l'apporto di energia, si deve prestare attenzione alla riduzione dei consumi di energia per i sistemi di climatizzazione.

Pertanto, al fine di limitare la domanda di energia, è di primaria importanza una corretta gestione sia del sistema di climatizzazione in relazione al processo produttivo della coltivazione in serra. Dunque, per soddisfare l'obiettivo generale di riduzione della domanda di energia senza compromettere il valore economico della produzione vegetale, una serie di misure e parametri fisiologici sono stati identificati.

3.1.2 Criteri base

La climatizzazione delle serre è inevitabilmente correlata alle colture presenti all'interno di esse. Trattarne a caratteri generali è pertanto piuttosto difficile, poiché è ovvio aspettarsi, ad esempio per serre dedicate a floricoltura, livelli di climatizzazione notevolmente differenti a seconda che si tratti di orchidee tropicali o tulipani. Risulta quindi di primaria importanza, ancor prima di intraprendere la fase progettuale di un eventuale impianto di climatizzazione, conoscere per ogni specie che si desidera coltivare i livelli termici minimi ed ottimali per lo sviluppo delle colture. I principali di questi, riportati a titolo di esempio per colture da orto nella Tabella 3-3, sono:

Specie orticole	Temperatura min. letale	Temperatura min. biologica	Temperatura ottimale		Temperatura max. biologica	Temperatura germinazione	
			Giorno	Giorno		Giorno	Giorno
Pomodoro	0 - 2	8 - 10	22 - 26	22 - 26	26 - 30	22 - 26	22 - 26
Cetriolo	0 - 4	10 - 13	24 - 28	24 - 28	28 - 32	24 - 28	24 - 28
Zucca	0 - 4	10 - 12	24 - 30	24 - 30	30 - 34	24 - 30	24 - 30
Fagiolo	0 - 2	10 - 14	21 - 28	21 - 28	28 - 35	21 - 28	21 - 28
Peperone	0 - 4	10 - 12	22 - 28	22 - 28	28 - 32	22 - 28	22 - 28
Melanzana	0 - 2	9 - 10	22 - 26	22 - 26	30 - 32	22 - 26	22 - 26
Lattuga	-2 - 0	4 - 6	15 - 20	15 - 20	25 - 30	15 - 20	15 - 20
Fragola	-2 - 0	6	18 - 22	18 - 22	-	18 - 22	18 - 22

Tabella 3-3: Livelli termici minimi e ottimali per alcune colture da orto

- **T minima letale:** probabile morte delle piante in caso di lunga durata;
- **T minima biologica:** interruzione della vita vegetativa;
- **T ottimale di notte e giorno:** condizioni standard da mantenere in inverno;
- **T massima biologica:** oltre la quale la coltura manifesta diminuzione di crescita.

Note le condizioni di temperatura e umidità da mantenere all'interno della serra e le caratteristiche climatiche esterne, il fabbisogno termico è calcolato analogamente a quello degli altri edifici, tenendo conto di:

- Dispersione per trasmissione attraverso pareti e suolo;
- Dispersioni per ventilazione;
- Dispersioni per irraggiamento sulla frequenza dell'infrarosso lungo;
- Dispersioni per vaporizzazione della condensa superficiale di piante e suolo;
- Apporti solari;
- Apporti gratuiti interni dovuti a illuminazioni, macchinari o persone.



Figura 3-1: Rappresentazione del sistema serra dal punto di vista dei fenomeni legati al bilancio energetico

La risultante di tutti questi contributi corrisponde al carico termico necessario per riscaldare o raffreddare la massa d'aria del locale serra. La scelta del tipo d'impianto da adottare è complessa ed è condizionata da ragioni che non sono solo di ordine tecnico, ma anche e soprattutto di carattere economico; infatti, non esiste un impianto di riscaldamento ideale, ma quello che meglio soddisfa le esigenze del coltivatore in base all'ambiente in cui si trova a operare, al tipo di coltivazione e alla tipologia costruttiva della serra.

3.1.3 Climatizzazione invernale

In linea generale, l'impianto di riscaldamento dovrebbe garantire un livello uniforme di temperatura all'interno della serra, con un ridotto movimento delle masse di aria, e flessibilità di funzionamento, per assecondare le esigenze di ogni tipo di coltura e le variazioni dei sensori di controllo.

Le tipologie d'impianto più utilizzate, prevedono:

- **Generatori ad aria calda**, anche di piccole dimensioni e dotati di ruote che ne permettono lo spostamento all'interno della serra;
- **Generatori ad acqua**, richiedono un impianto di distribuzione;
- **Generatori combinati**.

Trattasi comunque di caldaie tradizionali, con bruciatori che agiscono su un focolare, e con scambiatori di calore che permettono il riscaldamento di aria o di acqua, che è fornita all'impianto di distribuzione.

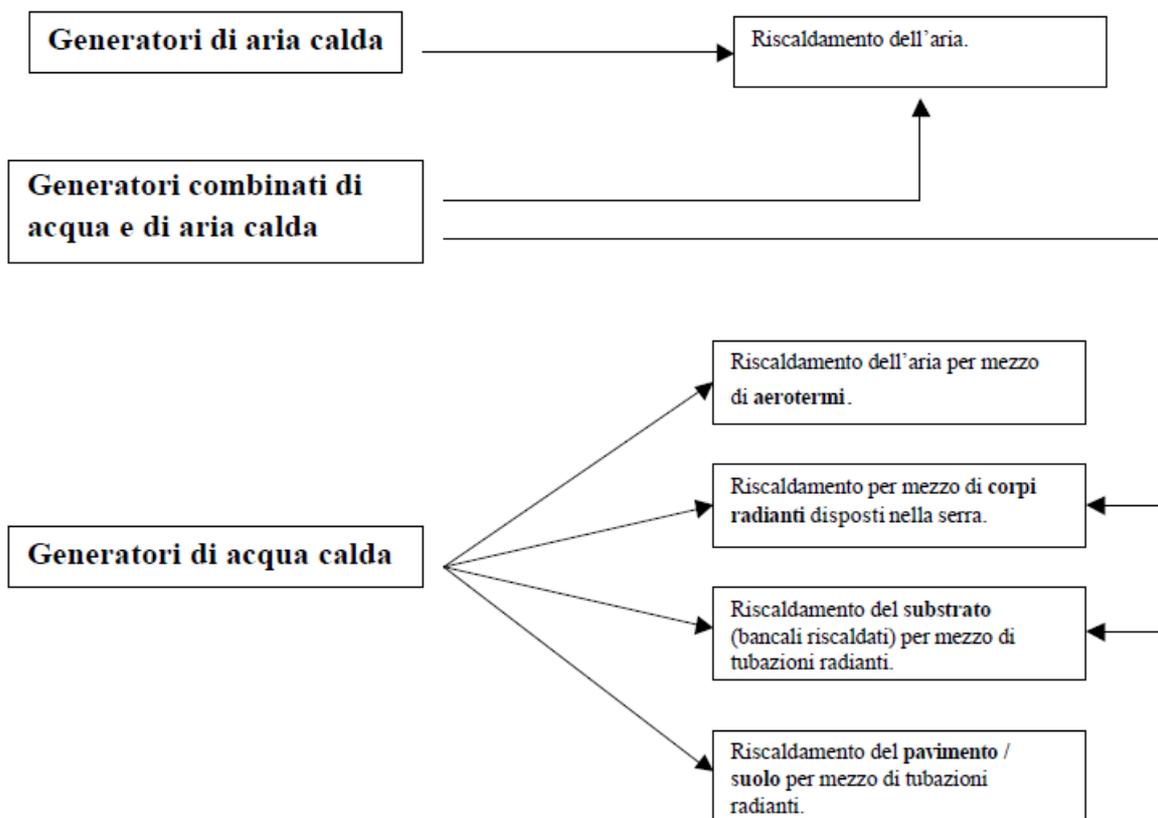


Figura 3-2: Tipologie d'impianto di climatizzazione per serre più comuni

Nel seguito sono riportati sinteticamente vantaggi e svantaggi per ogni impianto di distribuzione:

- **Aerotermini:** possono essere di tipo verticale o orizzontale e di solito immettono negli ambienti aria con temperatura non superiore ai 35°C; sono rapidi, flessibili nel loro funzionamento e poco costosi, ma generalmente non consentono ottimali distribuzioni di temperatura a causa del ristagno dell'aria calda in alto soprattutto in serre alte, e sono poco efficienti rispetto ad altri sistemi di distribuzione a parità di calore trasmesso;
- **Corpi radianti:** similmente ai caloriferi domestici, si tratta di corpi costituiti da tubazioni di acciaio o polietilene ad alta densità, in cui il fluido entra di solito a 80 - 85°C con ΔT consigliato di 15°C; i corpi radianti possono essere disposti in vario modo: in alto, lungo le pareti laterali oppure poggiati sul terreno in prossimità delle piante, con quest'ultima che rappresenta la soluzione migliore per la distribuzione uniforme del calore. Rispetto ai generatori di aria calda, tale tipologia d'impianto richiede un elevato investimento iniziale, con costi di gestione elevati e minor flessibilità d'impiego.
- **Riscaldamento del substrato:** questo sistema consente uno sviluppo ottimale delle piante, una loro maggiore precocità, mediante l'utilizzo di fluido termovettore a bassa temperatura (25 - 35°C), con una conseguente riduzione delle dispersioni di calore, poiché l'impianto crea un microclima ideale a ridosso delle coltivazioni e la temperatura dell'aria può essere mantenuta a un livello più basso. Laddove le colture consentano questa tipologia di riscaldamento, questi sistemi vengono a loro volta suddivisi in:
 - *riscaldamento a pavimento:* esistono due possibili soluzioni (schematizzate in Figura 3-3): con soletta in calcestruzzo con i tubi annegati all'interno; con manufatti autobloccanti di cemento armato sopra un letto di sabbia nel quale sono alloggiati i tubi.

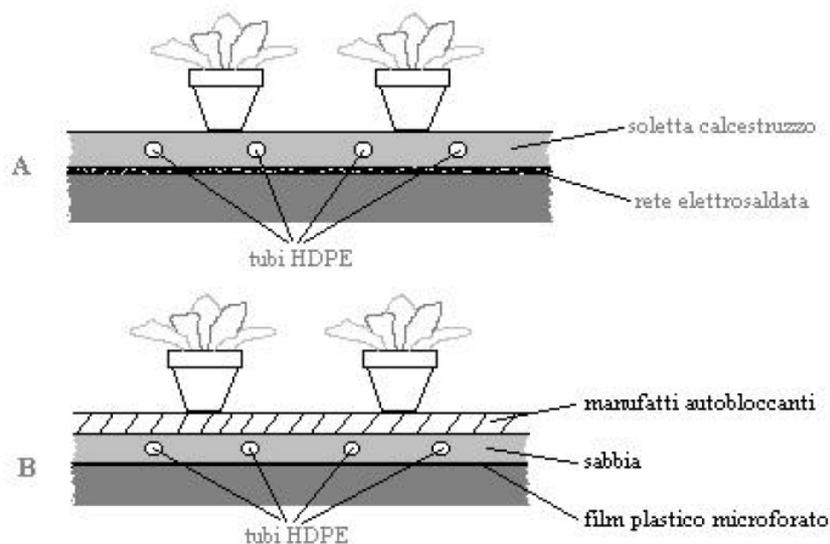


Figura 3-3: Impianti di riscaldamento a pavimento: A) con soletta in calcestruzzo e tubi annegati, B) con manufatti autobloccanti e tubi nel letto di sabbia

- *riscaldamento dei bancali*: schematizzati in Fig. 3.13 sono possibili diverse soluzioni, La soluzione più comune ed efficiente è senza dubbio la prima, dove i corpi radianti vengono posizionati nella parte superiore del bancale con una schermatura isolante nella parte inferiore.

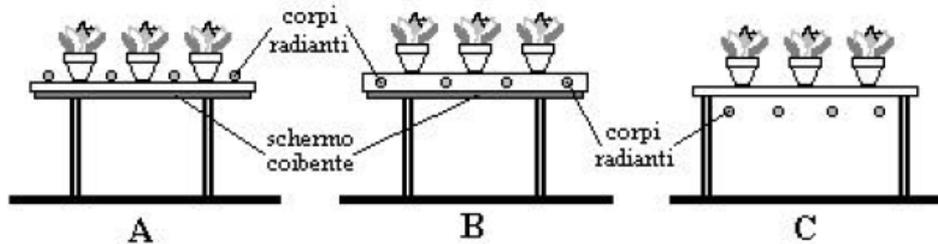


Figura 3-4: Diverse tipologie d'impianti di riscaldamento dei bancali

3.1.4 Climatizzazione estiva

Se nella stagione invernale esiste la possibilità di scendere al di sotto della temperatura minima biologica delle colture, ed infatti si rende necessario un impianto di riscaldamento, nella stagione estiva è invece concreto il rischio opposto di raggiungere temperature troppo elevate per lo sviluppo o la sola sopravvivenza delle piante. Soprattutto nelle ore più calde della giornata, quando gli intensi raggi solari colpiscono violentemente le superfici vetrate delle pareti e delle coperture, diventa inevitabile sottrarre energia all'aria interna della serra, utilizzando metodi passivi ed attivi.

Così come per l'impiantistica di riscaldamento, anche per quella di raffrescamento si devono affrontare valutazioni di tipo progettuale ed economico; per questo motivo, nella maggioranza delle serre, la gestione della climatizzazione estiva viene affidata totalmente all'utilizzo di barriere ombreggianti e alla ventilazione naturale o forzata.

La prima soluzione estremamente economica ed efficace, viene realizzata mediante reti ombreggianti o teli disposti internamente o esternamente alla superficie, che oltre a diminuire l'intensità dei raggi solari diretti sulle colture, possono anche rappresentare una valida difesa contro insetti o parassiti.



Figura 3-5: Esempi di barriere ombreggianti utilizzate nelle serre

Per quanto riguarda la ventilazione, il raffrescamento passivo tramite l'apertura di ampie superfici su coperture o pareti, potendo garantire elevati ricambi d'aria, rappresenta la soluzione più semplice ed economica per climi miti e colture poco esigenti. Laddove ci fosse l'esigenza specifica di abbassare maggiormente la temperatura della serra rispetto a quella esterna, per potenziare la ventilazione naturale vengono frequentemente installati ventilatori e, più raramente, impianti a ciclo inverso a compressione di vapore.

Quest'ultima soluzione, decisamente più costosa, viene realizzata solamente dove la coltura garantisce un veloce e sicuro ritorno economico sull'investimento iniziale, ma garantisce effettivamente una climatizzazione migliore, con la quale è possibile agire anche sul controllo dell'umidità.

3.2 Energie rinnovabili per serre

3.2.1 Introduzione

Viene stimato che l'agricoltura sia responsabile di circa il 2-5% dei consumi energetici Europei e di circa il 9% delle totali emissioni di gas serra, delle quali il 1.6% in termini di emissioni di CO₂ che derivano dall'uso di combustibili fossili per macchinari, trattori e altri veicoli, il condizionamento degli edifici delle aziende agricole, l'essiccazione del grano e il riscaldamento delle serre agricole. In particolare, il settore dell'orticoltura in serra è stimato rappresentare non meno del 60% del bilancio energetico totale in agricoltura.

Inoltre, l'uso di tecnologie di climatizzazione in serra si sta costantemente espandendo in Europa nei decenni recenti proprio per la possibilità di ottenere prodotti di alta qualità durante tutto l'anno, risultato non realizzabile nel caso di serre agricole non climatizzate.

Come risultato, il consumo totale di energia dell'agricoltura in serra è in costante aumento perché molti tra i produttori agricoli tendono a passare da serre non climatizzate a serre climatizzate al fine di soddisfare la domanda crescente di prodotti ortofrutticoli di qualità e disponibili durante tutto l'arco dell'anno, indipendentemente dalla stagionalità. Un'altra conseguenza non meno importante è che il settore delle serre agricole produce sempre più emissioni di gas serra.

Per contro, basandosi sui tre obiettivi principali di politica energetica dell'Unione Europea (sicurezza dell'approvvigionamento, competitività e sostenibilità ambientale), nel 2007 la Commissione Europea propose un pacchetto di provvedimenti in campo energetico e di tutela ambientale per ridurre le emissioni di gas serra del 20% entro il 2020, per aumentare il contributo delle risorse rinnovabili fino al 20% del consumo finale totale di energia e per incrementare l'efficienza energetica del 20%.

Il settore dell'agricoltura in serra può contribuire a raggiungere gli obiettivi Europei di efficienza e risparmio energetico sulla base di tre strategie principali:

- Ridurre l'utilizzo di fonti fossili di energia sia incrementando l'uso di energie rinnovabili per il riscaldamento e per il raffrescamento (fotovoltaico, uso di biomasse, geotermia), sia ottimizzando le tecniche di climatizzazione;

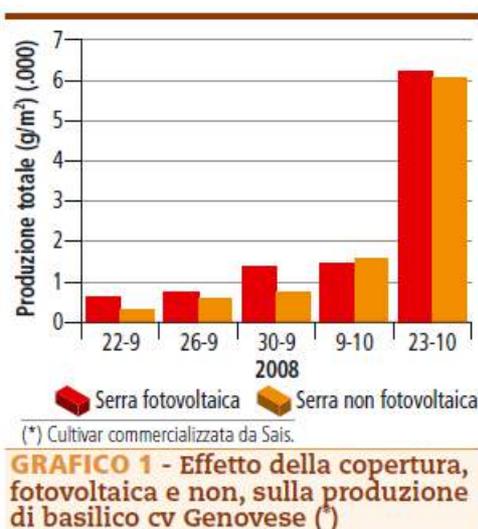
- Cambiare le caratteristiche della produzione agricola verso specie di piante locali e stagionali, basandosi su una gestione delle colture più attenta ai consumi energetici;
- Contribuire a ridurre le emissioni di CO₂ e far diventare l'agricoltura più sostenibile e resiliente riguardo i consumi energetici.

3.2.2 Serre fotovoltaiche

Nella riviera ligure di Ponente, così come nelle altre zone dove il florovivaismo italiano realizza le proprie produzioni di eccellenza, l'uso dell'energia elettrica e termica è uno dei fattori critici di maggiore importanza e peso economico per le imprese. Malgrado infatti le favorevoli condizioni climatiche, molte colture richiedono l'intervento del riscaldamento di soccorso nei mesi centrali dell'inverno, con consumi di energia che negli ultimi anni, complici i costi crescenti, sono diventati sempre più rilevanti. Allo stesso modo, gli impianti presiedono al controllo e alla gestione della climatizzazione, nonché gli impianti irrigui, di movimentazione dei bancali e delle aperture di ventilazione consumano importanti quantità di energia elettrica. Se a ciò si aggiungono anche le aree (magazzini, celle frigorifere, centri di confezionamento, ecc.) dedicate alle gestione delle produzioni nel post-raccolta, l'insieme dei consumi energetici delle imprese florovivaistiche appare non trascurabile. Sulla base di queste considerazioni, sono numerosi gli esempi di approccio scientifico e tecnico finalizzati alla ricerca di soluzioni impiantistiche e tecniche per il contenimento dei consumi energetici, da un lato, e per la produzione di energia, dall'altro (Shahbazi, 1992; Stanhill, 1992). La possibilità di installare un impianto fotovoltaico integrato nel tetto delle serre parte dal presupposto che proprio le serre dedicate al florovivaismo necessitano dell'apposizione di schermi finalizzati a limitare l'intensità luminosa durante molti mesi dell'anno. In aggiunta, l'esposizione delle strutture di protezione, spesso coerente con la giacitura dei pendii dove sono realizzate, è generalmente a favore dell'irraggiamento solare diretto.

Da ultimo, l'elevato valore di mercato delle superfici agricole dedicate al florovivaismo ha da sempre imposto il massimo sfruttamento delle stesse, lasciando pochi spazi liberi da dedicare ad altri usi.

Tale somma di fattori fa sì che le strutture di protezione siano quasi naturalmente adatte e sfruttabili per l'installazione di impianti per la captazione dell'energia solare. Il vincolo più importante per questo tipo di realizzazione impiantistica riguarda la possibilità di continuare a produrre al di sotto degli impianti fotovoltaici senza che le colture siano danneggiate dalla riduzione dell'intensità luminosa. In questo modo è possibile un aumento della redditività per le imprese agricole, favorendo anche la diversificazione produttiva a vantaggio delle regole della condizionalità come già



verificato per altri settori produttivi (Celik et al., 2009). A partire dal 2007 due importanti progetti di ricerca e di sperimentazione sono stati promossi a livello nazionale e regionale per la ricerca di soluzioni al problema dell'approvvigionamento e dell'efficienza energetica nelle produzioni florovivaistiche italiane: «Fotovoltaico», finanziato dalla Regione Liguria (ente strumentale: Istituto regionale per la floricoltura) e «Floener», finanziato dal Mipaaf. Il progetto è stato anche cofinanziato dalla Camera di commercio industria, artigianato e agricoltura di Savona.

I grafici qui riportati mostrano i risultati ottenuti negli studi riguardo la possibile installazione e al rendimento di un impianto fotovoltaico semitrasparente integrato nel tetto di una serra e alla valutazione degli effetti dell'ombreggiamento su alcune coltivazioni ortofloricole della copertura fotovoltaica in confronto con quella vetrata convenzionale.

Per quanto riguarda il basilico, seminato il 4-9-2008 con una densità di semina di 4 g/m², il confronto tra la coltivazione nella serra dotata della copertura fotovoltaica rispetto a quella eseguita nella serra non fotovoltaica non ha evidenziato differenze significative dal punto di vista della produzione di biomassa (foto 1, grafico 1). Similmente, un attacco di peronospora manifestatosi in maniera naturale e contemporanea nelle due serre non è risultato differente dal punto di vista della incidenza dell'infezione, valutata separatamente nei due ambienti (dati non riportati). Circa la produzione di energia, i primi risultati raccolti dai sistemi di rilevamento delle produzioni collegati ai due impianti, quello CIS utilizzato per la copertura della serra e quello a silicio monocristallino installato a terra, hanno messo in evidenza numerosi e importanti aspetti. Primo fra tutti, e in grado di influenzare significativamente i risultati in termini di produzione di energia, è l'esposizione dell'impianto CIS (mista Est-Sud-Est e Ovest-Nord-Ovest) rispetto a quello dell'impianto a silicio monocristallino (Sud-Sud-Est). Nel primo caso l'esposizione è buona prevalentemente al mattino solo sulla porzione di vetri fotovoltaici esposti a Est-Sud-Est, mentre diventa favorevole solo nella seconda metà del giorno per quella parte di impianto esposta a ovestnordovest.

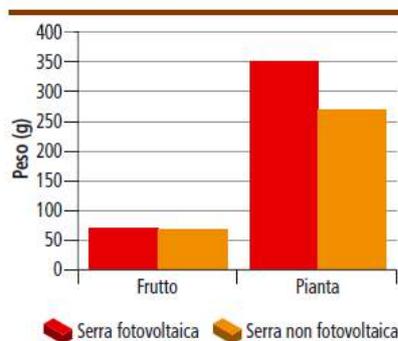


GRAFICO 2 - Effetto della copertura, fotovoltaica e non, sulla produzione di frutti di zuccchino cv Althea

La copertura fotovoltaica non ha influenzato la produzione di frutti di zuccchino né dal punto di vista del peso delle piante e dei frutti, né dal punto di vista del numero dei frutti per pianta.

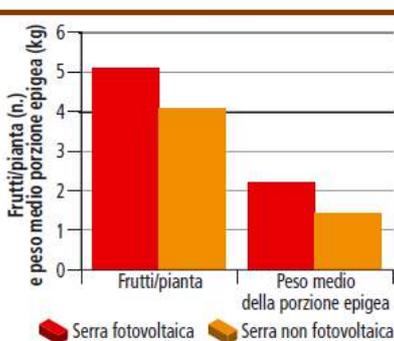


GRAFICO 3 - Effetto della copertura, fotovoltaica e non, sulla produzione di frutti e sul peso medio delle piante di zuccchino cv Althea

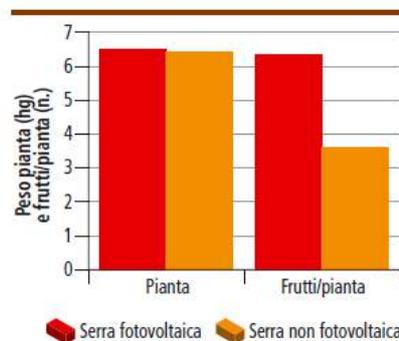


GRAFICO 4 - Effetto della copertura, fotovoltaica e non, sulla produzione di pomodoro cv Cuore di Bue

La copertura fotovoltaica non ha influito sull'altezza delle piante di pomodoro, ma ha causato la produzione di bacche di pezzatura inferiore a quelle cresciute sotto la serra senza copertura fotovoltaica.

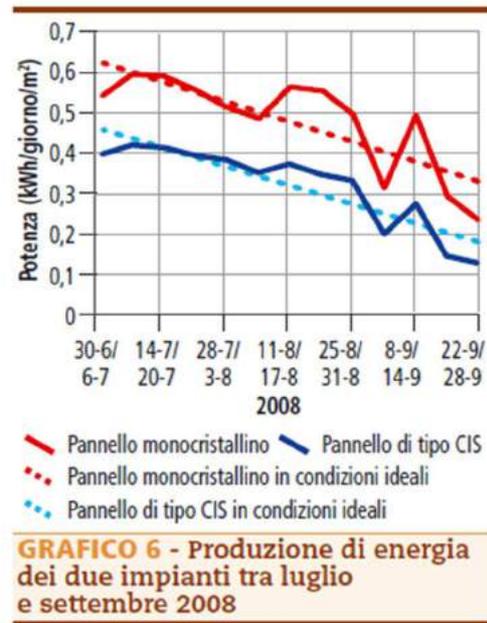
Ne consegue che non è mai possibile avere l'intero impianto nelle condizioni ottimali di esposizione, nemmeno con il sole allo Zenit. È questa la conseguenza più vistosa della differenza di produzione per metro quadrato quando si procede all'integrazione di un impianto fotovoltaico su un tetto a capanna (grafico 6) rispetto a una scelta di installazione, integrata o non integrata, esclusivamente nelle condizioni di esposizione e di inclinazione ideali per le latitudini a cui viene installato l'impianto. Peraltro, malgrado il condizionamento produttivo causato dalla non perfetta scelta dell'esposizione, vincolata dall'orientamento dell'asse maggiore della serra e dall'inclinazione delle falde del tetto, nei primi mesi di funzionamento il rendimento dell'impianto CIS, calcolato come percentuale di energia prodotta rispetto a quella teoricamente ottenuta in condizioni ideali, è apparso interessante.

Dal punto di vista della produzione di energia elettrica, il fattore che maggiormente ha causato una perdita di produzione e di efficienza produttiva è stata l'esposizione della serra e, di conseguenza, l'orientamento dell'impianto nel suo complesso.

Volutamente si è deciso di installare l'impianto in una serra che potesse rappresentare la condizione media di un'azienda che, disponendo di una struttura orientata secondo obblighi diversi da quelli della captazione della radiazione solare (disposizione della particella catastale, obblighi di confine con strade o canali, ecc.), avesse intenzione di trasformarla in una struttura «a duplice attitudine». Il risultato, benché preliminare, sembra positivo, avendo prodotto importanti quantitativi di energia utilizzati sia a livello aziendale, sia anche destinati alla commercializzazione. Nel complesso per cui risulta che ricoprire le falde del tetto di una serra con pannelli fotovoltaici non compromette la produttività delle colture in ambiente protetto e permette di rendere energeticamente indipendente la struttura. Il grande surplus di elettricità prodotto è poi disponibile per essere immesso in rete.

3.2.3 La biomassa

Le biomasse combustibili sono definite dal Dlgs 3 aprile 2006 n. 152 "Norme in materia ambientale" (allegati alla parte quinta, Allegato X - sezione 4). Tra queste rientrano tutte le biomasse di origine agricola, forestale e industriale che abbiano subito nel corso del loro processo produttivo solo lavorazioni di tipo meccanico, per questo definite anche "biomasse vergini". Tra le biomasse combustibili rientrano anche i "materiali vegetali prodotti da interventi di potatura" ovvero le potature delle coltivazioni legnose agricole (vigneti, frutteti, oliveti, nocioleti, ecc) oltre a sottoprodotti dell'attività agricola quali sansa e nocciolino.



3.2.3.1 Cippato di legno

L'Italia ha raddoppiato la sua superficie forestale negli ultimi cinquant'anni, oggi supera i dieci milioni di ettari, con 2-3 milioni di ettari in fase di conversione naturale verso il bosco. La causa è la cessazione delle attività primarie e quindi l'abbandono di ampie porzioni di territorio montano e collinare, che sono state colonizzate spontaneamente dal bosco. Attualmente preleviamo in media solo il 20% dell'incremento legnoso annuo (36 Mm³), pertanto nella maggior parte delle regioni alpine e appenniniche le biomasse legnose risultano molto abbondanti e sotto utilizzate. Il cippato di legno è ottenuto dalla cippatura dei residui delle utilizzazioni boschive. Le caratteristiche qualitative del cippato di legno a uso energetico sono definite dalla norma UNI EN 14961-4:2011. La qualità del cippato e il suo costo di produzione sono influenzati dal tipo di materiale di partenza e dall'articolazione del processo produttivo. Le caratteristiche qualitative del cippato sono importanti sia per la scelta della tecnologia di combustione sia per la definizione del prezzo di acquisto.

In Italia ci sono circa 2 milioni di ettari di oliveti e vigneti che producono ogni anno oltre 2 milioni di tonnellate di potature (ca. 10 milioni di MWh primari) quasi sempre inutilizzate o bruciate a cielo aperto, con pesanti ripercussioni sulla qualità dell'aria. Un interessante coltura legnosa per l'impiego energetico è rappresentata anche dai corileti che coprono in Italia quasi 70.000 ettari, principalmente in Lazio, Campania e Piemonte. Tali potature, previa raccolta, stagionatura e trinciatura, possono esprimere un grosso potenziale energetico, basti pensare che la produttività annuale per ettaro varia mediamente da 1,5 a 4,5 t (Tabella 3-4).

	t/ha/anno	Contenuto idrico (M%)
Oliveti	2,5-4,5	35-45%
Vigneti	1,5-3	40-50%
Corileti	1,5-2	35-40%
Frutteti	2,5-3,5	40-50%

Tabella 3-4: Produttività annuale media per ettaro di alcune specie

La qualità del cippato è influenzata principalmente dalla macchina impiegata per la raccolta e dal tipo di specie legnosa. Da questo punto di vista la vite rappresenta il materiale più problematico. Nel caso dell'olivo e del nocciolo si ottengono invece i migliori risultati in termini di pezzatura del cippato. I costi di produzione del cippato da potature variano ampiamente in funzione del tipo di cantiere di raccolta e delle macchine impiegate.

3.2.3.2 Sansa e nocciolino

Nei frantoi tradizionali la sansa prodotta, almeno in parte, è spesso impiegata a fini energetici principalmente per l'autoconsumo. Mentre per i frantoi con lavorazione continua è conferita ai sansifi ci che previa disoleatura la re-immettono sul mercato come biocombustibile sfuso o confezionato. Tra i possibili utilizzi del sottoprodotto sansa vi è appunto quello energetico, praticato più o meno diffusamente nel centro e sud Italia. Da un punto di vista normativo la sansa è contemplata nel Testo Unico Ambientale (Dlgs. 152/2006) sia come

“materiale vegetale prodotto dalla lavorazione esclusivamente meccanica di prodotti agricoli” sia come “sansa di oliva disoleata”.

Un’ulteriore filiera commerciale molto consolidata nel centro-sud riguarda l’uso energetico del nocciolino di sansa, specie alla luce delle innovazioni tecnologiche recentemente introdotte sul mercato che consentono la denocciolatura in pre-spremitura. Rispetto alla sansa, il nocciolino è un biocombustibile ancor meno problematico e diff usamente impiegato nell’alimentazione di caldaie automatiche. Il prezzo di mercato della sansa esausta può variare da 120 a 140 €/t, mentre il nocciolino ha un prezzo un po’ più elevato 150-160 €/t (trasporto incluso).

3.2.3.3 Tecnologie di conversione energetica

Le biomasse agroforestali sono impiegate principalmente e in modo molto consolidato per la produzione di energia termica. Sono inoltre disponibili sul mercato soluzioni tecnologiche affidabili sia per il raffrescamento sia per la minicogenerazione applicabili al settore delle colture protette.

Nella figura seguente vengono rappresentati i principali tipi di caldaia utilizzati associati ai tipi di combustibili idonei (Tabella 3-5).

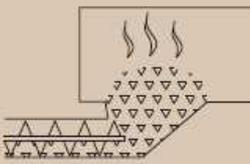
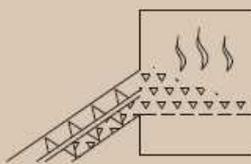
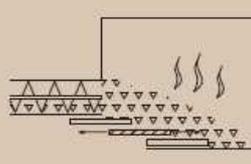
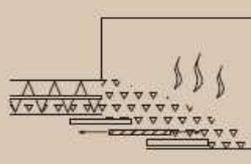
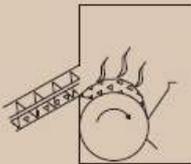
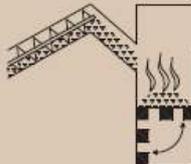
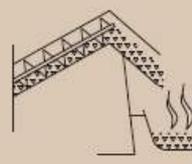
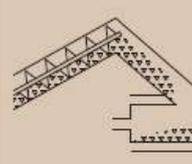
Principio	Focolare sottoalimentato		Focolari a griglia alimentati lateralmente (coclea o spintore)	
Tipo			griglia fissa (con raccoglitore cenere o griglia ribaltabile)	griglia mobile (rotativa, a scalini)
Schema				
Potenza nominale	da 10 kW (fino a 2,5 MW)		da 25 kW	da 15 kW (fino > 20 MW)
Combustibile	cippato - pellet		cippato - pellet	cippato - pellet corteccia - segatura
			Focolari alimentati per caduta	
	griglia a rullo laminato	griglia ribaltabile	braciere a tazza	braciere a tunnel (bruciatore)
				
	da 4 kW (fino a 450 kW)	da 15 kW (fino a 30 kW)	da 6 kW (fino a 30 kW)	da 10 kW
	cippato - pellet	pellet (cippato calibrato)	pellet	pellet

Tabella 3-5: Principali tipi di focolari nelle caldaie a griglia e relativi biocombustibili impiegabili

3.2.3.4 Convenienza della biomassa in serra

Se in un'azienda agricola sono verificate le seguenti condizioni:

- Sufficiente disponibilità di biomasse per tutto l'anno;
- Presenza di produttori di biomasse entro un raggio di ca. 100 km;
- Presenza di produttori professionali in grado di garantire la qualità della biomassa richiesta dall'impianto;
- Disponibilità di spazio in azienda per la collocazione della centrale termica e del deposito;
- Prezzi delle biomasse competitivi rispetto al gasolio e stabili nel medio lungo periodo;
- Fabbisogno termico aziendale medioalto (> 150 MWh ~ 15.000 litri gasolio);
- Valutazione dell'investimento positiva (tempo ritorno < 5-7 anni, VAN e SRI positivi).

Allora l'installazione di una moderna caldaia a biomasse è sicuramente interessante.

Per poter confrontare il costo dell'energia termica prodotta con diversi combustibili è necessario calcolare il costo dell'energia primaria, espresso in €/MWh. Questo si ottiene semplicemente dividendo il prezzo del combustibile per il suo potere calorifico. La valutazione di convenienza delle biomasse rispetto ai combustibili fossili convenzionali deve essere valutata caso per caso, partendo dal confronto dell'energia primaria, per calcolare il livello del risparmio annuo, includendo poi nel calcolo il costo dell'investimento. Il prezzo del gasolio per il riscaldamento delle serre, che dal 2010 è soggetto ad un'accisa del 22%, è quasi triplicato nell'ultimo decennio passando da circa 0,3 €/l del 2001 (31 €/MWh) all'attuale (giugno 2012) valore medio di 0,91 €/l, ovvero 85 €/MWh con punte di oltre 1 €/l in alcune zone d'Italia.

Le biomasse legnose, in particolare il cippato, hanno mantenuto negli ultimi decenni un andamento dei prezzi molto più stabile rispetto ai combustibili fossili. Nel 2004 il prezzo del cippato (M30) era di 60 €/t (17,6 €/MWh), nel 2008 è arrivato a 85 €/t (25 €/MWh) e attualmente (2012) costa poco meno di 100 €/t, ovvero 28 €/MWh. Negli ultimi dieci anni il prezzo è cresciuto del 60% circa e negli ultimi cinque anni l'aumento rilevato è stato solo del 12%.

3.2.4 Geotermia e pompe di calore

Per Energia Geotermica, o più semplicemente Geotermia, (dal greco antico, γῆ, "gee", terra e θερμός, "thermos", caldo) s'intende l'energia contenuta sotto forma di calore contenuta nel sottosuolo terrestre. I vulcani, le sorgenti termali, le fumarole e altri fenomeni superficiali di questa tipologia sono solo alcuni esempi delle manifestazioni energetiche naturali contenute all'interno della Terra. Tali fenomeni provengono dall'attività interna del pianeta, dovuta al decadimento radioattivo nel mantello terrestre di minerali quali Uranio, Torio e Potassio, e dal calore assorbito dal Sole in superficie.

Oltre il 99% della massa della Terra presenta una temperatura superiore ai 1000°C e solo lo 0.1% ha una temperatura inferiore ai 100°C; alla base della crosta terrestre continentale si suppone che le temperature varino tra i 200 e i 1000°C, mentre nel nucleo si stima che siano comprese nell'intervallo di 3500 - 5500°C. Uno studio del Massachusetts Institute of Technology afferma che

la quantità totale di energia geotermica contenuta nel nostro pianeta è circa di 12.6×10^{24} MJ, mentre solo quella contenuta nella crosta terrestre, si aggira intorno ai 5.4×10^{21} MJ, la quale rappresenta 108 volte la generazione mondiale di elettricità nel 2005.

Il calore è trasferito dall'interno verso la superficie prevalentemente per conduzione, determinando un gradiente di temperatura di circa 3°C per 100 m per la crosta terrestre continentale; vi sono, comunque, vaste regioni nelle quali il valore del gradiente geotermico si discosta sensibilmente da quello medio: alcune aree, in cui il basamento rigido originale, sprofondando ha creato dei bacini che si sono colmati rapidamente di sedimenti geologicamente "molto giovani", presenta gradienti geotermici anche inferiori a $1^{\circ}\text{C}/100$ m, viceversa, in altre "aree geotermiche" il gradiente può raggiungere valori superiori a dieci volte quello normale.

Storicamente l'applicazione della geotermia è stata limitata a zone prossime a bordi di placche tettoniche o in aree vicine ai cosiddetti "hot spots" (punti caldi), zone nelle quali le particolari condizioni geologiche permettevano facilmente tramite un vettore, acqua in fase liquida o vapore, il trasporto del calore dalle profondità calde alla superficie. Oggi si sono aperte nuove possibilità, grazie al moderno progresso tecnologico, le potenzialità di utilizzo dell'energia geotermica sono state notevolmente ampliate, soprattutto per i sistemi di riscaldamento di edifici tramite pompe di calore geotermiche, tanto che il sito geografico è del tutto influente, poiché le tecnologie si possono utilizzare in sostanza ovunque.

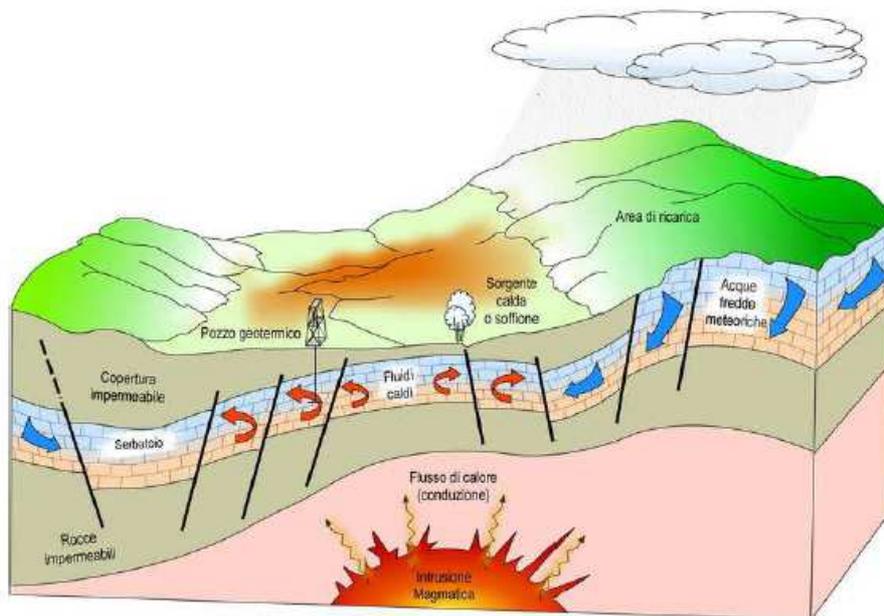


Figura 3-6: Schema di un campo geotermico che produce vapore

3.2.4.1 Classificazione dei sistemi geotermici

Per sistema geotermico s'intende il sistema fluido convettivo che estrae, trasporta e rende fruibile in superficie il calore naturale confinato nel sottosuolo terrestre; un sistema geotermico è quindi schematicamente formato da tre elementi: una sorgente di calore, un serbatoio e il fluido, che è il mezzo che trasporta il calore. Un esempio d'immediata comprensione può essere quello del

sistema geotermico ad alta temperatura della figura seguente: la sorgente di calore è un'intrusione magmatica ad alta temperatura a bassa profondità, il serbatoio è costituito da uno strato di rocce impermeabili che raccolgono le acque meteoriche filtrate dalla superficie, mentre il fluido vettore è rappresentato dalle stesse acque meteoriche che, in prossimità della sorgente calda, si riscaldano fino a raggiungere, in alcuni casi, la fase gassosa, e hanno la possibilità di ricircolare nel serbatoio o addirittura risalire in superficie anche sotto forma di vapore come nel caso dei soffioni.

Il flusso di calore geotermico che arriva in superficie è in media 0.03 W/m^2 . Il gradiente geotermico, definito come rapporto tra il flusso geotermico e la conduttività del terreno, risulta pertanto – per un valore di conducibilità termica media del terreno in genere considerata pari a 1 W(mK)^{-1} – di circa 3° ogni 100 m.

Solitamente, al fine di caratterizzare le risorse geotermiche, si fa riferimento al concetto di entalpia, ovvero la quantità di energia termica di una data massa di fluido, ne derivano così fondamentalmente tre tipologie di sistemi di geotermici:

- Sistemi ad alta entalpia
- Sistemi a media entalpia
- Sistemi a bassa entalpia

Si denomina geotermia ad alta entalpia la geotermia che usa fluidi con temperature superiori ai 150°C . Le risorse geotermiche ad alta entalpia si riscontrano in zone della crosta terrestre dove, a profondità accessibili comprese tra 1 e 4 km, il gradiente è di molto superiore a quello medio. In alcuni casi ciò è dovuto alla presenza di masse magmatiche fluide o già solidificate e in via di raffreddamento non lontano dalla superficie (5-10 km). In altri casi, si possono verificare degli accumuli di calore dovuti alla particolare conformazione idrogeologica della crosta terrestre nell'area interessata.

Il calore contenuto nella crosta può propagarsi verso la superficie, oltre che attraverso le rocce (quindi per sola conduzione), anche attraverso fluidi vettori quali acqua e gas (dunque per convezione con trasporto di materia). I fluidi geotermici presenti nella crosta sono costituiti principalmente da acqua penetrata nel sottosuolo e riscaldata a contatto di rocce calde. Si ha in questi casi la formazione di serbatoi geotermici, ovvero acquiferi caldi che possono raggiungere temperature di oltre 300°C , all'interno dei quali il fluido geotermico (acqua o vapore) compie dei moti convettivi a causa della sottostante sorgente di calore.

I fluidi possono raggiungere spontaneamente la superficie dando luogo a manifestazioni geotermiche naturali quali le sorgenti calde, i geysir e le fumarole. Spesso però i fluidi caldi rimangono confinati entro il serbatoio geotermico a causa dei sovrastanti strati impermeabili. In questi casi i fluidi possono essere estratti tramite pozzi di profondità sino a qualche km e successivamente utilizzati per la generazione di energia elettrica o per il riscaldamento domestico o industriale. Le zone dove è più probabile la presenza di serbatoi geotermici corrispondono in generale alla cosiddetta "cintura di fuoco", dove è localizzato il vulcanismo in attività. L'individuazione di un serbatoio geotermico è un'operazione complessa che, a partire dal

censimento delle manifestazioni geotermiche presenti, comprende indagini geologiche, geochimiche, geofisiche e la perforazione di pozzi esplorativi.

L'Italia, dal punto di vista geotermico, risulta contrassegnata da una serie di bacini "caldi" e di bacini più "freddi". I bacini caldi, appartenenti alla cosiddetta fascia calda tirrenica, sono compresi fra il Mar Tirreno e il bordo dell'arco appenninico. In quest'area i gradienti geotermici possono superare i 15-20°C/100 m. Altre aree d'interesse sono presenti in Sardegna e nel canale di Sicilia.

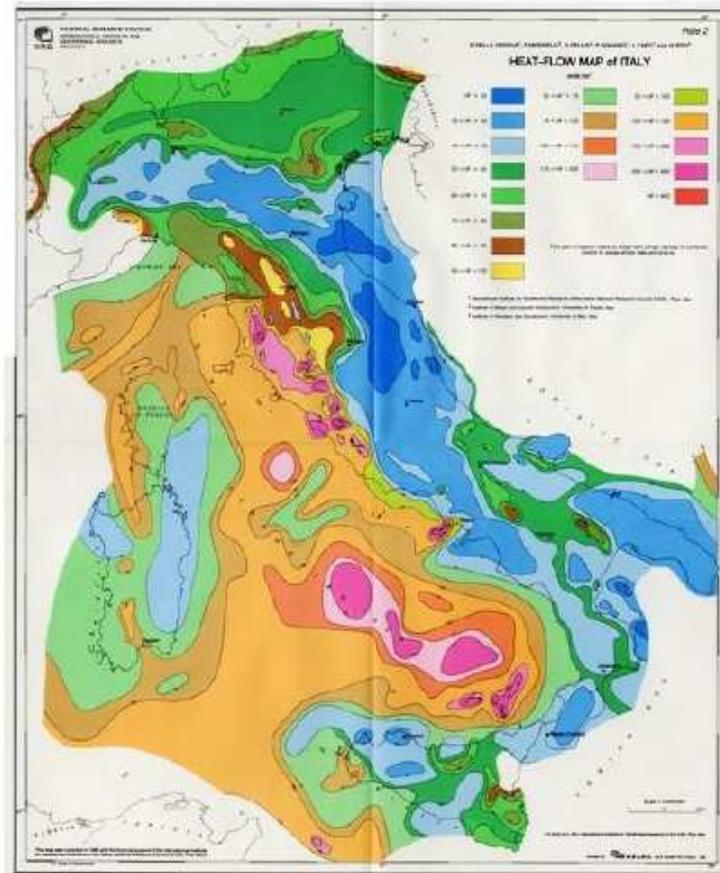


Figura 3-7: Mappa del flusso geotermico in Italia

Le risorse geotermiche ad alta entalpia vengono impiegate per la generazione di elettricità dal vapore geotermico. I primi esperimenti in questo campo risalgono al 1904, nella località di Larderello, in Toscana. In Europa la capacità installata al 2006 è di 854.6 MW, con un tasso di crescita del 3.6% rispetto al 2005. Quasi il 95% di questa potenza è installata in Italia.

La geotermia a **media entalpia** utilizza fluidi con temperature comprese tra i 90°C e i 150°C. I fluidi geotermici a media entalpia vengono utilizzati per usi diretti in applicazioni quali il riscaldamento di edifici, i processi industriali, il riscaldamento di serre, ecc, e per la produzione di energia elettrica con impianti a ciclo binario. In questo tipo di impianti, uno scambiatore trasmette il calore dall'acqua estratta al fluido vettore (ammoniaca, alcani, ecc.) il quale ha la proprietà di evaporare ad una temperatura più bassa rispetto a quella dell'acqua. Con questo vapore viene poi prodotta l'elettricità.

Gli usi diretti dell'energia geotermica, escluse le pompe di calore, sono passati dai 12885 MW del 2005 ai 15356 MW del 2010, con un incremento del 20% in 5 anni (Tabella 3-6).

Capacity, MWt				
	2010	2005	2000	1995
Geothermal Heat Pumps	35,236	15,384	5,275	1,854
Space Heating	5,391	4,366	3,263	2,579
Greenhouse Heating	1,544	1,404	1,246	1,085
Aquaculture Pond Heating	653	616	605	1,097
Agricultural Drying	127	157	74	67
Industrial Uses	533	484	474	544
Bathing and Swimming	6,689	5,401	3,957	1,085
Cooling / Snow Melting	368	371	114	115
Others	41	86	137	238
Total	50,583	28,269	15,145	8,664

Tabella 3-6: Usi diretti dell'energia geotermica nel mondo, per categoria di utilizzo, comprese le pompe di calore geotermiche.

La geotermia che sfrutta le temperature al di sotto dei 90°C viene classificata come geotermia a **bassa entalpia**. Con riferimento alla profondità, essa può essere suddivisa in:

- geotermia superficiale (entro i 1000 m, 12 ÷ 45°C), la quale si avvale di pompe di calore per applicazioni con sonde geotermiche a servizio di utenze piccole e medie;
- geotermia profonda (oltre i 1000 m, 45 ÷ 90°C), consente di ottenere fluidi a temperatura elevata per un impiego diretto, oppure per ulteriore riscaldamento con pompa di calore, e di utilizzarli per grandi utenze e/o teleriscaldamento;
- geotermia termale (sino a poche centinaia di metri di profondità, sino a 100°C), per usi diretti o con pompe di calore.

La risorsa geotermica a bassa entalpia, a differenza della geotermia a media e alta entalpia, non ha limiti geografici, perché sfrutta il calore geotermico mediamente presente su tutta la crosta terrestre. Per contro, il fatto che la risorsa non sia concentrata rende quasi sempre necessario l'utilizzo di pompe di calore, le quali permettono di amplificare il calore estratto (o ceduto) al terreno di tre – quattro volte mediante il ciclo a compressione di vapore.

Gli impianti a bassa entalpia traggono vantaggio dalla stabilità nel tempo della temperatura del terreno oltre una certa profondità. Questo fenomeno fu rilevato per la prima volta nel XVII secolo dal chimico – fisico Lavoisier, il quale pose ad una profondità di 27 metri un termometro a mercurio.

Successivamente Buffon (1778) e Von Humboldt (1799) misurarono la variazione annuale della temperatura indisturbata del terreno riscontrando un valore di quattro centesimi di grado.

William Thomson Kelvin nel 1852 progettava un apparecchio con un circuito frigorifero a ciclo invertito: nasceva la prima pompa di calore. Successivamente scoprì alcune formule empiriche per determinare il decrescere della variazione di temperatura durante l'anno all'aumentare della profondità; venne misurato che a 8.1 m di profondità la temperatura media annuale variava con una dinamica di 1/20 rispetto a quella della superficie ed a 16.2 m di profondità la dinamica di variazione passava ad 1/400 rispetto a quella superficiale.

Il primo sistema di climatizzazione a pompa di calore geotermica documentato risale al febbraio del 1912, mese in cui Heinrich Zoelly depositò il brevetto all'ufficio di Zurigo.

Tuttavia la prima applicazione di una pompa di calore con scambiatori nel terreno viene messa a punto nel 1945 negli Stati Uniti ad opera di R.C. Webber, il quale inventò il sistema per climatizzare la propria casa di Indianapolis. Il sistema utilizzava un compressore da 2.2 kW ad espansione diretta associato a spire di tubi posati in trincea nel giardino, sopperendo al riscaldamento dell'abitazione mediante un sistema di diffusione ad aria. A partire dal primo Ottobre 1945, il progetto cominciò ad essere monitorato, motivo per cui questa data è considerata il primo giorno di attività documentata di un impianto geotermico a circuito chiuso a pompa di calore.

Negli anni successivi si ebbe un proliferare di idee per la realizzazione degli scambiatori a terreno. La sonda geotermica profonda di tipo verticale nasce concettualmente nel 1947, anno in cui Kemler propose una serie di metodi di possibile configurazione degli scambiatori interrati.

Nel 1953 si contano già almeno 28 installazioni sperimentali di impianti di riscaldamento a pompa di calore geotermica negli Stati Uniti. Contemporaneamente si sviluppano studi teorici per la modellizzazione matematica del fenomeno di scambio termico tra terreno e scambiatori interrati, tra i quali spicca quello di L.R. Ingersoll dell'università del Wisconsin.

In Europa, dove erano stati compiuti i primi esperimenti e si era brevettato il primo sistema geotermico, i primi impianti geotermici a pompa di calore vennero realizzati solamente intorno al 1970. Il primo impianto europeo documentato è un impianto a serpentine orizzontali risalente al 1972. Il primo impianto a sonde verticali è invece stato installato nel 1980 a Schöffengrund, in Germania, con 8 sonde coassiali di 50 metri di profondità al servizio di una superficie di 385 m².

Raccogliere dati statistici sull'utilizzo attuale delle pompe di calore geotermiche (o GCHPs – Ground Coupled Heat Pumps) è molto difficile, perché spesso queste non vengono differenziate dagli altri tipi di pompe di calore, come quelle ad aria, e perché molti paesi non possiedono statistiche sui loro mercati interni di pompe di calore geotermiche.

La potenza erogata dalle pompe di calore installate a livello mondiale è pari a 35236 MW. Il numero di pompe di calore che si stima considerando una potenza media di 12 kW è pari a 2.94 milioni di unità.

3.2.4.2 Introduzione alle pompe di calore

Tra le tecnologie impiantistiche utilizzate per la climatizzazione ambientale un ruolo di rilievo è giocato dalle pompe di calore, apparecchiature impiegate per il riscaldamento di un fluido, come aria o acqua, che trasformano in energia utile il calore (energia a bassa entalpia) presente nell'ambiente, altrimenti inutilizzato. Per funzionare, una pompa di calore necessita, ovviamente, di energia ma quella che trasferisce all'interno dell'ambiente sotto forma di calore è maggiore di quella che consuma, garantendo così un notevole risparmio. Inoltre, poiché tale sistema sfrutta l'energia termica gratuita e illimitata immagazzinata nell'aria, nell'acqua superficiale, nelle falde acquifere sotterranee e nel terreno, la Direttiva 2009/28/CE ha ufficialmente inserito le pompe di calore tra le tecnologie che impiegano energie rinnovabili consentendo così, in caso di loro

installazione, di poter fruire dei meccanismi d'incentivazione previsti dalle normative vigenti in materia di fonti termiche rinnovabili.

L'evoluzione tecnologica della pompa di calore, tesa a raggiungere i limiti dettati dal secondo principio della termodinamica, ha fatto molta strada dal lontano 1852, quando Lord Kelvin, uno dei padri della termodinamica, ne aveva ufficialmente indicato le grandi potenzialità.

Oggi i sistemi a pompa di calore rappresentano, senza dubbio, il sistema più efficiente ed efficace per trasformare l'energia per il riscaldamento (consentendo risparmi dal 40 al 60% di energia primaria, con pari riduzione della CO₂) e possono essere integrati sistematicamente con fonti di energia rinnovabile come il solare termico o il fotovoltaico. A differenza dei sistemi termici a combustione, inoltre, offrono il vantaggio di poter essere utilizzati anche come climatizzatori durante la stagione calda sottraendo calore all'ambiente interno e cedendolo all'esterno degli edifici. A tal fine si costruiscono delle pompe reversibili, in grado cioè di invertire al suo interno le funzioni dell'evaporatore e del condensatore.

3.2.4.3 Principali componenti e funzionamento di una pompa di calore

Quanto segue nei paragrafi a riguardo delle pompe di calore e delle pompe di calore geotermiche è tratto da una serie di documenti redatti da Dime/Unige.

Gli impianti a ciclo inverso a compressione di vapore costituiscono la tipologia di impianto tipica negli impianti per la climatizzazione degli edifici utilizzando pompe di calore. La caratteristica dei cicli a compressione di vapore riguarda gli scambi termici (con le rispettive sorgenti) che avvengono durante cambiamenti di fase (condensazione e vaporizzazione) a pressione circa costante: queste circostanze implicano temperature circa costanti durante le fasi in cui gli scambi termici avvengono. Il ciclo di riferimento a compressione di vapore è rappresentato in Figura 3-8. Gli scambiatori di calore dove vengono trasferite le energie termiche alle sorgenti superiore ed inferiore del ciclo sono indicati, come è noto, con il nome di condensatore e vaporizzatore, rispettivamente.

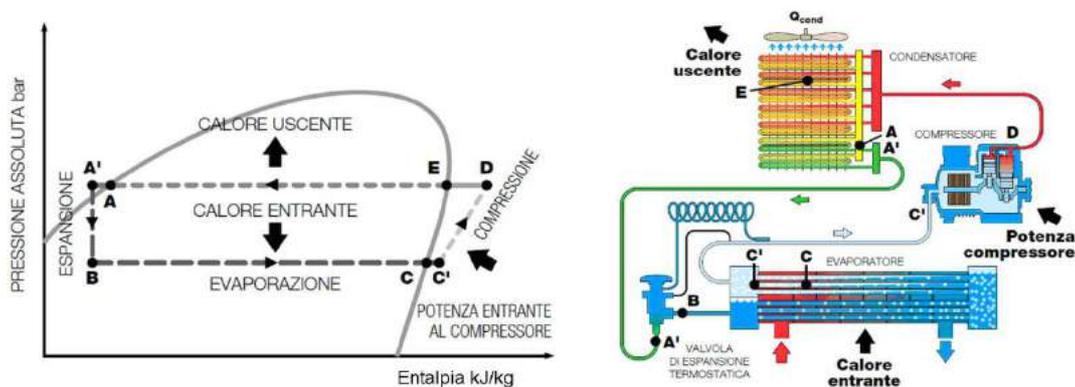


Figura 3-8: Ciclo inverso a compressione di vapore (fonte: www.climaveneta.com)

Alla famiglia dei cicli termodinamici a compressione di vapore possono essere ascritti anche i cicli inversi ad assorbimento, il cui funzionamento si basa sulla compressione del fluido termodinamico

quando questo risulta assorbito all'interno di liquido vettore che può a sua volta essere compresso utilizzando una pompa.

Se lo scopo primario del processo è sottrarre calore alla sorgente fredda il ciclo è detto frigo, se invece lo scopo è quello di fornire calore alla sorgente più calda, allora il ciclo viene detto a pompa di calore. I due sistemi operano con identico principio e non sussisterebbero ragioni termodinamiche per ulteriori distinzioni.

La finalità di una macchina inversa determina però la necessità di definire opportuni indici di prestazione (coefficienti di prestazione o COP) per il caso frigo ed il caso pompa di calore e questo è il motivo principale della distinzione di cui sopra. Inoltre, quando una stessa macchina opera in regime pompa di calore (caso della climatizzazione invernale) o in regime frigo (raffrescamento per la climatizzazione estiva) il campo di temperature di esercizio (temperatura delle sorgenti e temperature interne di lavoro della macchina) cambiano, condizione che comporta diverse prestazioni della macchina in quanto queste dipendono in primis dai valori delle temperature di esercizio. Le definizioni per i due diversi COP sono le seguenti.

$$COP_F = \frac{Q_{inf}}{L} \quad (1)$$

$$COP_{PDC} = \frac{Q_{sup}}{|L|} \quad (2)$$

Il significato del valore assoluto che compare nell'espressione per il COP della pompa di calore è legato al fatto che il calore Q_{sup} ed il lavoro L (o il corrispondente flusso termico e la potenza meccanica espressi in Watt) hanno per convenzione termodinamica segno discorde.

Negli impianti per la climatizzazione il COP_F è molto spesso indicato con l'acronimo anglosassone *EER* (*Energy Efficiency Ratio*).

In riferimento soprattutto alle pompe di calore, ci si riferisce spesso al valore del COP_{PDC} medio stagionale con la quantità *SPF*, che ancora dalla lingua inglese sta per *Seasonal Performance Factor*.

Interessante ai fine dell'analisi dei sistemi geotermici a pompa e dell'analisi energetica dei sistemi edificio e terreno è il legame che intercorre tra l'energia (calore) fornito alla sorgente superiore e quello estratto alla sorgente inferiore del ciclo durante il funzionamento a pompa di calore nella climatizzazione estiva. Questo legame discende direttamente dalla definizione di COP e dal principio di conservazione dell'energia che vuole che il calore superiore eguagli (in valore assoluto) le somme del lavoro (valore assoluto) e del calore inferiore.

Vale la pena di sottolineare che nelle applicazioni a pompa di calore geotermica, la sorgente inferiore è il terreno (ground) mentre quella superiore è l'edificio (building).

Indicando con Q_{ground} e Q_{build} i valori assoluti degli scambi di energia si ha:

$$(Q_{ground})_{winter} = Q_{build} \frac{COP_{PDC} - 1}{COP_{PDC}} \quad (3)$$

Se la macchina inversa opera per la climatizzazione estiva, l'edificio costituisce la sorgente termica inferiore e la relazione corrispondente tra energia all'edificio ed energia al terreno diventa:

$$\left(Q_{ground}\right)_{summer} = Q_{build} \frac{COP_F + 1}{COP_F} \quad (4)$$

Le relazioni sopra stanno ad indicare che maggiore è l'efficienza di una pompa di calore (operante sia in modalità invernale che estiva) maggiore è la quotaparte di energia richiesta al terreno rispetto all'energia richiesta dall'edificio.

Nel caso della climatizzazione invernale, l'energia sottratta al terreno (rappresentata dal rapporto (tra i COP di cui all'equazione 3) è per definizione la quotaparte di energia rinnovabile fornita all'edificio, come anche sancisce la Direttiva Europea 2009/28/CE:

“(ANNEX VII) - Accounting of energy from heat pumps. The amount of aerothermal, geothermal or hydrothermal energy captured by heat pumps to be considered energy from renewable sources for the purposes of this Directive, ERES, shall be calculated in accordance with the following formula, ERES = $Q_{usable} (1 - 1/SPF)$ ”

Le massime efficienze ottenibili da una macchina inversa sono descritte dalle leggi della Termodinamica (II Principio).

L'astrazione di riferimento per le prestazioni massime è la cosiddetta macchina di Carnot che compie l'omonimo ciclo in cui gli scambi termici avvengono a temperatura costante e gli scambi di lavoro avvengono in maniera adiabatica e reversibile.

I coefficienti di prestazione per una macchina di Carnot risultano espressi come:

$$COP_{F,max} = \frac{T_{inf}}{T_{sup} - T_{inf}} \quad (5)$$

$$COP_{PDC,max} = \frac{T_{sup}}{T_{sup} - T_{inf}} \quad (6)$$

Nei cicli inversi l'efficienza del ciclo (il COP) aumenta al diminuire della differenza tra le temperature superiore ed inferiore. Nel caso della climatizzazione invernale degli edifici, a parità di temperatura superiore (legata alla temperatura di mandata del fluido vettore che effettua il riscaldamento dell'edificio) l'utilizzo del terreno come sorgente inferiore di calore consente più elevate temperature inferiori rispetto al caso in cui si utilizzasse (sempre in inverno) aria ambiente.

3.2.4.4 Impianti geotermici a bassa entalpia

I sistemi geotermici a pompa di calore vengono tipicamente classificati in ragione delle caratteristiche del circuito idraulico interrato. La classificazione ASHRAE (ed anche altre come quella GSP, Gruppo Promozionale Svizzero per le Pompe di Calore) distingue tra sistemi a circuito chiuso e sistemi a circuito aperto, dove viene prelevata acqua di falda ove disponibile. ASHRAE utilizza gli acronimi GSHP (ground source heat pump) per indicare sia i sistemi a circuito aperto che chiuso e l'acronimo GCHP per riferirsi ai sistemi a circuito chiuso, caratterizzati da scambiatori di calore veri e propri inseriti nel terreno secondo assegnata geometria e profondità. Nei sistemi a circuito chiuso un sistema di tubazioni consente ad un fluido termovettore di trasferire il calore dal terreno al vaporizzatore della pompa di calore (in inverno) e dal condensatore al suolo (operazioni di raffrescamento dell'edificio).

I sistemi a circuito aperto sono costituiti da un pozzo di prelievo e da uno di restituzione, collegati alla pompa di calore direttamente o mediante un circuito secondario ed uno scambiatore. Il prelievo può

avvenire da bacini superficiali quali il mare, i laghi od i fiumi, dall'acquedotto o da un pozzo, mentre lo scarico può avvenire nello stesso bacino del prelievo, in superficie, in pozzo o nelle reti delle acque bianche o nere.

I sistemi a circuito aperto sono relativamente poco diffusi a causa di alcuni fattori che ne limitano lo sviluppo, quali i maggiori costi di manutenzione, legati all'intasamento dello scambiatore lato ambiente esterno o alla sua corrosione, l'incidenza dei costi di pompaggio, e principalmente il difficile ed incerto iter autorizzativo per la costruzione dei pozzi, il prelievo e soprattutto lo scarico dell'acqua.

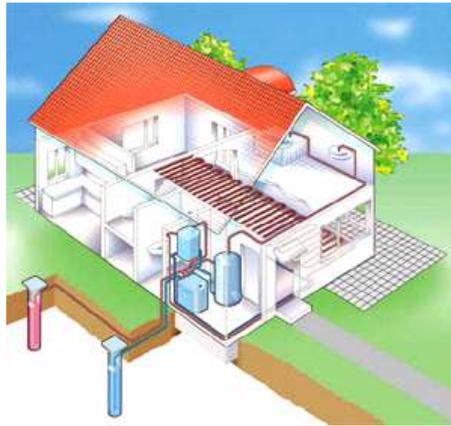


Figura 3-9: Rappresentazione di sistema geotermico a circuito aperto

Gli scambiatori a circuito chiuso si suddividono a loro volta in una molteplicità di varianti, molte delle quali studiate per abbattere i costi di installazione in casi specifici. I macrogruppi tipicamente adottati sono le sonde geotermiche verticali, le sonde geotermiche orizzontali, i collettori in trincea ed i pali energetici.

Le sonde geotermiche verticali costituiscono la soluzione maggiormente diffusa principalmente grazie al ridotto spazio necessario per l'installazione. Le sonde verticali hanno inoltre la possibilità di lavorare con temperature stabili al terreno e più elevate per via delle profondità (80-300 m) che questi scambiatori possono raggiungere grazie alla presenza del gradiente geotermico che determina un innalzamento della temperatura del suolo di 2-3 °C ogni 100 metri di profondità (valori tipici).

Inoltre la geometria relativamente semplice del campo sonde e la elevata distanza dalla superficie (dove sono intervengono effetti diversi di tipo elioclimatico) consentono una efficace modellazione del problema dello scambio termico secondo schemi che rispondono alla conduzione termica. Sono facilitate pertanto nel caso degli scambiatori verticali la simulazione del comportamento del sistema sonde/pompa di calore ed il progetto del campo sonde medesimo rispetto ai requisiti termici dell'edificio ed alle prestazioni attese.

Nei sistemi a circuito chiuso verticale lo scambiatore è costituito da tubazioni, in genere in polietilene, annegate in un materiale di riempimento ad alta conducibilità termica che riempie lo spazio rimanente all'interno della perforazione. Le tubazioni più utilizzate sono quelle a singolo e doppio U, ma esistono anche tubazioni a triplo U e di tipo coassiale.

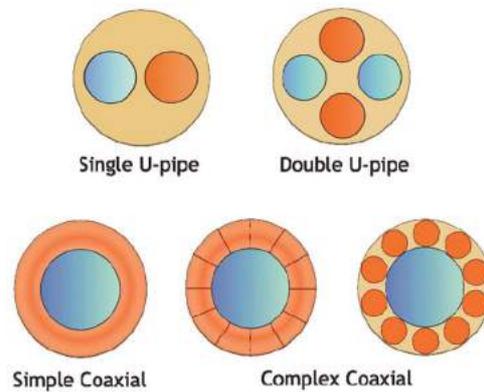


Figura 3-10: Sezioni trasversali di diverse di sonde geotermiche verticali

Le sonde geotermiche orizzontali, che seguono come diffusione quelle di tipo verticale, si sviluppano poco al di sotto del piano di campagna (0.5-1.2 m), valendosi principalmente del contributo della radiazione solare (e degli apporti di massa con le precipitazioni) anziché del flusso geotermico. Il posizionamento dell'impianto assume pertanto grande rilevanza, in termini di costruzioni al di sopra dell'impianto, impermeabilizzazione del terreno, ombreggiamenti.

Da un lato la disposizione orizzontale è interessante perché permette di evitare i costi di perforazioni in profondità, ma dall'altro necessita di notevoli estensioni di terreno su cui realizzare lo scavo, il che ne limita in molti casi la realizzabilità pratica.

I sistemi in trincea possono avere diversa forma ma sono in genere costituiti da moduli in polietilene interrati per alcuni metri di profondità e sono collegabili in serie o in parallelo tra loro. Tra questi, la configurazione più commercializzata è quella cosiddetta a basket: il tubo di polietilene viene avvolto attorno ad una struttura di irrigidimento in modo da ottenere la forma di una molla di diametro di circa 60 cm ed alta 3 metri, il cui interno viene riempito dopo il posizionamento nel terreno con sabbia silicea. I basket vengono poi collegati in serie di 3 o 4 elementi e questi vengono collegati a loro volta al collettore in centrale termica. Essendo il meccanismo di ricarica dei minicollettori simile a quello delle sonde geotermiche orizzontali, anche in questa configurazione si devono evitare ostacoli che impediscano l'azione dei raggi solari.

I pali energetici sono costituiti da tubi in polietilene annegati all'interno di pali strutturali. Questo tipo di soluzione, adottabile quando in caso di nuova costruzione siano necessarie fondazioni a pali o micropali, ha una resa termica inferiore rispetto a quella di una sonda verticale, in quanto i materiali utilizzati non sono ottimizzati per lo scambio termico ed inoltre perché la necessità dei pali si ha tipicamente in presenza di terreni a granulometria fine, caratterizzati da caratteristiche geotecniche (e termiche) scadenti. A livello di costi, il risparmio sui costi di perforazione è, per lunghezze dei pali ridotte, limitato dai maggiori costi da sostenere per la distribuzione orizzontale. Un altro aspetto critico di questa applicazione è legato ai problemi strutturali potenzialmente derivanti da dilatazioni e successive restrizioni dei pilastri energetici.



Figura 3-11: Sistemi geotermici a circuito chiuso di tipo orizzontale



Figura 3-12: Collettore in trincea del tipo a basket e minicollettore a tubi paralleli



Figura 3-13: Rappresentazione di sistema geotermico a circuito chiuso del tipo a pali energetici

3.2.4.5 *Sonde geotermiche verticali*

La sonda geotermica, pur essendo un componente molto semplice dell'impianto geotermico, riveste un'enorme importanza in termini tecnici ed economici per il funzionamento dello stesso. E' costituita da tre elementi fondamentali: le tubazioni, il piede ed il materiale di riempimento, e da tre elementi ausiliari alla posa: il tubo di iniezione, la zavorra ed i distanziali.

3.2.4.6 *Tubazioni*

Le tubazioni si suddividono essenzialmente in tubazioni ad U e tubazioni coassiali. Le tubazioni ad U, che costituiscono la soluzione adottata nella maggior parte dei casi in ragione del fatto che le operazioni di inserzione nella perforazione risultano più agevoli rispetto alle sonde coassiali, più rigide ed indeformabili. Nell'ambito delle geometrie ad U, l'impiego delle sonde a doppia U rispetto a quelle a singola U presenta alcuni vantaggi, quali una minore resistenza termica della perforazione e la garanzia, in caso di occlusione di una delle due tubazioni, dell'operatività del tubo rimanente, con una copertura che può arrivare al 70-85% dell'originale. Le sonde a doppia U, tuttavia, soffrono di maggiori interferenze termiche (cortocircuito termico) e i due rami ad U devono essere bilanciati idraulicamente.

Il polietilene è stato individuato come materiale principe per la realizzazione di scambiatori interrati. Ad oggi infatti la maggior parte delle installazioni utilizza polietilene ad alta densità, denominato HDPE (acronimo inglese) o PEAD (acronimo italiano). Sono inoltre diffuse le soluzioni utilizzando polietilene reticolato ad alta densità PE-XA, che consentono temperature di lavoro molto elevate senza limitare la resistenza meccanica (fino a 70°C a pressione di 8 bar). Le tubazioni in polietilene reticolato (PE-XA), il quale rispetto al PEAD presenta migliore comportamento a carichi puntuali sulla parete e soprattutto maggior campo di utilizzo in termini di temperatura (da -40°C a +95°C). Per contro, a parità di spessore, il PE-XA resiste meno alla pressione, ha conducibilità termica peggiore ed è considerevolmente più caro.

La conducibilità del polietilene è in genere bassa, variando da 0.38 a 0.40 W/mK, per cui si tenta di minimizzare lo spessore delle pareti delle tubazioni, compatibilmente con le necessità di resistenza meccanica delle stesse. Il compromesso migliore tra scambio termico e resistenza meccanica è costituito dalle tubazioni PN 16, ossia da tubazioni che mantengono le proprie caratteristiche meccaniche sino a 16 bar.

Per una tubazione 32x3mm (diametro esterno x spessore) la resistenza termica del singolo U (due tubi, resistenze termiche in parallelo) vale circa 0.04 mK/W e può risultare anche pari alla metà della resistenza termica complessiva del borehole R_{bhe} .

I diametri (esterni) maggiormente utilizzati sono il De25 sino a lunghezze di circa 80 m, il De32 fino a lunghezze di 150 m ed il De40 oltre i 150 m.

In commercio sono presenti anche mescole di polietilene denominate PE-RC (Resistant to Crack), che è molto simile al PEAD ma ha migliore comportamento meccanico ed ha un costo solo leggermente superiore.

Il punto più delicato di una tubazione ad U è costituito dal piede di sonda, ovvero dal raccordo tra le tubazioni di mandata e di ritorno al fondo della sonda geotermica. La soluzione che si è affermata prevede la giunzione dei tubi con un profilato dello stesso materiale delle sonde, il quale viene generalmente saldato in fase di lavorazione di fabbrica. I piedi di sonda sono talvolta dotati, nel punto più basso, di un pozzetto in grado di raccogliere eventuali oggetti che dovessero cadere nella tubazione durante l'installazione, i quali in assenza dello stesso ostruirebbero la sezione di passaggio per tutto il tempo di operatività dell'impianto. Sonde in PE-XA vengono anche realizzate senza giunzione in piede di sonda, con semplice curvatura del tubo di base.

Art. Nr. Art. n° Part no	Rohr Ø mm * Tubo Ø mm Diameter Ø mm	Länge m Lungh. m Length m	Bezeichnung Descrizione (EWS = sonda geotermica) Description (EWS = Geothermal probe)	Gewicht/Stk kg Peso/pezzo kg Weight kg
06.5635	25 x 2.3	50 m	EWS 4 x 25 mm UL 32 – 25 HMS 50 m	36
06.5636	25 x 2.3	70 m	EWS 4 x 25 mm UL 32 – 25 HMS 70 m	51
06.8185	32 x 2.9	50 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 50 m	61
06.8183	32 x 2.9	60 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 60 m	72
06.8184	32 x 2.9	70 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 70 m	83
06.5637	32 x 2.9	80 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 80 m	92
06.8090	32 x 2.9	90 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 90 m	104
06.5639	32 x 2.9	100 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 100 m	115
06.8024	32 x 2.9	112 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 112 m	129
06.5641	32 x 2.9	125 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 125 m	144
06.8023	32 x 2.9	137 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 137 m	158
06.5643	32 x 2.9	150 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 150 m	173
06.8066	32 x 2.9	162 m	EWS 4 x 32 mm UL 32 – 25 HSS 162 m	186
06.8426	40 x 3.7	80 m	EWS 4 x 40 mm UL 40 – 32 HSS 80 m	139
06.8020	40 x 3.7	102 m	EWS 4 x 40 mm UL 40 – 32 HSS 102 m	186
06.8311	40 x 3.7	127 m	EWS 4 x 40 mm UL 40 – 32 HSS 127 m	231
06.8427	40 x 3.7	140 m	EWS 4 x 40 mm UL 40 – 32 HSS 140 m	242



(*) Ext Diameter x Thickness

Density: 950, Specific heat: 2000, Th. Conductivity: 0.4, (SI Units)

Figura 3-14: Tubazioni in polietilene per sonde geotermiche verticali, caratteristiche geometriche



Figura 3-15: piede di sonda verticale a singolo U e particolare della zavorra (Fonte: Rehau)

3.2.4.7 Materiali di riempimento

Il materiale di riempimento viene immesso a pressione nella perforazione una volta che vi siano state calate le sonde; durante quest'operazione deve essere prestata massima attenzione affinché non si creino interstizi vuoti, causa di forte riduzione dello scambio termico. I materiali di riempimento possono essere distinti in materiali sciolti e malte cementizie. I materiali sciolti risultano particolarmente indicati in presenza di formazioni geologiche sature, in quanto permettono lo scorrimento delle acque sotterranee a diretto contatto con le sonde, migliorando sensibilmente lo scambio termico. Tuttavia i rischi nell'impiego di materiale sciolto sono in genere maggiori, ragione per cui, ad esclusione delle installazioni in roccia sana o in sistemi monofalda, generalmente si ricorre alle malte cementizie. In scandinavia è diffuso invece l'uso di acqua di falda per riempire la perforazione, generalmente realizzata in roccia di tipo granitico.

In questo ultimo decennio sono state sviluppate malte cementizie (grout) specifiche per applicazioni geotermiche, in grado di assicurare compatibilità ambientale con il terreno circostante, buone caratteristiche termiche (conducibilità termica fino a $2 \text{ W}/(\text{m K})$) e favorevoli proprietà fluido meccaniche per il pompaggio in-situ. Solitamente si distinguono due macrogruppi: miscele in varie proporzioni di

cemento Portland e bentonite; composti premiscelati termicamente migliorati di cemento Portland, bentonite, sabbie quarzifere ed altri additivi.

3.2.4.8 Ausiliari alla posa

I principali ausiliari alla posa delle tubazioni verticali sono il tubo di iniezione, la zavorra ed i distanziali.

Il tubo di iniezione, necessario per pompare la malta cementizia da fondo foro, è generalmente a perdere. Si utilizzano di solito tubazioni in HDPE, di tipo analogo a quelle impiegate per la sonda, di diametro da valutarsi in funzione delle proprietà del riempimento, della profondità del foro e della lunghezza della tubazione (di uso comune il diametro De25). Per sonde molto lunghe può essere conveniente optare per l'utilizzo di due tubazioni di iniezione, con sbocco una a fondo foro e l'altra a 50-100 metri di profondità.

La zavorra ha la funzione di contrastare le spinte di galleggiamento in caso il foro sia pieno d'acqua o di fanghi di perforazione e di guidare il piede delle tubazioni all'interno del foro per evitare il rischio d'impuntamento contro le pareti laterali. Come per il tubo di iniezione, normalmente si tratta di un ausiliario a perdere. E' costituito da un cilindro di ferro (meno comunemente di calcestruzzo) del diametro di 8-10 cm e della lunghezza necessaria a raggiungere il peso voluto. Quest'ultimo dipende dalla profondità della perforazione, dal livello piezometrico dell'acqua, dalla sua eventuale velocità di risalita e dalla densità dei fluidi di perforazione, variando dai 12 agli 80 kg.

I distanziali sono elementi prestampati generalmente in plastica dove possono incastrarsi le tubazioni della sonda a distanza prefissata. Questi distanziali hanno quindi 2 o 4 sedi per le tubazioni principali ed una sede per il tubo di iniezione. L'interdistanza massima di posa è di 10 m, oltre la quale l'effetto del distanziale risulta molto ridotto.



Figura 3-16: tipologie di distanziali per sonde doppio U (Fonte: HakaGerodur)

3.2.4.9 Fluidi termovettori

Il fluido termovettore nei sistemi a circuito chiuso può essere acqua qualora sia possibile assicurare che le temperature di lavoro non scendano al di sotto dei 0°C. Questa condizione richiede un accurato dimensionamento del campo sonde ed in generale maggiori superfici di scambio termico. Miscele di acqua ed antigelo sono più comunemente impiegate. Gli antigelo utilizzati più comunemente sono il glicole propilenico ed il glicole etilenico, ma si utilizzano in alcuni casi anche il metanolo, l'etanolo, il cloruro di sodio, il cloruro di calcio e l'acetato di potassio.

Attualmente l'anticongelante di uso più comune è il glicole propilenico, non tossico e non infiammabile. Tuttavia il glicole propilenico causa problemi di corrosione ed è più viscoso degli altri fluidi, determinando perciò un aumento dei consumi di pompaggio. La soluzione di glicole propilenico generalmente utilizzata è al 25%, sicura sino a -10°C.

[11] [14]

4 Simulazione in ambiente EnergyPlus di un sistema serra- impianto di climatizzazione

In questo capitolo viene descritta la modellazione dinamica oraria di una serra agricola realizzata con il software open source EnergyPlus, al fine di ottenere i fabbisogni energetici orari per il condizionamento ambientale, tenendo anche in considerazione il rilevante contributo dell'evapotraspirazione delle colture al bilancio energetico. Successivamente viene anche riportata la procedura per il dimensionamento del campo sonde geotermiche accoppiate con l'impianto a pompa di calore.

4.1 La modellazione dinamica degli edifici

EnergyPlus è un codice di calcolo per la modellazione dinamica degli edifici, sviluppato con il contributo scientifico dell'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Technical Committee 4.7 Energy Calculation). Il software sta assumendo un'ampia rilevanza in ambito scientifico, motivata anche dal fatto che si tratta di un codice *open source*.

EnergyPlus consente, attraverso simulazioni dinamiche, la stima dei carichi energetici orari di un edificio (residenziale, commerciale o industriale) e permette di condurre un'analisi integrata del rendimento energetico dell'edificio in esame e degli impianti che ne fanno parte.

EnergyPlus è un software costruito in ambiente Fortran, e presenta una struttura costituita da moduli e solutori numerici, che lavorano simultaneamente. L'architettura del software può essere descritta come l'interazione di tre moduli principali:

- *Surface Heat Balance Manager*: risolve il bilancio termico in corrispondenza di ciascuna parete;
- *Air Heat Balance Manager*: risolve il bilancio sull'ambiente interno attraverso la simulazione simultanea degli scambi termici radiativi e convettivi;
- *Building System Simulation Manager*: conduce la simulazione degli elementi impiantistici.

L'interazione dei moduli richiede due Timestep:

- *Zone Timestep*: per l'analisi delle interazioni tra le zone termiche e l'ambiente esterno (è definito dall'utente);
- *System Timestep*: per l'analisi dei sistemi di climatizzazione (variabile e non direttamente modificabile dall'utente).

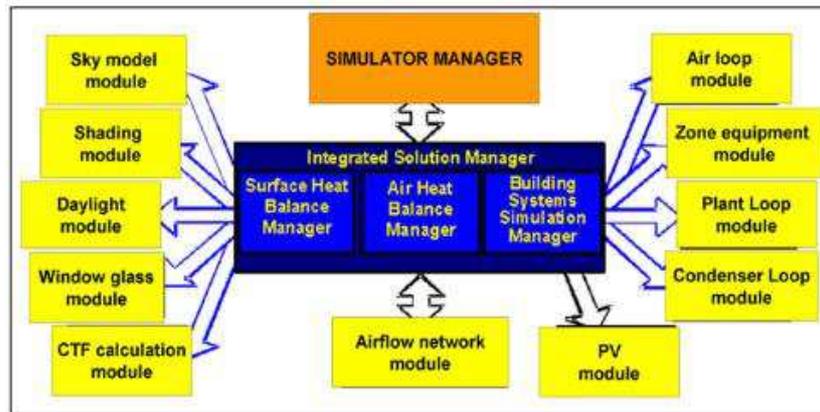


Figura 4-1: EnergyPlus: struttura interna.

In EnergyPlus i file d'input e output sono unicamente file di testo *.txt, ma esiste la possibilità di inserire moduli terzi, con quattro tipi di interfaccia, non tutti *open source*:

- *EnergyPlus Graphical User Interface*: software autonomi che utilizzano EnergyPlus come motore di ricerca (es. Design Builder, EFEN, AECOSim Energy Simulator, ...); una valida alternativa *open source* è costituita da Google Sketch Up;
- *Input File Creation Tools*: software per la creazione dei file *.idf (es. ESP-r, jEPlus, Easy Energy Plus, ...);
- *Building Geometry from CAD* (es. CAD Interoperability Data Model, Green Building Studio Web Service);
- *Other Tools*: serie di programmi sviluppati per singoli scopi quali a esempio l'accoppiamento con altri codici e software, la lettura e l'organizzazione grafica degli output (es. MLE+, DrawBDL+, xESOVView ...).

I creatori del software hanno tuttavia previsto una serie di programmi ausiliari *open source* quali l'*EP Launch* e l'*IDF Editor*.

L'*IDF Editor* opera attraverso *Object* per definire i dati del modello, suddivisi in categorie (Figura 4-2) quali a esempio:

- Ubicazione e orientazione
- Involucro edilizio: geometria e materiali
- Impianti
- Sistemi di controllo e regolazione

L'*EP Launch* permette di lanciare le simulazioni usando i dati di due file input:

- Weather File identifica il file climatico *.epw con i dati climatici orari dell'anno standard per la località d'interesse;
- Input file identifica il file *.idf, che contiene le informazioni sulla struttura, i materiali e gli impianti dell'edificio oggetto di studio.

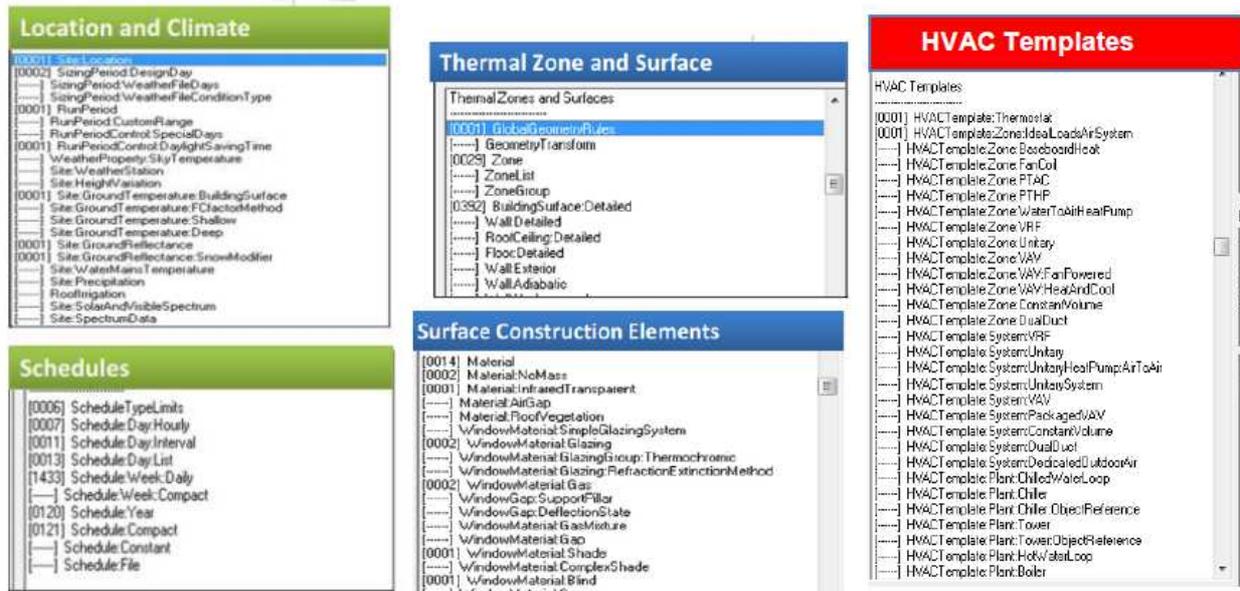


Figura 4-2: Esempi di moduli EnergyPlus

In funzione dell’obiettivo dell’analisi, in fase di costruzione del modello occorre anche selezionare gli output di interesse tra i numerosissimi a disposizione, specificando il passo temporale con cui si desidera conoscere il dato. Nel seguito vengono riportati alcuni esempi di output:

- *Output Variable*
 - dati climatici esterni (temperatura a bulbo asciutto e a bulbo umido, velocità del vento, radiazione diretta e diffusa, ...).
 - parametri microclimatici interni (temperatura media radiante, temperatura operativa, umidità relativa, ...);
 - coefficienti convettivi di scambio termico;
 - portata di rinnovo di aria esterna;
 - carico sensibile e latente (differenziando i diversi contributi).

4.1.1 Costruzione di un file meteo in ingresso al codice EnergyPlus

Il file climatico necessario come input per il modello EnergyPlus ha un’estensione *.epw. Tali file sono disponibili per diverse capitali europee e sono reperibili dal sito web EnergyPlus; in caso di file esterni, con diversa estensione, è disponibile un convertitore in EnergyPlus, *Weather Statistics and Conversion*.

Per il caso oggetto di studio i dati climatici di Albenga sono stati ottenuti come file *.tmy2 utilizzando il software Meteonorm v.5.1 (programma per la simulazione di dati climatici sviluppato dall’istituto meteorologico METEOTEST con sede a Berna) e successivamente convertiti in formato *.epw.

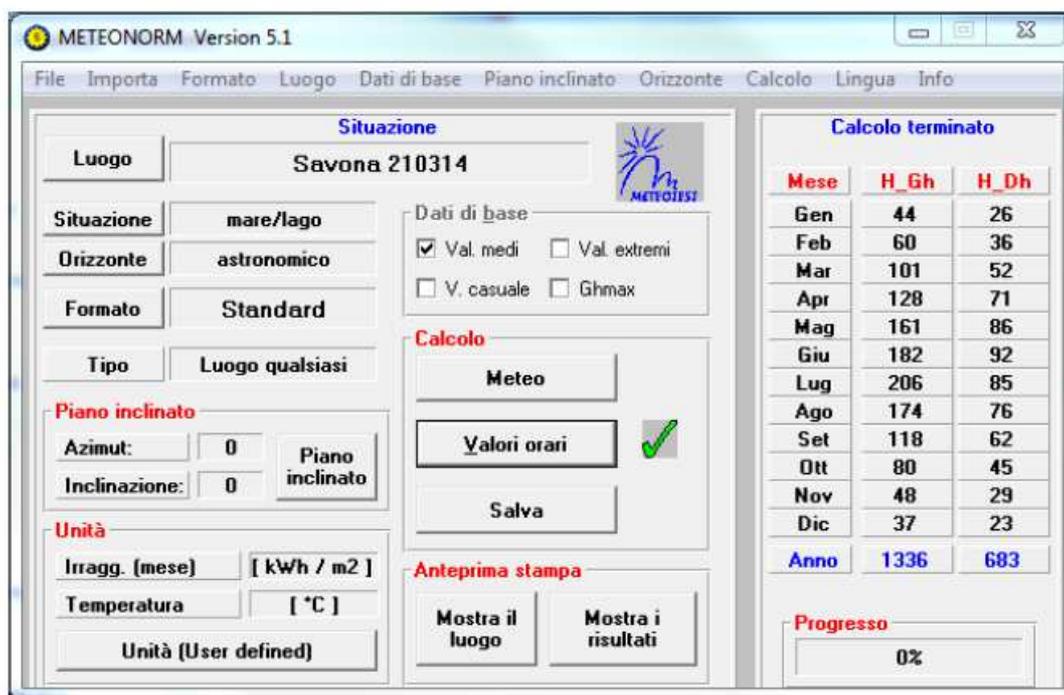


Figura 4-3: Meteonorm: Interfaccia del software di simulazione dei dati climatici

4.2 Modello di una serra agricola in EnergyPlus e stima dei carichi termici orari

La base di partenza dell'analisi energetica di ogni edificio è sempre la conoscenza approfondita dei dati climatici del sito geografico dell'edificio stesso. Il contesto geografico nel quale si è deciso di inserire la modellazione energetica dinamica della serra agricola oggetto dello studio è quello ligure, e più precisamente Albenga (latitudine: 44.3 DD, longitudine: 8.47 DD, altitudine: 3 m, fuso orario: +1 CET).

Schematicamente, gli elementi fondamentali analizzati del modello sono quattro:

- **Involucro:** definizione dei materiali, strutture e geometrie di pareti, pavimento e copertura;
- **Impianti:** definizione, anche attraverso l'utilizzo di *templates* presenti in EnergyPlus, delle soluzioni impiantistiche per il controllo termogrometrico all'interno della serra;
- **Controllo e regolazione:** definizione dei parametri di controllo e delle tecniche di regolazione per mantenere l'ambiente interno alle condizioni di progetto: una temperatura non inferiore a 16°C per la stagione invernale, una temperatura non superiore ai 30°C per quella estiva;
- **Evapotraspirazione:** nel complessivo bilancio termico di una serra agricola, è necessario considerare il rilevante contributo causato dall'evapotraspirazione delle colture.

4.2.1 Involucro

Il modello utilizzato per la simulazione è stato creato sulla base della geometria di una serra a doppia falda, con pianta rettangolare di dimensioni 9.9 m per i lati Nord e Sud e 15.3 m per quelli Est e Ovest. Le altezze di colmo e di gronda sono rispettivamente pari a 5.6 m e 3.5 m.

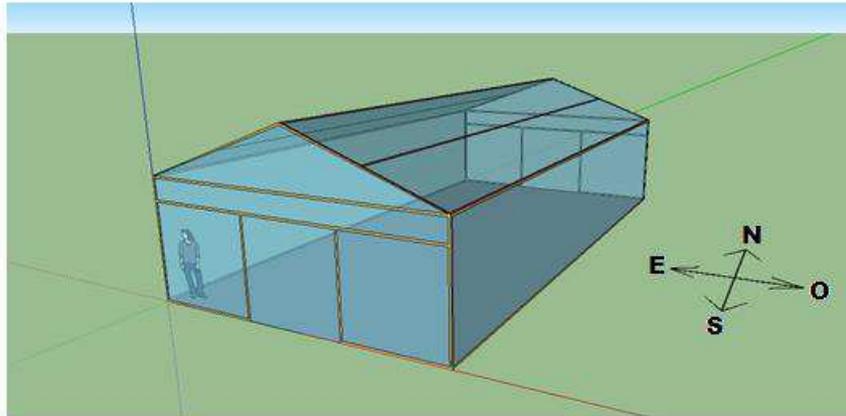


Figura 4-4: Esempio di visualizzazione mediante SketchUp del modello di serra utilizzato nelle simulazioni

Il modello dell'involucro, come visibile nella Figura 4-4, prevede superfici vetrate inserite in un'intelaiatura di acciaio inossidabile e una pavimentazione fittizia, con proprietà termofisiche assimilabili a quelle del terreno.

La finestratura di una serra vede la disposizione di più moduli di piccole dimensioni affiancati in serie, alcuni dei quali fissi e altri apribili, per consentire il ricambio d'aria. Nell'involucro modellizzato, per semplicità, i singoli moduli sono stati accorpati in pannelli vetrati unici più grandi; sono state tuttavia mantenute distinte, per poi procedere al controllo della ventilazione, due superfici apribili con funzione di portafinestra di ingresso e uscita, una sulla superficie Nord e una sulla superficie Sud, e altre due sulla parte inferiore della copertura, una per falda, al fine di rappresentare le aperture laterali frequentemente usate nella stagione estiva per il raffrescamento delle serre.

Una caratteristica propria delle serre agricole è quella di essere edifici quasi completamente vetrati; è quindi fondamentale la scelta del materiale, che per la modellazione in oggetto è un vetro a bassa emissività con spessore di 4 mm, coefficiente di scambio termico globale pari a $3.3 \text{ W/m}^2\text{K}$, emissività normale uguale a 0.05 e guadagno solare (g-value) del 71%.

4.2.2 Impianti e sistemi di regolazione e controllo

Il sistema del condizionamento dell'aria della serra oggetto della modellazione prevede:

- Sistema di ombreggiamento da applicare alle superfici vetrate;
- Ventilazione naturale mediante apertura controllata delle finestre;
- Ventilazione forzata di aria esterna;

- Ventilazione forzata di aria trattata dall'Unità di Trattamento Aria (UTA) sia per il riscaldamento sia per il raffrescamento.

Nel modello il controllo di ciascun elemento del sistema di condizionamento è realizzato per mezzo di differenti Oggetti (i.e. *Schedules*) disponibili in Energy Plus, corredati con opportuni profili temporali (mensili, giornalieri, orari o sub-orari) o con set-point specifici di accensione/spegnimento.

Il **sistema di ombreggiamento** è implementato nel modello attraverso l'oggetto *Window Property: Shading Control* che specifica il tipo, la posizione e i controlli, per condizioni operative sia estive sia invernali. Il funzionamento delle tendine ombreggianti, il cui effetto sulla climatizzazione ha tempi di risposta più lenti rispetto alla ventilazione, è previsto a partire da una temperatura interna dell'aria nella serra di 24°C.

La **ventilazione naturale** opera sia in estate sia in inverno ed è modellata attraverso due diversi oggetti: *Zone Infiltration: Design Flow Rate* e *Zone Ventilation: Wind and Stack Open Area*.

Il modulo *Zone Infiltration* soddisfa minimi ricambi di aria per ora definiti da una opportuna *Schedule* (0.25 durante gli orari di lavoro, 0.15 durante la notte e i periodi di vacanza).

Il modulo *Zone Ventilation* rappresenta la ventilazione naturale di aria esterna non trattata, causata da un effetto camino realizzato aprendo le finestre posizionate opportunamente sulla superficie vetrata della serra. L'apertura delle finestre avviene quando la temperatura dell'aria interna è superiore a 24°C durante la stagione estiva e a 26°C durante la stagione invernale, con frazioni di apertura evidentemente differenti tra periodo invernale e periodo estivo.

Infatti, in un edificio completamente vetrato (vetri a bassa emissività), come la serra della simulazione in oggetto, anche nelle giornate soleggiate del periodo invernale, quando generalmente l'impianto di riscaldamento è in funzione e il ricambio d'aria è inevitabilmente ridotto al minimo imposto dalle normative, si può presentare l'inconveniente di raggiungere internamente temperature molto elevate a causa di un eccessivo effetto serra. Nelle simulazioni si evidenzia come l'immediato spegnimento dell'impianto di riscaldamento molto spesso non sia sufficiente per ripristinare velocemente nella serra la temperatura ottimale per la crescita e lo sviluppo delle colture; pertanto si è reso necessario estendere anche al periodo invernale l'utilizzo di alcune delle tecniche di riduzione degli apporti energetici e smaltimento del calore adottate nel periodo estivo, come quella della ventilazione naturale.

Sempre per ridurre al minimo eventuali dispersioni causate da eccessivi ricambi d'aria, un controllo supplementare per la ventilazione naturale proprio nel periodo invernale è collegato alle condizioni dell'aria esterna che consentono l'uso della ventilazione naturale: la temperatura esterna dell'aria deve essere più alta di 16°C e la velocità del vento inferiore a 10 m/s.

La **ventilazione forzata di aria esterna** e la **ventilazione forzata di aria trattata dall'UTA** (riscaldamento e raffrescamento) sono modellate attraverso la combinazione degli oggetti

HVAC Template/Thermostat, HVAC Template/ Zone/Ideal Loads Air System, Design Specification/ Outdoor Air.

In particolare, l'uso di aria esterna è scelto sulla base di particolari impostazioni selezionate nel campo *Outdoor Air Economized Type* che consente l'aumento della portata di aria esterna quando è richiesto un carico di raffrescamento e la temperatura dell'aria esterna è inferiore a quella interna del locale da condizionare. Tale condizione di lavoro è molto frequente nel funzionamento invernale di una serra agricola durante le giornate e gli orari di intenso soleggiamento.

Quando non è sufficiente la ventilazione forzata di aria esterna, per far fronte ai carichi di raffrescamento e riscaldamento, l'aria in ingresso nella serra è pretrattata dall'UTA (*HVAC ideal air system*) per rispettare le seguenti condizioni impostate: la temperatura interna dell'aria della serra non deve essere superiore a 30°C durante la stagione estiva (modalità di raffrescamento) e non inferiore a 16°C durante la stagione invernale (modalità di riscaldamento).

Infine, l'Unità di Trattamento Aria è accoppiata con una pompa di calore geotermica (Ground Coupled Heat Pump, GCHP) per mezzo di scambiatori di calore interrati verticali (Borehole Heat Exchangers, BHEs). Il campo di sonde geotermiche è simulato e dimensionato in accordo con i modelli sviluppati al DIME dell'Università degli Studi di Genova.

4.2.3 Evapotraspirazione

L'evapotraspirazione delle piante ET_0 consiste nel processo di evapotraspirazione di acqua liquida dalle foglie e dal terreno sottostante. Questo contributo di calore latente condiziona in modo rilevante il bilancio energetico di una serra agricola.

Nel presente studio il processo di evapotraspirazione è stato considerato usando il modello FAO Penman-Monteith, al fine di valutare il contributo orario in termini di calore latente dalla superficie della serra occupata dalle piante.

La correlazione principale del modello FAO Penman-Monteith è la seguente:

$$ET_0 = \frac{0.408 \left(\frac{dp}{dT} \right)_{sat} (G_n - G_g) + \gamma \frac{37}{T + 273} w (p_{sat, T_{hr}} - p_v)}{\left(\frac{dp}{dT} \right)_{sat} + \gamma (1 + 0.34 w)} \quad (1)$$

dove:

ET_0	evapotraspirazione standard [mm h ⁻¹]
$\left(\frac{dp}{dT} \right)_{sat}$	pendenza della curva di saturazione del vapore [kPa°C ⁻¹]
G_n	irradiazione netta sulla vegetazione [MJ/(m ² h)]
G_g	irradiazione netta sul terreno [MJ/(m ² h)]
γ	costante psicrometrica [kPa/K]
T_{hr}	temperatura media oraria dell'aria [°C]
w	velocità media oraria del vento [m/s]

$p_{\text{sat,Thr}}$ pressione di saturazione della temperatura dell'aria T_{hr} [kPa]

p_v pressione parziale del vapore media oraria [kPa]

Il modello era stato originariamente concepito per stimare i fabbisogni idrici delle coltivazioni all'aperto ed è stato qui adattato alle condizioni di una serra agricola facendo riferimento alle condizioni interne per i parametri di temperatura, umidità e irraggiamento. In particolare la correlazione è utilizzata assumendo le seguenti ipotesi:

- *Irradiazione solare*: i valori vengono ridotti (rispetto alle condizioni esterne) di circa il 30% per tenere in considerazione la trasmissività delle superfici vetrate della serra;
- *Temperatura dell'aria*: tale valore viene iterativamente modificato sulla base delle simulazioni di EnergyPlus, partendo da una condizione iniziale quando la evapotraspirazione è assente;
- *Umidità dell'aria*: il primo valore di tentativo è ottenuto dalle iniziali simulazioni in EnergyPlus senza contributo di evapotraspirazione e successivamente il valore viene modificato in accordo con le successive simulazioni iterative di EnergyPlus combinato con il modello di evapotraspirazione Penman-Monteith;
- *Velocità del vento*: viene assegnato un valore molto basso, il minimo consentito dal software (0.6 m/s);
- *Precipitazioni*: assenza di precipitazioni;
- *Indice di copertura nuvolosa*: viene effettuata una conversione dei dati meteorologici (cielo sereno 0, cielo nuvoloso 10) nella scala propria del modello Penman-Monteith (cielo sereno 1, cielo nuvoloso 0).

Il modello Penman-Monteith viene implementato in EnergyPlus usando l'oggetto *Water Use Equipment*, che è un generico oggetto usato per simulare in un edificio tutti gli usi finali di acqua e le loro frazioni di evaporazione. La portata massica di acqua associata non è costante ma segue la variabile attività di evapotraspirazione della vegetazione come descritto dal modello Penman-Monteith. In particolare l'evapotraspirazione è fortemente influenzata dall'irradiazione solare e presenta un andamento periodico durante il ciclo giorno-notte e in accordo con la variazione stagionale dell'irradiazione solare durante l'anno (Figura 5-5).

I valori orari di evapotraspirazione sono stati convertiti in profili giornalieri a tre gradini (un profilo tipo per ogni mese dell'anno) per rendere più agevole il loro inserimento in un'opportuna *Schedule* del modello in EnergyPlus (Figura 5-6). Per ogni profilo giornaliero, il primo gradino rappresenta il valore minimo di evapotraspirazione durante i periodi notturni ed è calcolato come valore medio mensile dei valori minimi giornalieri di evapotraspirazione tra tutti i giorni del mese preso in considerazione. Il gradino più alto rappresenta il valore massimo di evapotraspirazione corrispondente alle ore di massima irradiazione solare ed è calcolato come valore medio mensile dei valori massimi giornalieri di evapotraspirazione tra tutti i giorni del mese in esame. Il gradino intermedio caratterizza le rimanenti ore del giorno ed è calcolato come media tra i due valori precedenti.

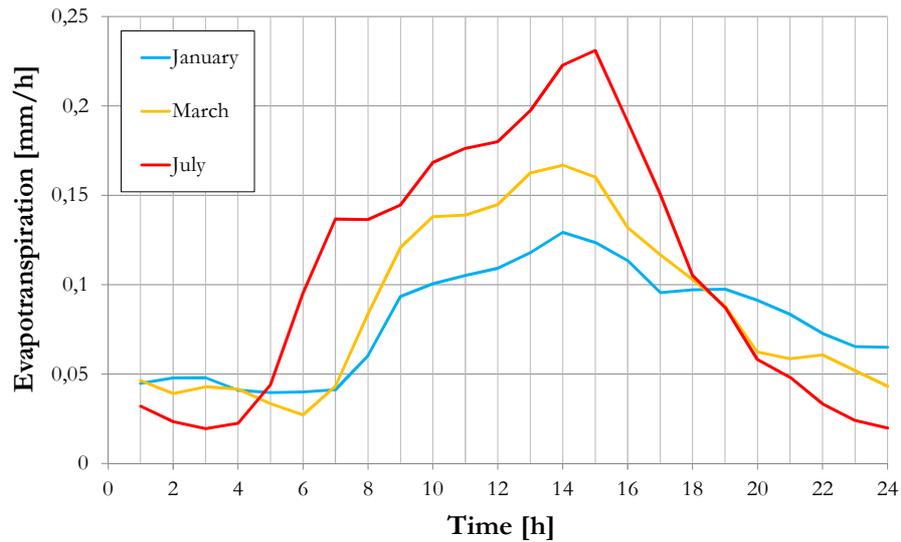


Figura 5-5: Valori orari di evapotraspirazione per un giorno rappresentativo del mese in esame, ottenuto con il modello Penman-Monteith

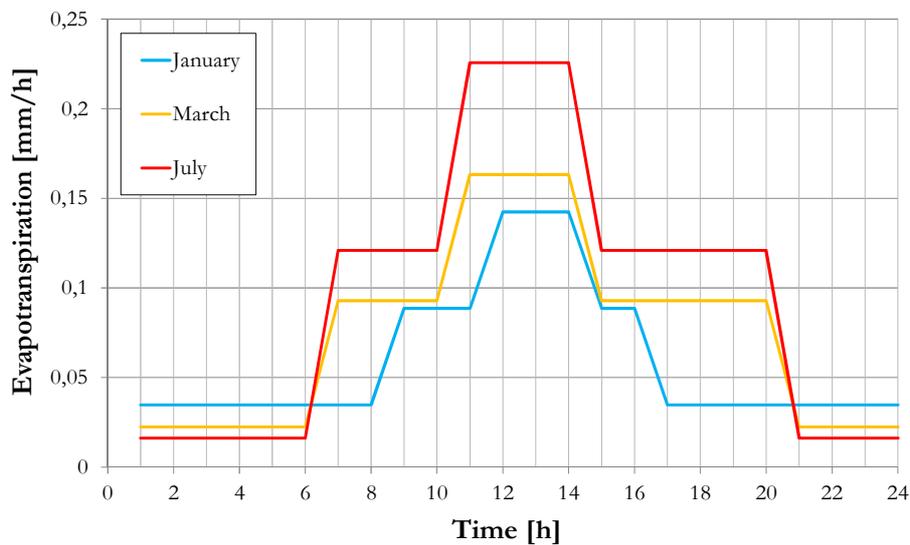


Figura 5-6: Valori orari di evapotraspirazione per un giorno rappresentativo del mese in esame convertito in un profilo giornaliero medio a tre gradini

Le figure confermano il prevedibile comportamento giornaliero dell'evapotraspirazione, con valori minimi durante le ore notturne e massimi durante le ore corrispondenti al mezzogiorno che presentano un'irradianza solare maggiore, e la generale tendenza del fenomeno a crescere dai mesi invernali a quelli estivi, a dimostrazione di una più intensa attività biologica delle piante nei mesi più caldi dell'anno rispetto a quelli freddi invernali.

4.2.4 Risultati: carichi termici orari

Sulla base del file *.idf contenente il modello di serra descritto nei precedenti paragrafi, e del file *.epw contenente i dati climatici di Albenga, è stata lanciata tramite EP-Launch la simulazione conclusiva in ambiente EnergyPlus, con la quale si sono ottenuti sotto forma di file *.csv i valori orari per tutto l'anno dei parametri di interesse.

Alcuni tra i parametri più significativi per la caratterizzazione climatica della località nella quale è posta la serra oggetto di studio sono la temperatura esterna dell'aria [°C], l'umidità relativa esterna [%] e la velocità del vento [m/s].

Le grandezze che consentono di verificare il raggiungimento e mantenimento della condizioni di progetto per le varie zone dell'edificio in esame sono, tra le altre, la temperatura interna dell'aria [°C], l'umidità specifica interna [-] e l'umidità relativa interna [%].

La Figura 4- 5-7 e Figura 4- riportano gli andamenti, ottenuti con le simulazioni EnergyPlus, della temperatura interna alla serra (Greenhouse: Zone air temperature) e di quella esterna (Outdoor air drybulb temperature) dei mesi di Gennaio e Luglio, rispettivamente il più freddo e il più caldo dell'anno. Le temperature interne rispettano perfettamente i valori dei set-point imposti, rispettivamente di temperatura minima di 16°C durante la stagione invernale e di temperatura massima di 30°C durante la stagione estiva.

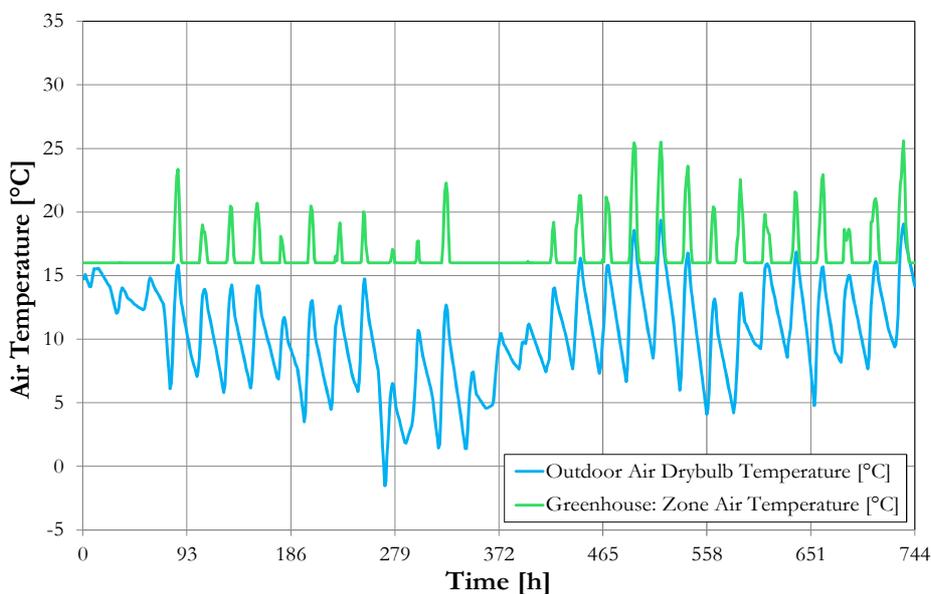


Figura 4-7: Andamenti orari delle temperature esterne e interne nel mese di Gennaio

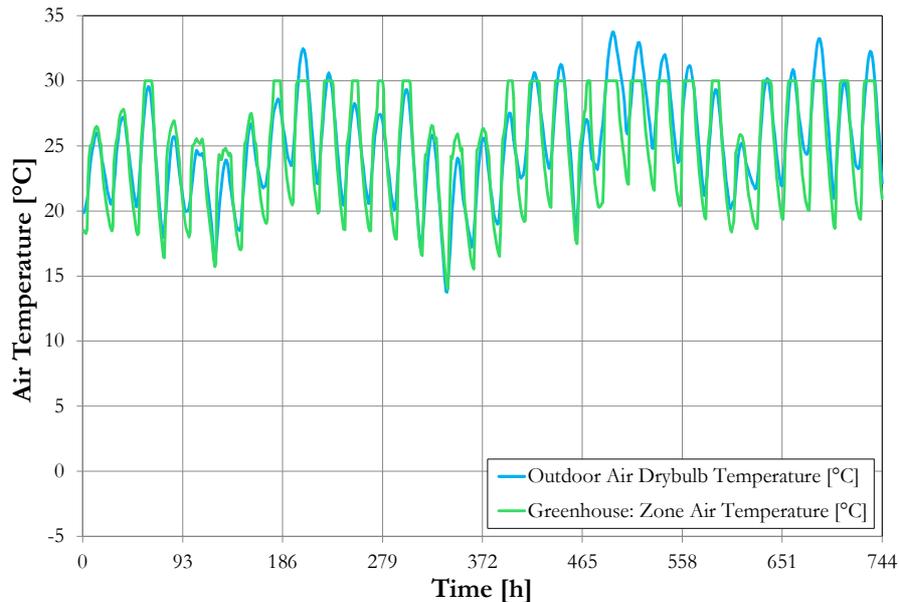


Figura 4-8: Andamenti orari delle temperature esterne e interne nel mese di Luglio

Nel mese di Gennaio si nota inoltre che i picchi di temperatura presenti nel grafico, causati dall'accentuato effetto serra riscontrato nelle ore più calde di alcune giornate particolarmente soleggiate, non superano mai i 26°C, per via dell'attivazione della ventilazione naturale tramite l'apertura delle finestre impostata proprio al raggiungimento dei 26°C di temperatura interna durante l'inverno.

Nel mese di Luglio le tecniche di raffrescamento passivo adottate (tendine di ombreggiamento e ventilazione naturale) fanno sì che la temperatura interna presenti un andamento simile alla temperatura esterna, smaltendo con efficacia il calore eccessivo causato dall'accentuato effetto serra.

I principali output degli oggetti *Zone Infiltration: Design Flow Rate* e *Zone Ventilation: Wind and Stack Open Area* sono i numeri di ricambi orari di aria per infiltrazione [ach] e i numeri di ricambi orari di aria per ventilazione [ach]. Da questi valori è possibile calcolare il carico termico sensibile per convezione naturale (Natural Convection Sensible Cooling Rate) [MWh] (Tabella 1 e Figura 5-9).

I principali output dell'oggetto *Water Use Equipment*, strettamente legato all'effetto dell'evapotraspirazione sui carichi termici orari (contributo latente) sono la portata massica totale di acqua [kg/s], il flusso termico latente [W] e la portata massica di contenuto di vapore nell'aria [kg/s]. Da questi parametri è possibile dedurre il carico termico per evapotraspirazione [MWh] (Tabella 1 e Figura 5-9).

I carichi termici sensibili sia per il riscaldamento sia per il raffrescamento fanno distinzione tra i carichi direttamente derivanti dall'Unità di Trattamento Aria (UTA) e quelli complessivamente forniti alla zona dell'edificio oggetto di studio. Le differenze tra questi due diversi carichi, rilevanti solo in raffrescamento, rappresentano il contributo dell'economizzatore (*Outdoor Air Economized Type*), ovvero il contributo dovuto alla convezione forzata di aria esterna.

In conclusione, tra i risultati più rilevanti delle simulazioni EnergyPlus ci sono i valori orari dei carichi termici e in particolare:

- i carichi della UTA, sia in riscaldamento sia in raffreddamento (HVAC Sensible Heating Rate [MWh], HVAC Sensible Cooling Rate [MWh]);
- il carico per ventilazione forzata di aria esterna (Forced Convection Sensible Cooling Rate [MWh]);
- il carico relativo alla convezione naturale (Natural Convection Sensible Cooling Rate [MWh]);
- il carico di evapotraspirazione (Evapotranspiration [MWh]).

Tali dati, considerati mese per mese, sono riportati in Tabella 4- e in Figura 4-.

Mesi	HVAC Sensible Heating Rate [MWh]	HVAC Sensible Cooling Rate [MWh]	Forced Convection Sensible Cooling Rate [MWh]	Natural Convection Sensible Cooling Rate [MWh]	Evapotranspiration [MWh]
1	3,8004	0,0000	0,0000	0,0024	0,0151
2	3,1254	0,0000	0,0000	0,0247	0,0439
3	2,0493	0,0000	0,0011	0,2176	0,1770
4	1,4183	0,0000	0,0000	0,4751	0,3653
5	0,0000	0,0004	0,0216	2,0287	0,7480
6	0,0000	0,2971	0,1946	2,5111	1,2237
7	0,0000	1,5003	0,3335	1,5709	1,6563
8	0,0000	1,5181	0,2927	0,7097	1,4616
9	0,0000	0,3289	0,2822	0,3994	1,2052
10	0,6016	0,0000	0,0058	0,3206	0,6997
11	2,2714	0,0000	0,0000	0,0194	0,2268
12	3,7744	0,0000	0,0000	0,0000	0,1557

Tabella 4-1: Risultati mensili di rilievo prodotti dalla simulazione

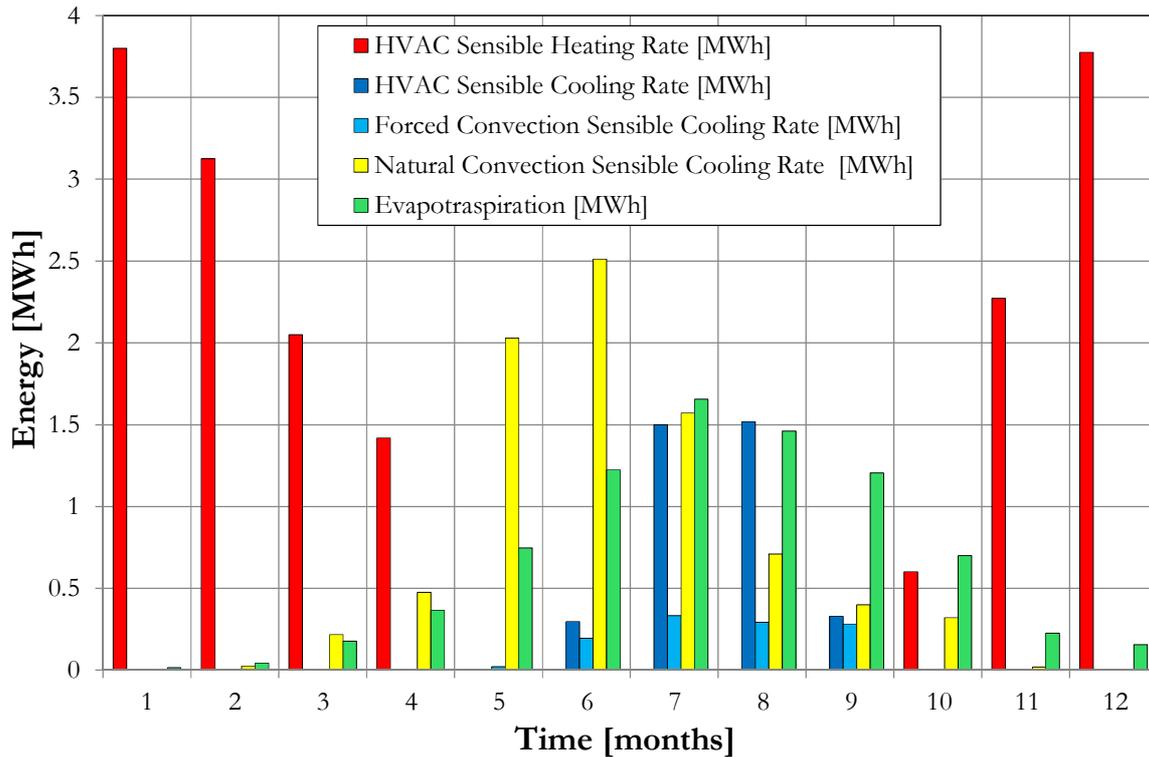


Figura 4-9: Contributi energetici [MWh] dei differenti sistemi di controllo termoigrometrico della serra.

Dall'analisi dei carichi termici mensili ottenuti si evincono le seguenti conclusioni.

Durante i mesi invernali è presente quasi solo esclusivamente il carico di riscaldamento dalla UTA e un minimo contributo dovuto all'evapotraspirazione.

Nei mesi intermedi, durante le giornate con alta temperatura esterna e negli orari di maggiore irraggiamento solare, è richiesto il raffrescamento ma è sufficiente la ventilazione naturale.

Durante i mesi estivi, la ventilazione naturale viene integrata inizialmente con ventilazione forzata di aria esterna per poi essere sostituita da ventilazione forzata di aria trattata dalla UTA quando la temperatura esterna diventa troppo alta e quindi sfavorevole.

Infine, l'attività di evapotraspirazione, fortemente influenzata dall'irraggiamento solare, presenta un andamento che segue le variazioni stagionali, con un massimo durante il mese di giugno; pertanto l'evapotraspirazione contribuisce in modo significativo alla refrigerazione della serra agricola e consente la riduzione dei consumi energetici durante la stagione di raffrescamento.

4.3 Dimensionamento del campo sonde per l'installazione di una pompa di calore geotermica

Lo sfruttamento delle risorse geotermiche a bassa entalpia per il condizionamento dell'aria rappresenta un'importante opportunità per ridurre i consumi energetici e le emissioni di gas nocivi anche nel settore del condizionamento dell'aria nelle serre agricole.

Le pompe di calore accoppiate con il terreno (Ground Coupled Heat Pumps, GCHPs) sfruttano le temperature favorevoli del terreno per ottenere alti valori di COP dell'impianto. Inoltre, nelle applicazioni in serra, le prestazioni delle pompe di calore sono ulteriormente migliorate dalle

temperature tipiche di funzionamento dell'impianto: basse per il condensatore durante il funzionamento in riscaldamento nella stagione invernale e relativamente alte all'evaporatore durante il funzionamento in raffrescamento nella stagione estiva. A esempio, nel modello in esame, i valori limite da mantenere come temperature interne alla serra sono 16°C in inverno e 30°C in estate.

Le pompe di calore geotermiche sono generalmente accoppiate con gli scambiatori di calore interrati (Borehole Heat Exchangers, BHEs) che giocano un ruolo chiave nel determinare le prestazioni della pompa di calore. Lo scopo del dimensionamento del campo sonde è la definizione della migliore geometria (distribuzione dei BHE, loro numero e interdistanza) e della minima lunghezza totale di tubi interrati al fine di ottenere opportune temperature del fluido vettore, in grado di garantire le prestazioni stagionali richieste della pompa di calore.

Nell'esempio oggetto di studio, i dati relativi ai carichi termici orari della UTA, ottenuti tramite le simulazioni in Energy Plus, vengono impiegati come dati di partenza per le simulazioni della pompa di calore geotermica e il COP della macchina inversa è calcolato iterativamente come funzione della temperatura variabile del fluido vettore che a sua volta dipende dalla temperatura variabile del volume di terreno che circonda il campo sonde.

La lunghezza totale richiesta per le sonde del campo viene calcolata secondo 3 diverse procedure, due con passo temporale mensile e una con scansione oraria:

- Software commerciale EED (Earth Energy Designer) (Hellström and Sanner 1994), che rappresenta uno dei riferimenti largamente utilizzati in tutto il mondo per il dimensionamento di campi di sonde geotermiche e, partendo da dati mensili di carichi termici, consente di realizzare simulazioni di campi sonde dalla geometria standard;
- Codice proprietario TecGeo, realizzato presso il DIME dell'Università degli Studi di Genova (Dalla Pietà and Fossa, 2006), consente di effettuare simulazioni mensili di campi di sonde geotermiche disposte in configurazioni dalla geometria non regolare e standard, come nel caso oggetto di studio rappresentato in Figura 5-10, dove le sonde geotermiche sono disposte intorno alla serra per non occupare eccessiva superficie in pianta;
- Codice proprietario MLAA17, realizzato presso il DIME dell'Università degli Studi di Genova (Fossa and Paietta, 2013) che rappresenta una versione leggermente modificata dell'algoritmo canadese MLAA (Bernier et al. 2004), e consente una simulazione oraria a partire dai dati orari dei carichi termici per il condizionamento ambientale di una serra agricola ottenuti con EnergyPlus.

La simulazione ha adottato una serie di parametri di ingresso e si basa su una serie di assunzioni. In particolare è stato preventivamente calcolato il Temperature Response Factor (noto anche come g-function) relativo alla particolare configurazione del campo sonde relativo alla installazione considerata (Figura 5.10). Tale calcolo è stato effettuato risolvendo il problema della conduzione tempo variante nel terreno ricorrendo alla soluzione nota come Finite Line Source ed applicando una tecnica di spatial superposition. Le proprietà termofisiche del terreno sono state arbitrariamente assunte sulla base di considerazioni relative alla litotipologia ligure e, in via

cautelativa per il calcolo, il solo meccanismo di scambio termico nel terreno che è stato considerato è la conduzione termica. Pertanto volontariamente non si è tenuto conto di eventuali flussi idrici di falda che potessero aumentare lo scambio termico rispetto al caso puramente conduttivo.

Queste informazioni inerenti il flusso idrico di falda e gli effetti convettivi/advektivati sullo scambio termico nel terreno sono state reperite successivamente alla fase di progetto e dimensionamento del campo sonde qui descritta quando, a campo sonde perforato ed installato, è stato possibile procedere ad una misura di Thermal Response Test.

Tornando ai parametri della simulazione, in particolare è stata assunta una conducibilità termica del terreno pari a 2.2 W/mK e una resistenza termica effettiva del BHE pari a 0.12 mK/W . La temperatura del terreno indisturbato è stata assunta pari a 16°C .

La simulazione oraria consente di calcolare il coefficiente di prestazione medio stagionale (Seasonal Performance Factor, SPF) che risulta uguale a circa 5.5.

Tutte le simulazioni sono state condotte per 25 anni e i diversi approcci (media mensile e calcolo orario) sono in buon accordo; entrambi inoltre sono in grado di descrivere il comportamento tempovariante del sistema di scambiatori di calore al terreno quando questi sono soggetti a una richiesta di calore variabile nel tempo, come calcolato con le simulazioni in EnergyPlus.

La Figura 5-11 mostra i risultati delle simulazioni effettuate con i Codici proprietari sviluppati presso il DIME dell'Università degli Studi di Genova: i valori orari della temperatura del fluido ottenuti con MAA17 sono in ottimo accordo con i valori medi mensili calcolati utilizzando TecGeo.



Figura 4-10: Pianta della serra e configurazione del campo sonde geotermiche

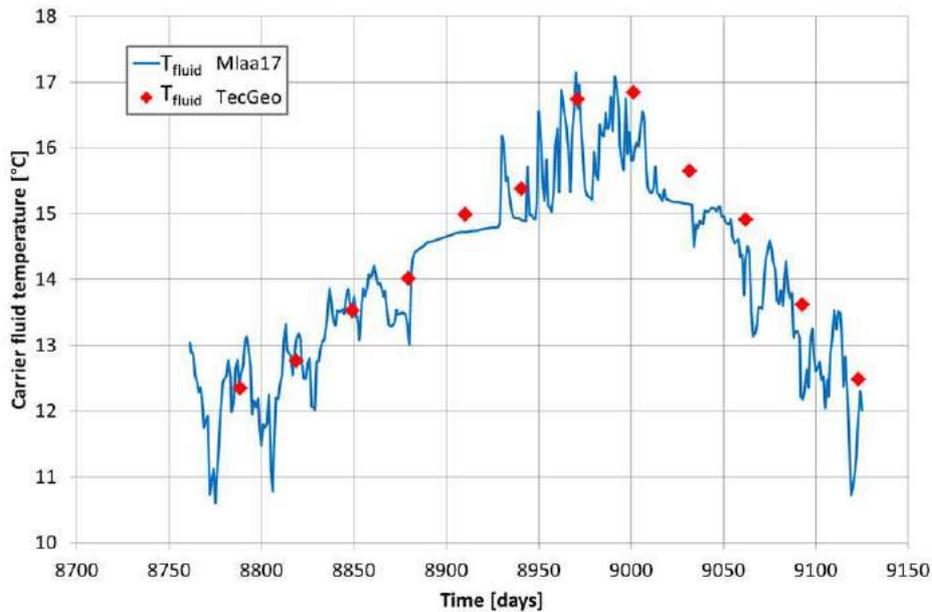


Figura 4-11: Risultati delle simulazioni al 25 anno eseguite con codici proprietari dell'Università di Genova

4.4 Misura ex post delle proprietà termofisiche del terreno nel sito Sam Lab (Thermal Response Test)

Le misure di cui alla presente sezione sono state effettuate successivamente alla realizzazione completa dell'impianto geotermico descritto nei paragrafi precedenti e si riferiscono ad una analisi del tipo Thermal Response Test (TRT) effettuata utilizzando la sonda geotermica BHE1 di figura 5.10.

I risultati dell'analisi TRT mostrano, come descritto nel seguito, che la risposta termica del terreno nel sito considerato supera di molto le prestazioni attese in termini di conducibilità termica considerate in fase di progetto e pertanto le prestazioni reali dal campo sonde molto ragionevolmente potranno essere anche superiori a quelle (già molto elevate) simulate per la fase di design.

In questo senso eventuali analoghe realizzazioni geotermiche nella zona di Albenga potrebbero avvalersi di scambiatori di minore lunghezza complessiva e quindi di minore costo iniziale.

Per le misure è stata utilizzato uno strumento denominato "Enhanced Thermal Response Test Machine" sviluppata da Dime per conto di Erde srl (Figura 5-12).

Tra le caratteristiche principali di questa macchina, la compattezza delle dimensioni (per minimizzare i disperdimenti termici), l'elettronica di controllo per quanto riguarda portata e flusso termico ed elettrico fornito al fluido vettore, l'utilizzo di sensori al platino calibrati singolarmente presso i laboratori di Dime, l'algoritmo proprietario per l'analisi delle misure in modalità di flusso termico tempovariante (g-function temporal superposition).

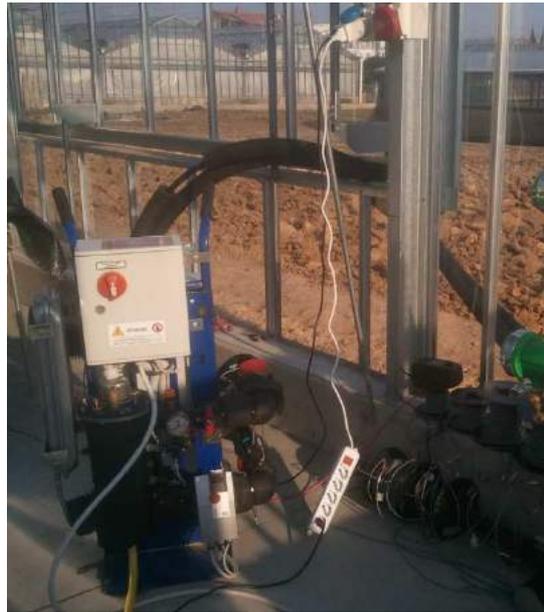


Figura 4-12: Dispositivo TRT Dime/Erde operante presso il la serra laboratorio Sam Lab di Albenga

Le grandezze che sono state misurate riguardano le temperature del fluido in mandata ed in ritorno dallo geoscambiatore, la temperatura dell'aria ambiente nei pressi della macchina TRT, le temperature dei principali componenti elettronici a bordo, la portata di liquido termovettore, la potenza elettrica istantanea. L'accuratezza delle misure è tipicamente del 2%. La macchina è stata coibentata nelle sue parti in temperatura ed è stato coibentato il tratto di tubazione di circa 8m che collega la macchina allo geoscambiatore verticale.

Le misure sono state effettuate con modalità innovativa a flusso termico variabile eseguendo una sequenza di carichi pulsati con flusso termico pari a 5000 W per circa 75 ore, successive 50 ore a flusso termico nullo ("recovery period"), ulteriori 90 ore a flusso termico costante pari a 7000W. Una fase iniziale di circa 2 ore a flusso termico nullo è stata utilizzata per la stima della temperatura indisturbata del terreno, che è risultata pari a 16.8°C.

La lunghezza dello geoscambiatore interrato (scambiatore BHE1) è stata assunta pari a 98m in base ad informazioni relative all'installazione della stessa.

Si rimanda alla letteratura scientifica inerente la metodologia TRT per quanto riguarda il modello interpretativo delle misure alle pubblicazioni scientifiche a firma M.Fossa e D.Rolando (e.g. Fossa et al., 2013, European Geothermal Congress).

4.4.1 *Dati sperimentali e principali risultati delle misure*

Si riportano nel seguito solo alcuni degli andamenti misurati. In Figura 5-13 vengono riportate le temperature misurate durante l'esperimento. Di interesse per la stima dei parametri termici del terreno sono le temperature T_{in} e T_{out} che si riferiscono, rispettivamente, alla temperatura del fluido termovettore all'ingresso ed all'uscita dello geoscambiatore. Durante le misure è stata evidenziato un marcato effetto del soleggiamento diurno (irradianza sulla parte fuori terra delle tubazioni) e delle variazioni della temperatura ambiente (temperatura dell'aria) sugli andamenti della temperatura del liquido termovettore. Tale effetto non è stato mitigato a sufficienza dalla

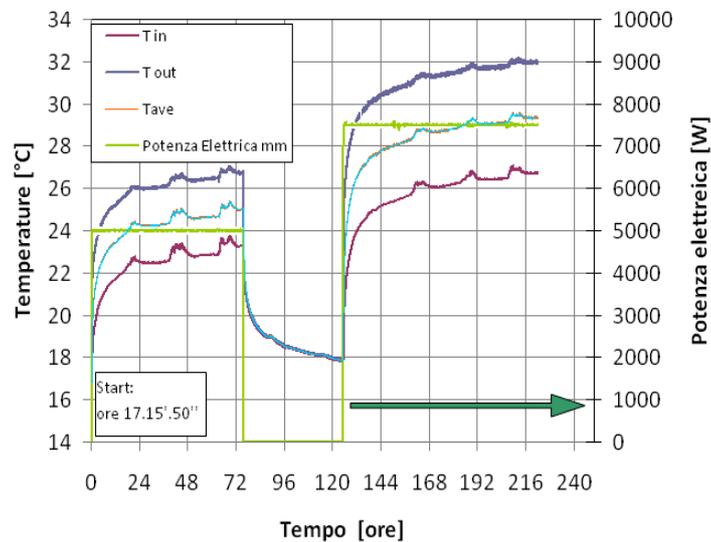


Figura 4-13. Andamenti di temperatura durante 220 ore di esperimento. Di interesse per la stima dei parametri sono da intendersi le grandezze T_{in} , T_{out} e la potenza elettrica fornita al fluido

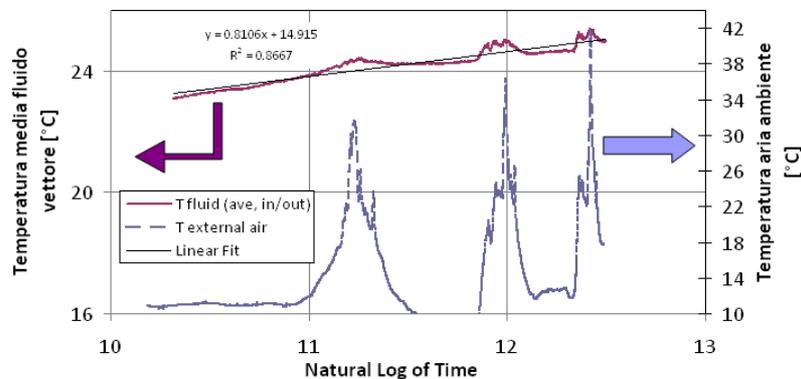


Figura 4-14. Andamento della temperatura media del liquido termovettore in funzione del tempo (scala logaritmica, prime 75 ore). Si evidenzia l'effetto della temperatura ambiente e dell'irraggiamento solare sull'andamento della temperatura del liquido vettore

coibentazione (armaflex spessore 20mm) delle tubazioni fuori terra anche se un miglioramento si è riscontrato nel periodo tra 100 a 220 ore per il quale le tubazioni fuori terra sono state rivestite di foglio riflettente alla radiazione solare.

La conducibilità termica del terreno k_{ground} , espressa in $[W/m/K]$ è risultata (in base alle stime di ricerca parametri tempo variante, Figura 5-14), in tutte le fasi del Test estremamente elevata (valori compresi tra 4.5 e 6) con un valore medio di "ricerca parametro" inerente complessive 220 ore di test sulla sequenza completa dei flussi termici applicati pari a 5.0. La resistenza termica dello geoscambiatore R_{BHE} , il secondo parametro stimabile con questo tipo di analisi, è risultata compresa tra 0.06 e 0.08 $[mK/W]$, con un valore di "ricerca parametro" pari a 0.06. Se il valore di R_{BHE} appare in ragionevole accordo con quanto atteso dai modelli teorici per scambiatori del tipo a doppio U, appare non giustificabile da un modello puramente conduttivo il valore medio della conducibilità termica del terreno (5.0 $W/m/K$) che è emerso dall'analisi delle misure effettuate.

Pertanto è da ritenersi che il geoscambiatore sul quale sono state fatte le misure sia interessato da una significativa azione di tipo convettivo dovuta alla circolazione di acqua di falda. Si fa osservare che tale presenza di falda è suffragata da quanto messo in evidenza durante la perforazione per

l'installazione dello scambiatore, operazione che ha evidenziato la presenza di acqua sotterranea ad almeno due distinte profondità.

Pertanto i valori di k_{ground} ed anche R_{BHE} stimati sono da intendersi come “apparenti” in quanto influenzati da fenomeni convettivi ma comunque validi per descrivere la risposta del terreno a sequenze di impulsi termici quali quelli associati all'utilizzo di geoscambiatori a terreno con pompe di calore. Nel lunghissimo periodo (decenni) la presenza di moti convettivi nel terreno con assegnati numeri di Peclet non desumibili da questa analisi può ritenersi ulteriormente favorevole per il raggiungimento di condizioni asintotiche nella risposta termica del terreno a tempi significativamente più ridotti rispetto a quanto atteso dai modelli puramente conduttivi (Molina et al., Int. Journal Thermal Science, 2011).

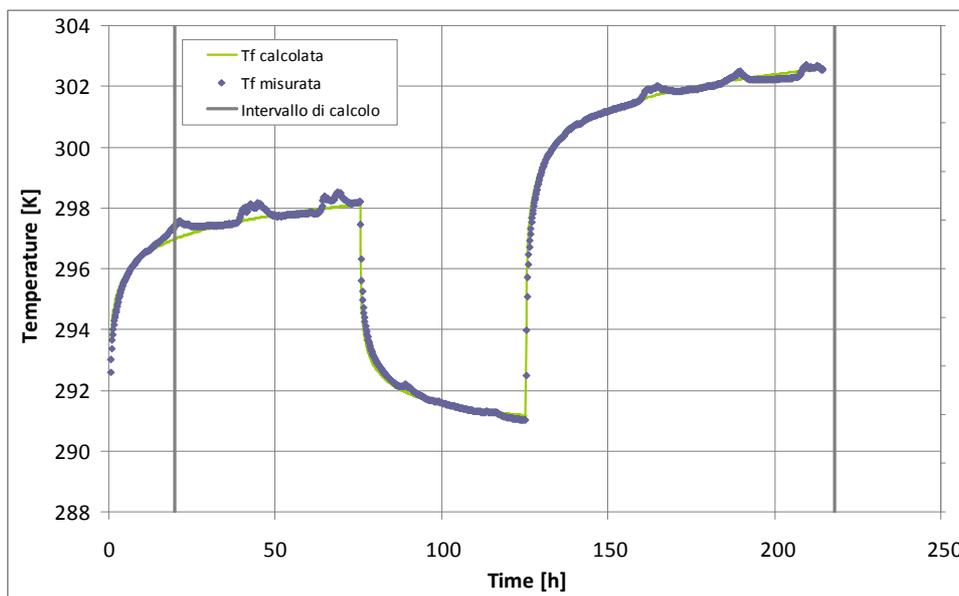


Figura 5-15. Andamenti di temperatura misurata e temperatura calcolata con il modello di ricerca parametri Unige. L'iterazione sui valori di k_{ground} e R_{BHE} per minimizzare lo scarto tra misure e previsione consente di determinare i parametri incogniti.

[20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27]

5 Monitoraggio, modellazione e controllo del sistema serra per l'efficienza energetica e la competitività

5.1 Microcontrollori e sensoristica low cost per serre

5.1.1 Introduzione

Al monitoraggio delle condizioni ambientali di temperatura, umidità e luminosità presenti in una regione spaziale confinata, interpretabile come una “cella climatica”, il presente lavoro affianca la possibilità del controllo automatico di tali variabili ambientali e del terreno di coltura, nel contesto delle reti di sensori e del controllo remoto. L'ambito di applicazione cui si fa riferimento è quello delle colture in serra: un sensor network che raccolga i dati provenienti dalla serra e che inoltri i valori dei parametri ambientali desiderati costituisce la struttura portante di tale contesto.

Se da un lato la soluzione proposta lascia intravedere concrete possibilità di generalizzazione ed estensione, dall'altro fornisce una applicazione del monitoraggio in serra la cui concretezza appare come una caratteristica rilevante. Il network di sensori descritti implementano un sistema di monitoraggio e controllo che in modo automatico e quando necessario, rende attivi dei semplici attuatori che influenzano le variabili ambientali, orientandole verso opportuni valori desiderati. Tali valori di riferimento desiderati sono impostati nel sistema dagli utenti in funzione di parametri ottimi che servono ad ottimizzare la crescita del tipo di coltura a cui la serra è dedicata.

I dati derivanti dall'attività di monitoraggio esercitata dai vari sensori della rete sono visualizzati in un ambiente di visualizzazione accessibile via web al fine di consentire la modifica dei valori di riferimento desiderati in tempo reale; tali dati possono eventualmente essere memorizzati sul medesimo elaboratore, rendendo possibili analisi e valutazioni successive.

Il sistema è basato sulla serra realizzata nell'ambito del progetto SAM LAB presso il CERSAA di Albenga, ed è stato accompagnato ad un numero di prove sperimentali che testano il sistema nel suo insieme. I risultati di tali prove sperimentali dimostrano, entro limiti ragionevoli, l'efficacia delle soluzioni presentate in questo lavoro, e ne incoraggiano lo sviluppo ed il perfezionamento.

La rete di sensori implementata per questo progetto è realizzata tramite la embedded web technology sempre più applicata in agricoltura di precisione. Il sistema di monitoraggio è basato sull'ambiente di sviluppo ARM-Linux, che permette l'acquisizione e la trasmissione di informazioni proveniente dall'ambiente della serra. Il sistema trasmette le informazioni raccolte in modo efficace con espansibilità e stabilità. Il microprocessore scelto è basato su ARM9 e viene utilizzato

come l'unità di elaborazione del sistema. Tale scelta garantisce una pluralità di risorse e non solo permette di realizzare la funzione di sistema, ma faciliterà anche l'espansione di sistema in futuro. La scelta dell'architettura di sistema è stata definita in modo da mettere a disposizione capacità di calcolo e di memorizzazione oltre che di connettività. Inoltre tale soluzione consente la realizzazione di una cella climatica nella quale la centralina di controllo collocata al suo interno oltre a gestire l'acquisizione dei dati e la loro trasmissione regola in modo autonomo un insieme di attuatori in grado di influenzare i parametri ambientali, secondo specifiche impostate a priori. L'intento è quello di andare verso la possibilità di limitare l'intervento dell'operatore umano avendo inoltre la possibilità di tener traccia delle risposte dell'"ambiente serra" ad una varietà di distinti profili climatici imposti, potendo in tal modo verificare ed investigare sul grado di benessere delle specie vegetali presenti in serra e "modulare" di conseguenza le specifiche imposte al sistema, al fine di migliorare la resa della serra stessa.

Negli ultimi anni, nelle serre moderne si è sviluppata gradualmente quella che è definita l'agricoltura di precisione. L'agricoltura di precisione è una strategia gestionale dell'agricoltura che si avvale di moderne strumentazioni ed è mirata all'esecuzione di interventi agronomici tenendo conto delle effettive esigenze colturali e delle caratteristiche biochimiche e fisiche del suolo. In serra, infatti, la temperatura e l'umidità del suolo, la temperatura, umidità, la luminosità dell'ambiente così come la concentrazione di anidride carbonica sono i principali fattori che influenzano la crescita di colture. La cosa più importante per gli operatori quindi è quello di monitorare la condizione di serra nel tempo e poi prendere decisioni efficienti in termini di gestione del clima interno. I nuovi strumenti ICT applicabili all'agricoltura di precisione sono ad esempio GIS, INTERNET e Wireless Sensor Network (WSN). Queste tecnologie coprono gli aspetti tra cui analisi, trasferimento e raccolta dei dati o l'elaborazione delle informazioni. Anche soluzioni ibride di tecnologia integrata sono già state applicate in questo contesto. Ottimi risultati sono stati ottenuti tramite applicazioni Internet basate sulla rete IP con l'integrazione di sistemi embedded. L'ambiente web incorporato basato sul sistema di monitoraggio direttamente collegato ai dispositivi e alle apparecchiature di rete rappresenta la miglior architettura in termini di affidabilità. Il modello di Browser/Server fornisce le informazioni di monitoraggio tramite una semplice pagina web di visualizzazione tramite cui gli utenti possono navigare. In questo modo gli utenti non devono gestire complicati software di gestione ma possono monitorare la condizione di dispositivi e delle apparecchiature tramite browser in tempo reale. Il sistema

proposto in questo progetto prevede proprio l'integrazione tra tecnologia web e tecnologia embedded, con un architettura di monitoraggio basata su server web e la rete di sensori.

5.1.2 Obiettivo

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di creare un sistema di monitoraggio ambientale tramite tecnologia embedded.

Il sistema è stato realizzato in modo da soddisfare i seguenti requisiti:

- outofthebox: la soluzione deve essere pronta all'uso, non deve richiedere configurazioni particolari o interventi hardware da parte dell'utente;
- completezza: la soluzione comprende oltre all'architettura di rete, anche un sistema di gestione, memorizzazione, visualizzazione e analisi dati;
- facilità di utilizzo: il sistema è installabile e utilizzabile da un qualsiasi utente con conoscenze basilari di informatica;
- economicità: sia i costi dei componenti utilizzati sia i costi operativi del sistema devono essere contenuti;
- versatilità: il sistema è stato pensato per un uso specifico in un ambito preciso o in un territorio particolare, ma deve poter adattarsi ad una moltitudine di deployment;
- espandibilità: il sistema consente, senza particolari modifiche software, l'aggiunta di nuovi sensori;
- interfacciabilità: i dati rilevati e memorizzati devono essere facilmente interfacciabili con altri applicativi software;
- open source: il sistema è composto esclusivamente da software open source.

In definitiva, la piattaforma realizzata si è proposta di colmare le lacune ed eliminare i difetti di quelle ad oggi sono disponibili sul mercato. In particolar modo, si è puntato sull'economicità, aspetto che manca in tutte le soluzioni, e sul fatto di essere un sistema completo outofthebox. Come in qualsiasi progetto, ci sono stati anche dei trade off da bilanciare. In particolare, il fattore economico ha giocato un ruolo importante sulla scelta dell'hardware.

5.1.3 Architettura Hardware

I componenti hardware comprendono CPU, memoria, sensori, attuatori e fonte di alimentazione. Una breve descrizione di questi componenti e le piattaforme più diffuse vengono fornite nei paragrafi successivi.

Di seguito un elenco dei componenti hardware principali:

- *Controller*: è la CPU del nodo e si occupa di rilevare i dati tramite i sensori, elaborarli, decidere dove e quando spedirli, gli attuatori e i sensori. I componenti più adatti a questo scopo sono i microcontrollori, ovvero processori per sistemi embedded, poiché richiedono poca energia, hanno spesso delle memoria integrata e non hanno controller di memoria, sono facilmente programmabili (anche tramite software opensource), si integrano bene con altri componenti come sensori e attuatori e hanno delle modalità di risparmio energetico.
- *Sensori e attuatori*: i sensori possono essere di tre tipi: passivi omnidirezionali, passivi direzionali e attivi. Con il termine passivo si indica il fatto che il sensore non modifica in nessun modo l'oggetto della misurazione, mentre con omnidirezionale si intende che la grandezza misurata non varia a seconda della direzione in cui la si misura; ad esempio, sensori di temperatura ed umidità sono omnidirezionali. Sono direzionali invece i sensori di immagine, come le fotocamere, che restituiscono risultati differenti in base a come sono posizionate. I sensori attivi, invece, effettuano delle misurazioni dopo aver sollecitato l'ambiente in qualche modo, ad esempio creando delle piccole esplosioni nel terreno. Chiaramente, ogni sensore è caratterizzato da una certa accuratezza, affidabilità, costo e dimensione. Nell'architettura proposta si usano quasi esclusivamente sensori di tipo passivo omnidirezionale.
- *Fonte di alimentazione*: per dare energia al controller e ai sensori si ricorre a batterie, che possono essere di qualsiasi tipo, a seconda dell'hardware e dell'applicazione da realizzare. Nel caso proposta il controller e la rete di sensori sono alimentati dalla rete elettrica ed in parallelo esiste una batteria tampone che interviene in caso di mancanza di energia.

5.1.4 *Microcontrollori: Differenza tra SoC e SoM*

SoC, ovvero, "System on Chip". Si tratta di una filosofia che porta all'estremo l'integrazione della componentistica, cioè si condensa su un unico integrato tutto quello che si suppone servirà all'utente finale. Un esempio tipico sono i μC (microcontrollori), in quanto essi dispongono di RAM, Flash per memorizzare il programma e gli eventuali dati da salvare, linee di input/output analogiche e digitali, circuiteria dedicata come generatori di PWM, linee seriali ad alta velocità e così via. L'aspetto negativo di queste componenti è dovuto all'hardware limitato da un punto di vista delle prestazioni, e prevede notevoli sforzi di programmazione per poter stare entro i limiti imposti dall'hardware. Inoltre il SoC non ha nessuna flessibilità, una volta prodotto non può essere modificato. Il SoM, ovvero "System on Module", è un differente concetto: in questo caso, si sceglie di realizzare un sistema completo residente però su un piccolo circuito stampato (il "modulo", appunto) dedicato a contenere i chip e la circuiteria necessaria. Questo tipo di approccio consente al produttore un maggior grado di flessibilità progettuale, permettendo di migliorare la scheda (ad esempio: raddoppiare la RAM o usare un microprocessore più prestante) rimpiazzando semplicemente un unico componente, salvaguardando e ammortizzando su più versioni del prodotto i costi progettuali iniziali. Utenti abili col saldatore per SMD (surface mounting device, componenti elettronici a montaggio superficiale) possono addirittura agire autonomamente, per

esempio sostituendo il quarzo standard con uno più veloce: un modo pratico – ancorché rischioso – per migliorare le prestazioni del SoM.

Nella realizzazione del sistema proposto si è scelto di realizzare il sistema di monitoraggio e controllo tramite il controllore ARIAG25.

5.1.5 Controller Aria G25

5.1.5.1 Specifiche tecniche

- CPU: ARM9 @ 400MHz CPU Atmel AT91SAM9G25 (ARMv4)
- RAM: 128 MB o 256 MB (DDR2)
- Rete: 10/100 Mbit
- Poste USB 2.0: max 3 configurate come segue: one hi-speed host/device one hi-speed host one full-speed
- Linee RS232: max 6
- Linee I2C: max 2
- Linee SPI: max 2
- Ingressi analogici: 4 @ 10 bit
- Linee GPIO: max 60 Δ Consumi: 0.3 Watt
- Temperatura di esercizio: 0-70 °C (seguiranno modelli con intervalli di temperatura più estesi)
- Dimensioni: 40 x 40 mm
- RoHS compliant
- Basse emissioni Elettromagnetiche
- Livelli logici: 0/3.3 volt
- Distanza tra i piedini: 1.27 mm
- LED a bordo confi gurabile dall'utente: uno.
- Alimentazione: singola a 3.3 volt.

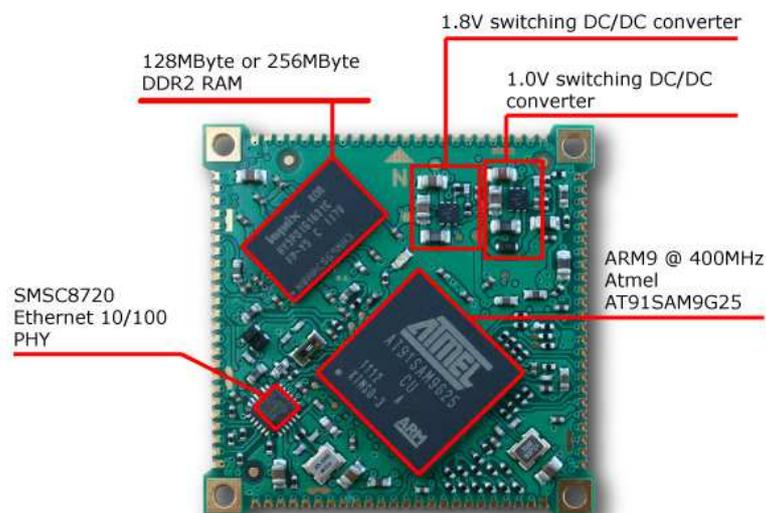


Figura 5-1: Controller Aria G25

Aria G25 è progettato per implementare by Linux Embedded compilata per architettura ARM9 da una scheda microSD o una scheda SD. Grazie a Linux su Aria G25 è possibile utilizzare quasi tutte le lingue. Il compilatore C e l'interprete di Python sono pre-installate per impostazione predefinita sulla microSD. Aria G25 ha un totale di 60 linee GPIO, cioè linee di Ingresso/Uscita di utilizzo generale, alcune delle quali già preimpostate per una porta Ethernet, 3 USB, 6 RS232, 2 I2C, 2 SPI e 4 ingressi analogici a 10 bit. Inoltre ha 128/256 MB di RAM, una CPU ARM@400MHz e che è "spinta" da GNU/Linux.

La principale funzione di questo componente è nell'ambito di controllo, gestione, registrazione eventi e reportistica.

Crediamo sia chiara la potenzialità di questo modolino "4x4" perché oltre alle elevate prestazioni è anche molto piccolo: solo 16 cm², cosa che permette di infilarlo praticamente ovunque. In un mondo altamente competitivo quale è il mercato dell'elettronica, si noti che questa scheda è stata progettata e d è assemblata in Italia: riteniamo che questo fatto dia di per sé un valore aggiunto al prodotto che ce lo dovrebbe far preferire rispetto a merce analoga straniera.

Se si volesse proporre un paragone con l'altra tecnologia ad oggi sul mercato come Raspberry Pi si deve notare che non è un confronto alla pari perché sono prodotti pensati per ambiti differenti, ma poiché per alcuni aspetti hardware si somigliano e dato che potrebbero essere usate per gli stessi scopi (pensiamo a compiti di controllo e gestione I/O), ecco che abbiamo deciso di fare una piccola "gara" tra le due.

- Costi: vince RP, il cui prezzo finale superiore è giustificato dalle maggiori quantità e prestazione dell'hardware (GPU, connettori, ecc.).
- Ingombri: vince Aria (4x4cm sono veramente difficili da battere).
- Linee I/O: vince Aria (il punto forte di Aria sono appunto quantità e tipi di linee I/O).
- RAM: pareggio (solo da un paio di mesi RP ha raddoppiato la RAM a 512 MB).
- Prestazioni: vince RP, dotata di una CPU più veloce.

Consumi: vince Aria (minore silicio, CPU più lenta e quindi "risparmiosa" di energia). La RP è stata pensata come un compromesso "un po' di tutto" per accontentare utenti desktop, studenti e hobbisti elettronici. Ma si sa: il miglior compromesso è quando nessuno è contento del tutto. Aria non vuole.

5.1.5.2 ARM e Linux

Lo scorso trentennio è stato dominato dall'accoppiata x86/Windows, ma negli ultimi anni si sono affacciati sul mercato nuovi protagonisti: ARM sul fronte dei processori e Linux sul fronte dei sistemi operativi. Riconoscendone il potenziale, Microsoft ha deciso di portare Windows 8 su architettura ARM, ma blindando le installazioni al solo market proprietario, tentando di replicare il tipico dell'ecosistema chiuso del mondo Apple. Tuttavia per i programmatori che operano con Free Software Foundation (<https://fsfe.org/index.it.html>) il vantaggio per l'utente finale e per la comunità è sul fronte opposto: libertà di intervento, apertura dei codici, standard pubblici e diffusi, condivisione del Sapere. Sul fronte hardware, ARM era scelto in funzione dei consumi limitati piuttosto che per la potenza di calcolo, ma ora non è più così: pur mantenendo basse le

richieste energetiche, le CPU ARM sono cresciute molto sul fronte prestazionale. Recentemente è entrato nel mercato delle GPU il Mali-T604 espressamente progettato per attività ibride CPU-GPU e compatibile OpenCL. Il core grafico è un po' meno prestante di una ATI Radeon 6470M; (2.1 GPixel/s contro 2.8) pur avendo la stessa ampiezza di banda di I/O.

5.1.6 Sensoristica

Nella serra è importante capire e gestire quali sono le interazioni tra il microclima, il clima esterno ed i diversi fattori del processo produttivo.

La complessità del sistema serra richiede la definizione di un sistema di monitoraggio delle condizioni climatiche ottimali per le diverse specie vegetali.

L'illuminazione naturale o artificiale, la temperatura e l'umidità del suolo sono correlati per determinare la produzione. Cioè se uno di questi fattori è limitante, diventa inutile aumentare gli altri. Il fattore più facile da controllare e da modificare è la temperatura.

Sappiamo però, come la traspirazione della pianta sia importante per le sue funzioni fisiologiche e di conseguenza per le produzioni. Infatti, la traspirazione varia in funzione della ventilazione della serra ed in funzione della radiazione solare, ed entrambi influenzano la temperatura interna della serra.

I principali fattori del microclima in serra che possiamo controllare e gestire sono:

- temperatura del suolo;
- temperatura dell'ambiente;
- illuminazione;
- Umidità del suolo.

Di seguito le specifiche della sensoristica scelta per l'implementazione del sistema di monitoraggio.

5.1.6.1 Sensori di temperatura: One Wire Temperature Sensor DS18B20

Il sensore di temperatura DS18B20 è l'ultimo sensore di temperatura 1-Wire della Maxim IC. Questo sensore ha la capacità di rilevare temperature con precisione da 9-bit a 12-bit in un range di temperature fra un minimo di -55°C ed un massimo di $+125^{\circ}\text{C}$ con un'approssimazione di $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

La particolarità di questi sensori di temperatura è rappresentata dal fatto che ciascun sensore ha numero seriale unico di 64-bit che lo identifica memorizzato all'interno di una ROM presente al loro interno. Questa caratteristica permette di poter utilizzare un vasto numero di sensori su di un unico bus di dati; caratteristica di fondamentale importanza nella maggior parte di progetti di data-logging e di progetti basati sul controllo della temperatura.

Il protocollo utilizzato da questi sensori è lo Unique 1-Wire®; questa interfaccia richiede l'utilizzo di un unico pin per la comunicazione. Inoltre, per poter funzionare nelle applicazioni tipiche questi sensori di temperatura non necessitano di alcun altro componente esterno. Possono essere alimentati direttamente dalla linea dati ed il range di alimentazione supportato è da 3.0V a 5.5V.



Questi sensori sono dotati di comandi di ricerca di allarmi che identificano ed indirizzano i sensori che misurano temperature al di fuori di limiti programmati (Temperature Alarm Condition).

Caratteristiche tecniche

- Alimentazione: da 3.0V a 5.5V
- Calibrato direttamente in ° Celsius (Centigradi)
- Range di temperature misurabili: da -55°C a +125°C (da -67°F a 257°F)
- Accuratezza: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (nel range $-10^\circ\text{C} / 85^\circ\text{C}$)
- Risoluzione del sensore: da 9-bit a 12-bit (impostabile dall'utente)
- Tempo di conversione di temperature in 12-bit word: 750ms
- Ogni sensore ha un indirizzo univoco a 64-bit memorizzato in una ROM interna
- Settaggi di allarme (non-volatili) definiti dall'utente
- Temperature Alarm Condition

5.1.6.2 Sensori di temperatura e umidità del suolo: Soil Temperature/Moisture Sensor SHT10

Il sensore di temperatura ed umidità del suolo SHT10 Soil Temperature Moisture Sensor é ideale nei progetti in cui vuoi monitorare la temperatura del suolo con una sonda digitale.



Figura 5-2: Sensori di temperatura e umidità del suolo

La differenza tra una sonda analogica ed una digitale è data dall'affidabilità del dato anche su lunghe distanze in quanto il segnale non è influenzato dalla lunghezza dei cavi: il dato infatti non è misurato come differenza di potenziale tra i poli ed il cavo dati.

Le sonde digitali come la SHT10 Soil Temperature Moisture Sensor sono dotate di 4 cavi:

- rosso -> vcc +3,3v o 5v
- nero o verde -> gnd
- giallo -> clock
- blu -> data

Il prodotto include il modulo del sensore di temperatura/umidità prodotto da Sensiron incassato in una maglia metallica di sinterizzazione. L'involucro è resistente alle intemperie e impedisce all'

acqua di infiltrarsi nel corpo del sensore e danneggiarlo, ma permette all'aria di passare attraverso in modo che si possa misurare l'umidità del suolo. È progettato per essere sommersa in acqua, ma è sempre meglio evitare che rimanga a lungo termine (più di 1 ora alla volta) in immersione. Può anche essere semplicemente posizionato all'esterno per il rilevamento delle condizioni esterne. Letture dei dati di umidità hanno 4,5% precisione, la temperatura precisa al 0,5%.

La tecnologia applicata di CMOSens[®] garantisce un'ottima affidabilità e stabilità a lungo termine. Entrambi i sensori sono perfettamente accoppiati ad un 14bit convertitore digitale analogico e un circuito di interfaccia seriale. Questo si traduce in qualità superiore del segnale, una risposta rapida e insensibilità ai disturbi esterni (EMC).

Il sensore funziona in modo stabile all'interno di gamma normale raccomandata come da figura seguente. Le esposizioni a condizioni fuori range di normalità, soprattutto di umidità a lungo termine > 80% RH, temporaneamente può compensare il segnale RH (+ 3% RH dopo 60h). Dopo il ritorno alla zona di normale operatività ritornerà in modo autonomo lentamente verso stato di calibrazione.

Dall'immagine è evidente che le condizioni del terreno nel microclima della serra saranno sempre contenute del range normale dei valori di temperatura e umidità.

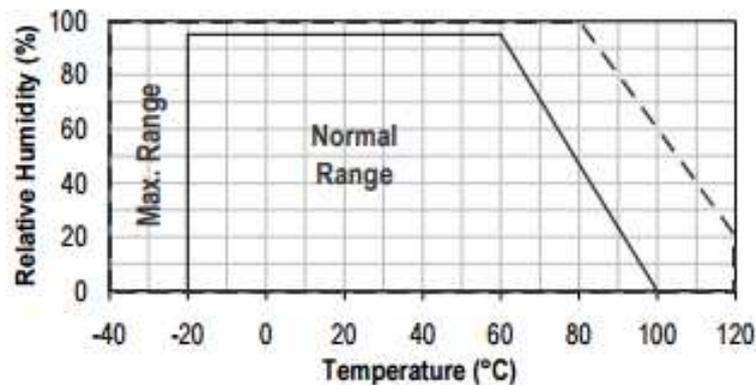


Figura 5-3: Campo di funzionamento del sensore

Letture dei valori di temperatura e umidità

Per compensare la non-linearità del sensore umidità e per ottenere la precisione completa del sensore che è consigliabile convertire la lettura umidità con la formula seguente:

$$RH_{linear} = c_1 + c_2 \cdot SO_{RH} + c_3 \cdot SO_{RH}^2 \text{ (%RH)}$$

SO _{RH}	c ₁	c ₂	c ₃
12 bit	-2.0468	0.0367	-1.5955E-6
8 bit	-2.0468	0.5872	-4.0845E-4

Figura 5-4: Compensazione del sensore per lettura di umidità

Di seguito il grafico mostra la conversione del valore letto in output dal sensore e del relativo valore di umidità.

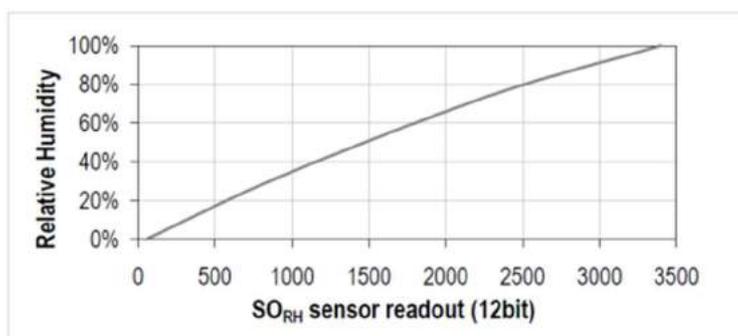


Figura 5-5: Grafico di conversione del valore

Allo stesso modo deve essere interpretato il valore di temperatura. Il sensore di temperatura di PTAT (proporzionale alla temperatura assoluta) è molto lineare. E' possibile utilizzare la formula seguente per convertire la lettura digitale (SOT) al valore di temperatura con i coefficienti riportati in tabella.

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T$$

VDD	d ₁ (°C)	d ₁ (°F)	SO _T	d ₂ (°C)	d ₂ (°F)
5V	-40.1	-40.2	14bit	0.01	0.018
4V	-39.8	-39.6	12bit	0.04	0.072
3.5V	-39.7	-39.5			
3V	-39.6	-39.3			
2.5V	-39.4	-38.9			

Tabella 5-1: Coefficienti di conversione

Punto di rugiada

Grazie all'integrazione di entrambi i sensori il dispositivo permette di fare una stima molto precisa del punto di rugiada attraverso le formula successive.

Poiché l'umidità e la temperatura, infatti, sono misurati sullo stesso chip monolitico, il SHT10 permette misurazioni precise. Per definire il punto di rugiada (Td) ci sono varie formule da applicare, la maggior parte di loro abbastanza complicate. Tuttavia, per la gamma di temperatura da -40 a 50 ° C, la seguente formula fornisce con buona approssimazione il valore del punto di rugiada.

$$T_d(RH, T) = T_n \cdot \frac{\ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) + \frac{m \cdot T}{T_n + T}}{m - \ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) - \frac{m \cdot T}{T_n + T}}$$

Dove T e RH sono temperatura e umidità rilevati dal sensore e Tn ed m delle costanti il cui valore è dato dalla tabella seguente:

Temperature Range	T _n (°C)	m
Above water, 0 – 50°C	243.12	17.62
Above ice, -40 – 0°C	272.62	22.46

Tabella 5-2: Costanti formula di per il calcolo del punto di rugiada

5.1.6.3 Sensore di luminosità digitale I2C - Grove - Digital Light Sensor

Questo modulo si basa sul convertitore I2C TSL2561 per trasformare l'intensità della luce in un segnale digitale.

Dotato di interfaccia I2C, questo modulo è in grado di trasformare l'intensità della luce in un segnale digitale. È possibile selezionare tre modalità di rilevazione (tutto lo spettro, infrarossa o visibile), ciascuna con un indirizzo I2C diverso. Può essere interfacciato a qualsiasi microcontrollore, anche se non dispone di ingressi analogici.



Caratteristiche tecniche

- Uscita digitale 16 Bit a 400 kHz I2C Fast-Mode
- Ampia gamma: da 0,1 a 40.000 LUX
- Temperatura di funzionamento: da -40°C a +85°C
- Funzione di interrupt programmabile con impostazioni di soglia superiore e inferiore definiti dall'utente
- Applicazioni: rilevamento della luce ambientale - controllo della retroilluminazione per display - controllo illuminazione tastiera

5.1.6.4 SparkFun Soil Moisture Sensor

Il sensore di umidità del suolo di SparkFun è un breakout semplice per misurare l'umidità nel suolo e materiali simili. I due cuscinetti funzionano come sonde per il sensore, che agisce come una resistenza variabile. Maggiore è la presenza di acqua nel terreno maggiore sarà la conducibilità tra i cuscinetti che si tradurrà in una minore resistenza e una maggiore SIG fuori. Un problema comunemente noto con sensori di umidità del suolo è la loro durata di vita breve, quando esposti ad un ambiente umido. Per combattere questo, abbiamo avuto il PCB rivestito in finitura oro (ENIG o dell'oro di immersione di Electroless Nichel).



5.1.7 Architettura del sistema di monitoraggio in serra

La serra realizzata nel progetto SAM LAB consta di 4 bancali inseriti in una struttura di dimensioni 990 x 1528 cm.

L'allestimento hardware completo per il monitoraggio della serra prevede di monitorare:

- Temperatura del suolo e della terra di coltivazione;
- Temperatura ambiente sia sotto i bancali che ad altezza uomo per verificare l'omogeneità dei valori anche in altezza;
- Umidità del suolo nei quattro bancali;
- Luminosità dell'ambiente.

La posizione dei singoli sensori e della centralina di monitoraggio e controllo appaiono nelle immagini seguenti.

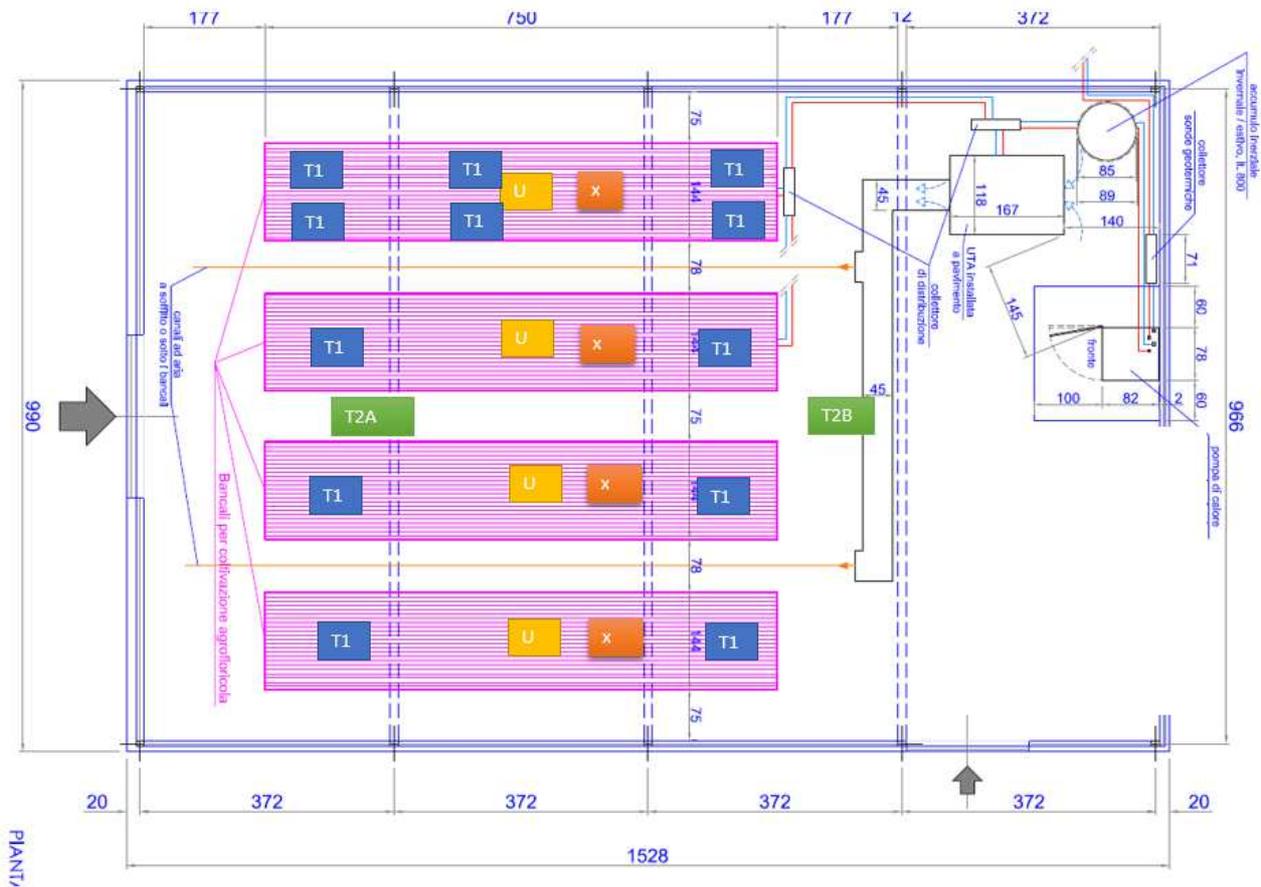


Figura 5-6: Disposizione sensoristica per il monitoraggio in serra - Pianta

T1= sensori di temperatura suolo - bancale

T2A= sensori temperatura ambiente – sotto bancale

T2B= sensori temperatura ambiente – altezza media sopra bancale

X= luminosità – sopra i led

U=umidità suolo – bancale

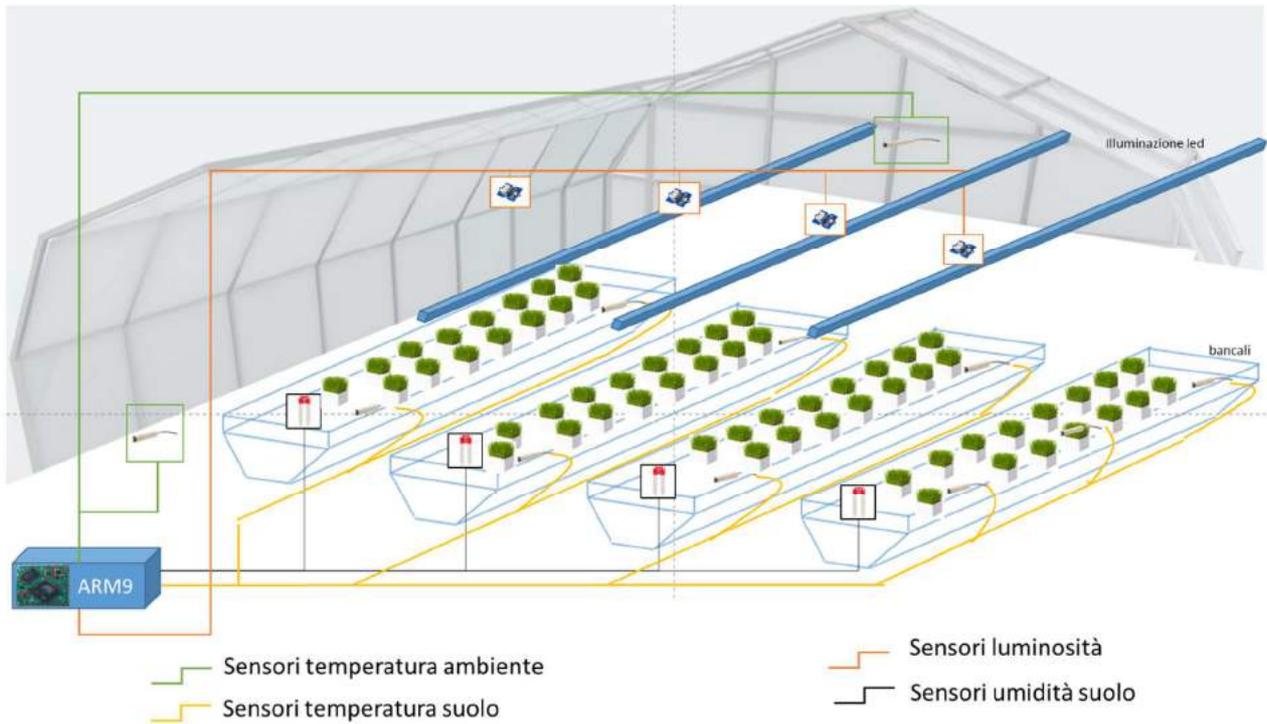


Figura 5-7: Disposizione sensoristica per il monitoraggio in serra - Rendering

5.1.8 Ambiente di visualizzazione dati e monitoraggio remoto del sistema di monitoraggio

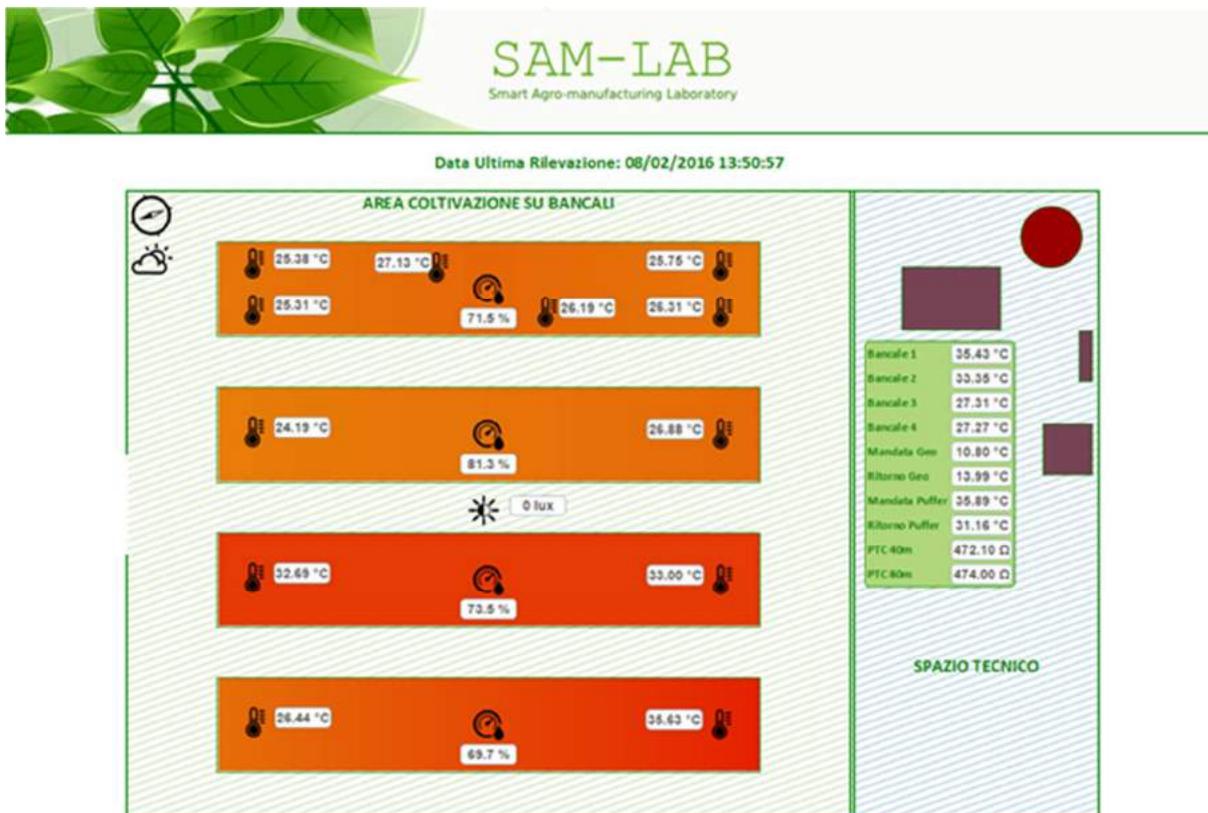


Figura 5-8: Portale per il monitoraggio dati serra

Per la visualizzazione dei dati in tempo reale è stato sviluppato un sito web dedicato. Il monitoraggio dell'impianto da remoto può essere effettuato tramite un qualsiasi PC connesso ad internet. L'utente, da qualsiasi parte del mondo, può collegarsi al sito e visualizzare la pagina contenente i dati da monitorare.

Attualmente il sito visualizza le seguenti informazioni:

- Stato dei sensori di temperatura e umidità dei quattro bancali;
- Stato sensore di illuminazione;
- Condizioni meteo esterne alla serra
- Parametri acquisiti in tempo reale dalla pompa di calore.

Cliccando sull'icona del meteo  verranno visualizzati i dati esterni di temperatura, umidità, pressione, velocità del vento e condizioni meteo generali.

Cliccando sulle icone di temperatura  24,19 °C e umidità  75,9 % oltre a visualizzare il dato rilevato in tempo reale si potrà accedere ai grafici relativi al monitoraggio del sensore selezionato nelle 24 ore precedenti.

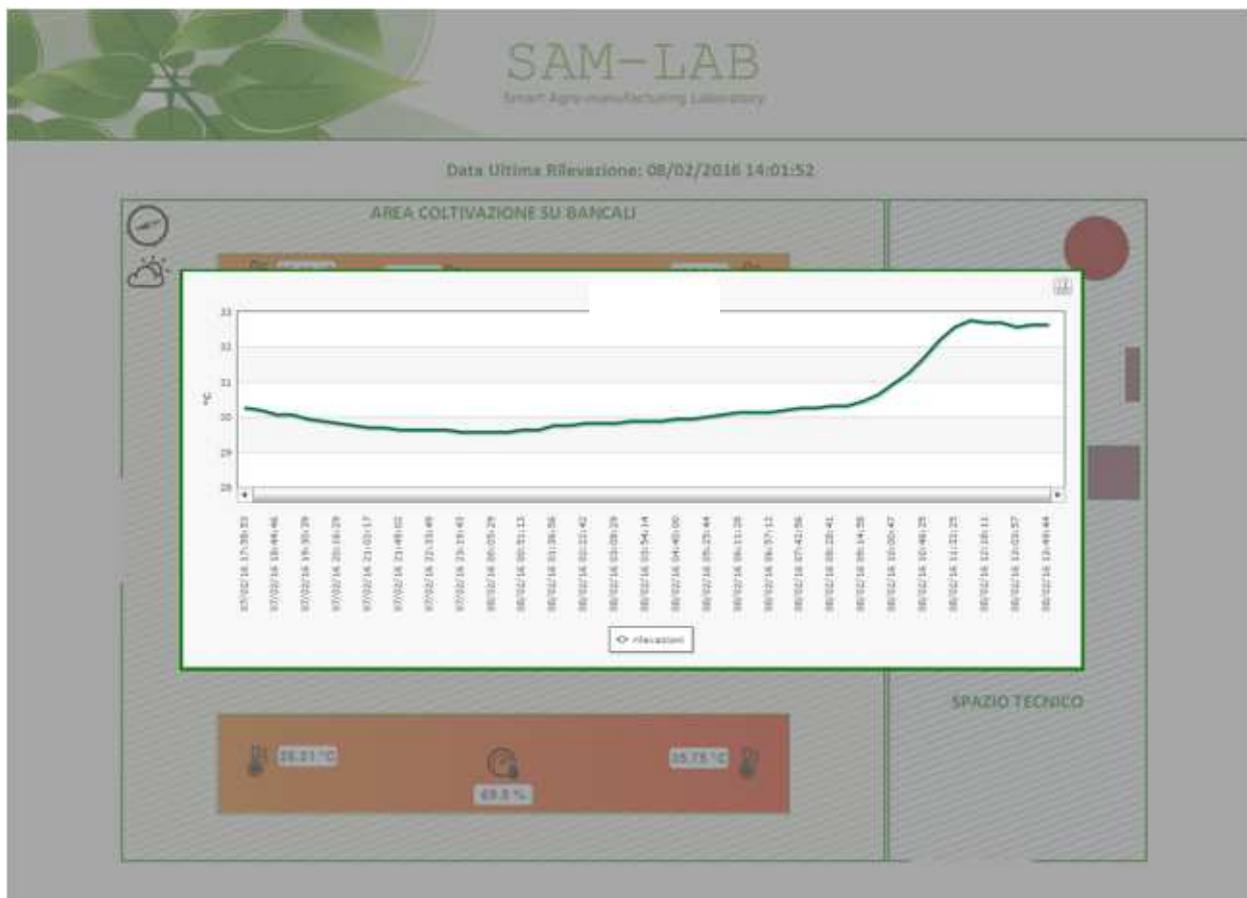


Figura 5-9: Esempio di visualizzazione dati di monitoraggio da remoto

5.1.9 Centralina per controllo delle sportellature ¹

La serra è dotata di una centralina a microprocessore per il controllo delle sportellature in funzione della temperatura ambiente, con apertura e chiusura a impulso/pausa e predisposizione per controllo velocità del vento e presenza di pioggia.

La centralina a microprocessore cerca la posizione ottimale degli sportelli, in funzione della temperatura ambiente, dando ai motori brevi comandi di durata programmabile in secondi seguiti da pause di durata programmabile in minuti, per consentire alla temperatura di stabilizzarsi tra un comando e l'altro. La tastiera e il display consentono una semplice visualizzazione della temperatura misurata dalla sonda e modifica dei dati di intervento.

La centralina controlla l'apertura e la chiusura automatiche dei portelloni della una serra in funzione della temperatura ambiente, della velocità del vento e della presenza di pioggia.

5.1.9.1 Controllo temperatura.

I portelloni vengono comandati ad impulsi di durata programmabile in secondi, seguiti da pause anch'esse programmate in durata dall'utente. Se la temperatura è inferiore, o uguale, al valore T1 impostato come ottimo e programmato per la chiusura, vengono dati comandi di chiusura. Se, invece, la temperatura ambiente è superiore, o uguale, al valore T2 programmato per l'apertura, vengono generati impulsi di apertura. La pausa fra un comando e l'altro è necessaria per permettere alla temperatura di stabilizzarsi prima di generare un nuovo comando. Se la temperatura è compresa fra T1 e T2 la centralina non genera alcun comando e i portelloni rimangono nella posizione raggiunta in precedenza (temperatura ideale).

5.1.9.2 Controllo velocità del vento.

Come nel caso precedente della temperatura, anche in caso di velocità del vento superiore al valore limite V1 Km/h, i portelloni vengono dapprima chiusi completamente, con un comando di durata impostabile in minuti e poi riaperti. Se la temperatura lo richiede, l'apertura dei portelloni può essere programmabile "A-I.XX", con XX, da 00 a 99 secondi, pari al tempo impiegato dai portelloni per raggiungere il grado di apertura corrispondente (Apertura Vento).

Per evitare eccessive movimentazioni in caso di vento a raffica, i portelloni rimangono in posizione vento almeno per un tempo pari al "ritardo vento" impostato in minuti da quando il vento ha superato per l'ultima volta il valore di soglia. Il ritardo vento è programmabile da 00 a 99 minuti.

Se invece la velocità del vento supera il valore V2 di sicurezza i portelloni vengono chiusi completamente e rimangono chiusi almeno per un tempo pari a 5 minuti da quando il vento ha superato per l'ultima volta il valore di soglia.

5.1.9.3 Controllo pioggia

In caso di pioggia i portelloni vengono dapprima chiusi completamente e poi, se la temperatura è superiore al valore desiderato vengono riaperti per una quantità di tempo limitata e programmabile da 0 a 99 secondi pari al tempo impiegato dai portelloni per raggiungere la posizione di Apertura Pioggia. Un ritardo programmabile dall'utente da 0 a 99 minuti evita frequenti movimentazioni degli sportelli in caso di pioggia intermittente.

¹ Agricontrol snc. SISTEMI ED IMPIANTI PER L'AUTOMAZIONE ELETTRONICA DELLE SERRE. www.agricontrol.it

5.2 Modello di simulazione e controllo del comfort termoigrometrico in ambienti lavorativi moderati

5.2.1 Introduzione

Un modello matematico è una descrizione del sistema oggetto di studio tramite linguaggio e concetti matematici. I modelli matematici sono utilizzati in diversi settori, a partire dalle scienze naturali, alle discipline ingegneristiche, sino alle scienze sociali. Un modello è utile non solo per descrivere un sistema, ma soprattutto per studiarne il comportamento dei singoli elementi che lo compongono e per predirne l'evoluzione.

In molti casi una buona corrispondenza tra il modello matematico teorico ed i risultati di prove sperimentali ripetibili è fondamentale per definire la qualità di un campo scientifico.

In ingegneria i modelli matematici possono essere utilizzati per massimizzare o minimizzare determinati output, definiti gli input necessari. Il sistema mette in relazione input ed output e dipende da diverse variabili:

- variabili decisionali
- variabili di stato
- variabili esogene
- variabili stocastiche

Le variabili decisionali sono definite normalmente variabili indipendenti. Le variabili esogene sono definite normalmente parametri. Le diverse variabili non sono tra di loro indipendenti, infatti le variabili di stato dipendono dalle variabili in input, stocastiche, esogene e decisionali. Le variabili di output dipendono dalle variabili dalle variabili di stato.

Obiettivi e vincoli del sistema possono essere descritti tramite funzioni delle variabili di output o di stato. Le funzioni obiettivo dipendono dalla prospettiva dell'utilizzatore del modello. A seconda del contest una funzione obiettivo può essere un indice di prestazione per esempio. In ogni caso non c'è limite al numero di funzioni obiettivo e limite che un modello può avere, salvo la diretta conseguenza sulla maggiorazione del lavoro computazionale associato ai calcoli.

Pertanto i modelli matematici sono solitamente composti da relazioni e variabili. Le relazioni possono essere descritte come operazioni, come operazioni algebriche, equazioni differenziali ecc. Le variabili sono astrazioni dei parametri di interesse del sistema, che possono essere quantificati. Vi sono diverse classificazioni per i modelli matematici in relazione alla propria struttura:

Lineare / Non Lineare: Se tutte le operazioni in un modello matematiche sono lineari il modello è definito lineare, altrimenti sarà non lineare. La definizione di lineare dipende dal contesto, infatti modelli lineari possono avere al loro interno espressioni non lineari.

Statico / Dinamico: Un modello dinamico implica variazioni in funzione del tempo dello stato del sistema, mentre un modello statico tratta il sistema in equilibrio, indipendente dalla variabile tempo. I modelli dinamici sono tipicamente rappresentati da equazioni differenziali.

Esplicito / Non Esplicito: Se tutti i parametri del modello globale sono conosciuti, ed i parametri di output sono calcolabili con una serie finita di calcoli computazionali, il modello è detto esplicito. Sovente invece sono i parametri di output ad essere conosciuti, mentre i parametri di input devono essere calcolati tramite procedura iterativa, con i metodi per esempio i Newton o Broyden a seconda che il modello sia o non sia lineare.

Discreto / Continuo: la differenza sta nel trattare il sistema analizzato tramite oggetti discreti, come le particelle in un modello molecolare, o trattarlo come un continuo, come il campo di velocità nel flusso attraverso un condotto.

Deterministico / Probabilistico (stocastico): un modello deterministico è tale se lo stato attuale è determinato unicamente dallo stato precedente e dai parametri del modello, per cui date le condizioni iniziali un modello deterministico fornisce sempre lo stesso output. In un modello stocastico al contrario interviene la casualità, per cui una variabile non è descritta da un unico valore ma da una distribuzione probabilistica di valori.

Deduttivo / Induttivo / Mobile: un modello deduttivo è una struttura logica basata su una teoria. Un modello induttivo nasce da scoperte empiriche e generalizzazioni di queste. Il modello mobile si basa su né teoria né osservazione, ma è solo l'invocazione di una struttura prevista.

5.2.2 Modello applicati ad un sistema serra

Nel corso degli anni la continua ricerca nel campo dell'efficienza energetica ha portato a sviluppare un gran numero di modelli che rappresentano il comportamento del sistema serra. Ci sono modelli semplici ed altri molto complessi che vengono utilizzati anche per studiare i fenomeni in 3D principalmente legati alle dinamiche d'aria interna. Tutti questi modelli hanno come origine l'equazione differenziale di base trasferimento di calore e di massa. La prima è utilizzata per calcolare i flussi di energia attraverso il sistema e la seconda principalmente per i flussi d'acqua. I principali fenomeni che devono essere modellati sono:

- Convezione: $\dot{Q}_{conv} = hA(T_2 - T_1)$

Eq 1 : Flusso di calore convettivo

- Irraggiamento: $\dot{Q}_{SWrad} = RnTr$
 $\dot{Q}_{LWrad} = \epsilon\sigma A(T_2^4 - T_1^4)$

Eq 2 : Flusso di calore per irraggiamento

- Ventilazione: $\dot{Q}_{vent} = C(T_2 - T_1) \dot{m}_{vent} (1 - f_{recover})$

Eq 3 : Flusso di calore per ventilazione

- Evapotraspirazione: $\dot{Q}_{et} = \dot{m}_{H_2O, evap} \lambda_v$

Eq 4 : Flusso di calore per evapotraspirazione

Di solito gestire l'equazione evapotraspirazione è difficile a causa della sua relazione intrinseca alla crescita delle piante ed alla velocità del 'vento' all'interno della serra. L'equazione più utile per valutare questo fenomeno è il relazione Penmann-Monteith FAO. L'equazione di Penman-Monteith è stata sviluppata per valutare l'evapotraspirazione di grandi lotti di terreno all'aperto influenzati dalla velocità del vento e la dispersione termica del terreno. Per utilizzare questa equazione per il modello di una serra qualche assunzione e modifica deve essere effettuata. La manipolazione di questa equazione verrà trattata a posteriori. L'espressione più comune per l'equazione di Penman-Monteith FAO è la seguente.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma 900}{T_a} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

Eq 5 Penmann-Monteith FAO

Dove:

- ET_0 evapotraspirazione di riferimento [mm day^{-1}]
- R_n radiazione netta sulla superficie vegetale [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$]
- G densità di flusso di calore al suolo [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$]
- T temperature media giornaliera dell'aria all'altezza di 2 m [$^{\circ}\text{C}$]
- u_2 velocità del vento all'altezza di 2 m [m s^{-1}]
- e_s pressione di saturazione del vapore [kPa]
- e_a pressione del vapore attuale [kPa]
- $e_s - e_a$ differenza di pressione di vapore per la saturazione [kPa]
- Δ pendenza della curva di pressione del vapore [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
- γ costante psicrometrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

5.2.3 Tipologie di modelli di controllo

Con l'aumento di innovazione tecnologica e dello sviluppo industriale, le strategie di controllo hanno assunto un ruolo sempre più importante nel settore e chimico meccanico e termodinamico. L'obiettivo di questa scienza è quello di far lavorare insieme, nel modo migliore, tutti i dispositivi che consentono che il sistema lavori abbia le prestazioni desiderate. Tuttavia, grazie a strategie di controllo innovative, è possibile migliorare vari parametri caratteristici del sistema di lavoro come l'efficienza globale. Essa riflette direttamente col minor uso di energia primaria e materiali utilizzati nei processi per ottenere gli stessi risultati, portando ad un beneficio diretto per la sostenibilità economica e ambientale.

5.2.3.1 Controllo in circuito chiuso

Il controllo a circuito chiuso è un meccanismo di controllo che utilizza informazioni derivanti da misurazioni. In un sistema a circuito chiuso, l'uscita viene misurata. Utilizzando le informazioni di uscita, è possibile calcolare l'errore come differenza da un set point. Il set point è la condizione di lavoro ottimale stato e viene impostato, in prima approssimazione, dal programmatore. Pertanto, questo tipo di regolatore azionare una traccia dello stato reale variabile in relazione al valore impostato cercando ogni passo temporale per ridurre l'errore.

Il controller più popolare e ampiamente utilizzati tra i controlli retroattivi di processi industriali presenti sul mercato dal 1939 è il PID (proporzionale derivativo integrativo). Questo metodo di controllo è composto da tre controllori che lavorano in sinergia insieme:

- Controllo Proporzionale
- Controllo Integrativo
- Controllo Derivativo

Controllo Proporzionale

Il controllo proporzionale è un metodo di controllo semplice e largamente utilizzato per molti sistemi. In un controllo proporzionale, gli errori a regime dipendono in maniera inversamente proporzionale del guadagno del controllo. La risposta proporzionale può essere ottenuta moltiplicando l'errore per una costante K_p detto guadagno proporzionale. Il termine proporzionale è dato dall'equazione seguente.

$$P = K_p \cdot error(t)$$

Eq 6 Termine di controllo proporzionale

Un alto guadagno proporzionale si traduce in una grande variazione dell'output per una data variazione dell'errore. Se il guadagno proporzionale è molto elevato, il sistema può diventare instabile. Al contrario, un piccolo guadagno, si traduce in una piccola risposta di uscita ad un grande errore di input. Se il guadagno proporzionale è molto basso, l'azione di controllo può essere troppo piccola in risposta ai disturbi del sistema. Di conseguenza, un controllore proporzionale (K_p) avrà l'effetto di ridurre gli errori di tempo di salita, ma mai eliminare, l'errore a regime.

Controllo Derivativo

La derivata dell'errore di processo viene calcolata determinando la pendenza dell'errore nel tempo e moltiplicando questa variazione per il guadagno derivativo K_d . Il termine derivativo rallenta la velocità di variazione dell'uscita del regolatore. Un controllo derivativo (K_d) avrà l'effetto di aumentare la stabilità del sistema, riducendo l'overshoot, e migliorare la risposta transitoria.

Il termine derivativo è dato dalla seguente equazione.

$$D = K_D \frac{derror(\tau)}{d\tau}$$

Eq 7 Termine di controllo derivativo

Controllo Integrativo

Un controllo integrativo (IC) è proporzionale sia alla grandezza dell'errore che alla durata dell'errore. L'integrale di un regolatore PID è la somma dell'errore istantaneo nel tempo e dà il gap cumulativo che si sarebbe dovuto correggere in precedenza. Di conseguenza, un controllo integrale (K_i) avrà l'effetto di eliminare l'errore di regime, ma può rendere la risposta transitoria peggiore.

Il termine integrativo è dato dalla seguente equazione:

$$I = K_I \int_0^{\tau} error(\tau) d\tau$$

Eq 8 Termine di controllo integrativo

Controllo PID

La somma delle descrizioni dei tre controlli descrive il controllo PID. È un modo molto semplice ma affidabile per controllare variabili di stato. Prende in considerazione errori del passato (integrale) presente (proporzionale) e futuro (derivata) dei parametri del modello in relazione ad un valore di set point. In questo modo si può evitare di sprecare risorse e "ottimizzare" l'uscita del controllo. In realtà l'uscita di controllo è subottimale con questo approccio perché nessuna funzione di ottimizzazione è coinvolta nel processo. Tuttavia utilizzando l'approccio a tre controlli la strategia di controllo è stabile grazie al termine derivativo, reagisce in tempo all'errore istantaneo grazie al guadagno proporzionale e allo stesso tempo cerca di eliminare l'errore a regime grazie all'azione integrativa. Uno schema di controllo PID di base è rappresentato in.

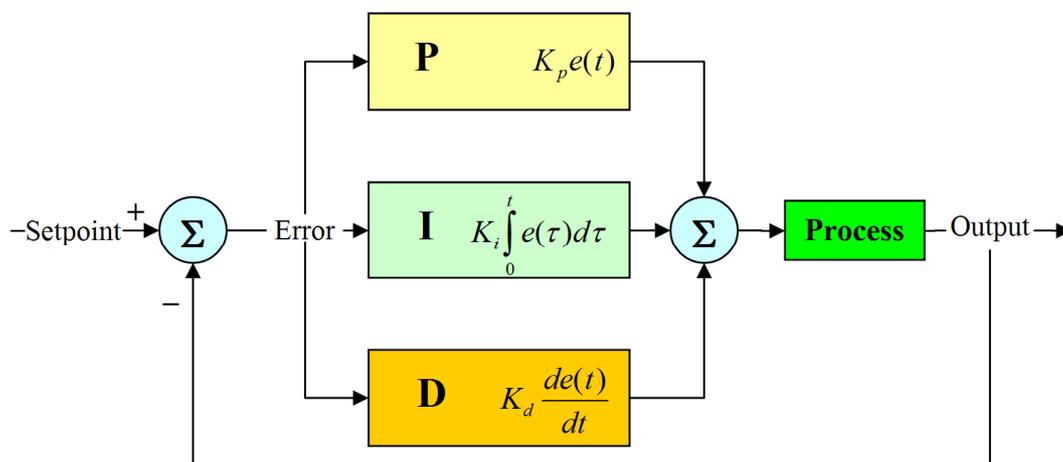


Figura 5-10: Schema di controllo PID

L'Equazione 9 rappresenta un classico modello di controllo PID dove $u(t)$ è 'uscita del controllo:

$$u(\tau) = K_p \text{error}(\tau) + K_I \int_0^{\tau} \text{error}(\tau) d\tau + K_D \frac{d\text{error}(\tau)}{d\tau}$$

Eq 9 Formula di controllo PID

Conviene per studiare questa equazione passare all'analisi in frequenza, per cui l'equazione scritta in trasformata di Laplace risulta:

$$L(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

Eq 10 Controllo PID in trasformata di Laplace

Dove $L(s)$ dove la trasformata di Laplace è l'output del controllo.

La strategia di controllo PID funziona in modo soddisfacente solo se i guadagni sono ben tarati sul modello del sistema; la regolazione dei guadagni ai valori ottimali per l'azione di risposta del controllo desiderata prende il nome di messa a punto del controllo. La stabilità è un requisito fondamentale, ma oltre a questo, sistemi diversi hanno comportamenti diversi, diverse applicazioni hanno esigenze diverse, e alcuni requisiti possono entrare in conflitto tra loro.

La messa a punto del controllo PID è un problema difficile, anche se ci sono solo tre parametri e, in linea di principio è semplice da descrivere, perché si devono soddisfare criteri complessi nei limiti del controllo PID. La progettazione e la messa a punto di un regolatore PID sembrano essere concettualmente intuitivi, ma possono essere complicate, nella pratica, se multipli (e spesso in conflitto) obiettivi quali brevi transitori ed elevata stabilità devono essere raggiunti.

I controllori PID spesso forniscono un controllo accettabile usando settaggi predefiniti, ma le prestazioni possono generalmente essere migliorate da un'attenta messa a punto. Di solito, i settaggi iniziali devono essere adeguate ripetutamente attraverso simulazioni al computer fino a quando il sistema a circuito chiuso non raggiunge performance secondo i compromessi desiderati. Alcuni processi hanno un grado di non linearità e così parametri che funzionano bene in condizioni di pieno carico non funzionano quando il processo è in fase di avvio a carico nullo; questo può essere corretto tramite programmazione del guadagno (utilizzando parametri diversi in diverse regioni operative).

La difficoltà fondamentale e limitazione con il controllo PID è che si tratta di un sistema retroattivo, con parametri costanti, e nessuna conoscenza diretta del processo, e quindi la prestazione complessiva è reattiva e un compromesso. I regolatori PID, se usati da soli, possono fornire prestazioni mediocri quando i guadagni del loop PID devono essere ridotti in modo che il sistema di controllo non vada in overshoot, non oscilli o insegua il valore del set-point di controllo. Essi hanno anche difficoltà in presenza di non linearità, non reagiscono ai cambiamenti di comportamento de processo e hanno ritardo di risposta a forti disturbi. Il miglioramento più significativo è quello di incorporare un controllo predittivo (feed-forward) con conoscenza del

sistema, utilizzando il PID solo per il controllo degli errori. In alternativa, PID può essere modificato in altri modi, ad esempio cambiando i parametri, migliorando la misurazione, o utilizzando in cascata più controllori PID. Un altro problema affrontato con i controllori PID è che sono lineari, in particolare simmetrici. Pertanto, le prestazioni dei controllori PID in sistemi non lineari è variabile. Ad esempio, nel controllo della temperatura, un caso ricorrente è il riscaldamento attivo (tramite un elemento riscaldante), ma raffreddamento passivo (riscaldamento spento, ma nessun raffreddamento), dunque l'overshoot può essere corretto solo lentamente, esso non può essere forzato verso il basso. In questo caso il PID deve essere impostato come sovrasmorzato, per prevenire o ridurre l'overshoot, anche se questo riduce le prestazioni. Un problema con il termine derivativo è che amplifica la misura di frequenze alte o del rumore di processo che può causare grandi variazioni dell'uscita.

Modello di Controllo Predittivo (MPC)

Controllo predittivo (MPC) è un metodo basato sul controllo ottimale di selezionare ingressi di controllo minimizzando una funzione obiettivo. La funzione obiettivo è definita in termini di variabili di sistema attuali e previste e viene valutata utilizzando un modello esplicito per prevedere le future uscite di processo. Il cuore del modello di controllo predittivo è il modello di processo stesso. I modelli possono essere classificati per varie caratteristiche come sopra descritto nel capitolo. Poiché il MPC richiede la soluzione di un modello per prevedere le future uscite di processo, la forma del modello selezionato ha un grande impatto sulla nostra capacità di implementare MPC. I modelli lineari sono molto adatti a MPC perché possono essere risolti in modo rapido e il problema di ottimizzazione può essere posto come problema lineare o di programmazione quadratica, per il quale è disponibile software robusto e affidabile.

Nella figura seguente è rappresentata una schematizzazione del principio di lavoro del MPC.

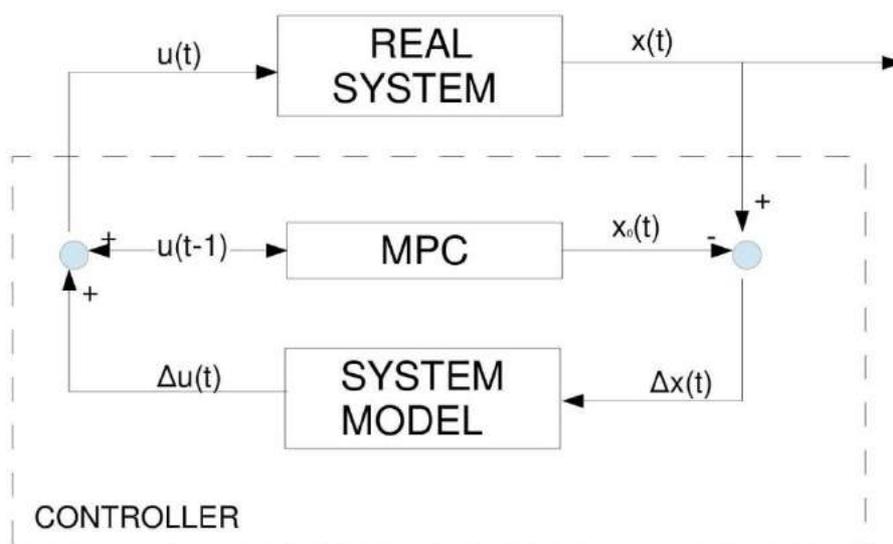


Figura 5-11: Schema del sistema MPC

Questo sistema di ottimizzazione ha lo scopo di valutare l'errore tra lo stato del sistema e lo stato desiderato del sistema, tentare di ridurlo nel modo più efficiente calcolando una strategia di controllo diverso per ogni intervallo di tempo nell'orizzonte di controllo di ottimizzazione. Una funzione di costo quadratica è il modo migliore per rappresentare il piccolo aggiustamento da fare per il controllo al fine di regolare agevolmente lo stato quindi un modello di controllo lineare quadratico deve essere prodotto.

Il modello del sistema, adatto per risolvere un problema di ottimo lineare quadratico, di solito è rappresentato da un insieme di equazioni differenziali che descrivono le dinamiche delle variabili di stato durante il tempo; una rappresentazione formale di questo insieme è dato nell'equazione seguente.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) + \omega(t) \\ x(t_0) &= x_0\end{aligned}$$

Eq 11 se di equazioni differenziali del modello formale

Dove:

$x(t)$ = vettore delle variabili di stato

$u(t)$ = vettore delle variabili di controllo

$\omega(t)$ = disturbo introdotto dagli errori del modello

$A(t)$ = matrice continua con derivata continua positiva nell'intervallo $[t_0, T]$

$B(t)$ = matrice continua con derivata continua positiva nell'intervallo $[t_0, T]$

$x(t_0) = x_0$ condizioni di stato iniziali

Qui l'orizzonte di ottimizzazione del controllo è prefissato e termina in T. La funzione di ottimizzazione è la seguente:

$$\min \left[(x(t) - x_0)^T Q(t)(x(t) - x_0) + u(t)^T R(t)u(t) \right]$$

Eq 12 Equazione formale di ottimizzazione

Se la matrice Q e R sono matrici di coefficienti messi a punto sul modello per impostare l'efficienza del controllo su alcuni aspetti. Per esempio grandi valori all'interno matrice Q danno penalità al costo del controllo in modo che l'algoritmo costa molto ma segue strettamente la funzione target della variabile di stato. Nell'esempio precedente significa che anche un piccolo errore tra lo stato del sistema e lo stato desiderato del sistema ha una grande influenza sui costi totali.

5.2.4 Parametri di controllo per il caso applicativo

Tutti i sistemi di coltivazione in serra, indipendentemente dalla posizione geografica, sono costituiti da componenti fondamentali per la climatizzazione e a seconda della loro configurazione e complessità, possono fornire una maggiore o minore quantità di controllo climatico, e conseguentemente influiscono sulla crescita e produttività delle piante.

La **temperatura** è la variabile più importante del clima serra che può e deve essere controllata. La maggior parte delle piante coltivate in serre sono specie da stagione calda e sono adatte a temperature medie nell'intervallo 17-27 °C, con limiti approssimativi inferiore e superiore di temperatura di 10 ° C e 35 ° C. Se la temperatura media minima esterna è inferiore a 10 ° C la serra è probabile che necessiti di riscaldamento, soprattutto di notte. Quando la temperatura media massima esterna è inferiore a 27 ° C il sistema di ventilazione impedisce eccessive temperature interne durante il giorno; tuttavia, se la temperatura media massima supera 27-28 ° C può essere necessario un sistema di raffreddamento. La temperatura massima della serra non deve superare i 30-35 ° C per periodi prolungati.

La seconda variabile importante per la crescita delle piante è il **flusso fotonico incidente** sulle foglie. È l'assorbimento di energia nei processi fotosintetici coinvolti nella produzione di biomassa.

Il flusso di fotoni è calcolato come $\left[\frac{\mu mol}{sm^2} \right]$ nella gamma dello spettro di radiazione

fotosinteticamente attiva (PAR) la parte della radiazione globale in ingresso, tra 400 e 700 nm, che viene utilizzata per la fotosintesi dalle piante. Questa regione spettrale corrisponde più o meno alla fascia di luce visibile all'occhio umano. I fotoni a lunghezze d'onda più corte tendono ad essere così energici che possono essere dannosi per le cellule e tessuti, ma principalmente sono filtrati dallo strato di ozono nella stratosfera. I fotoni a lunghezze d'onda più lunghe non trasportano energia sufficiente per consentire alla fotosintesi di avere luogo.

Il terzo importante variabile del clima serra è l'**umidità**, che è sempre stata espressa in termini di umidità relativa. L'umidità relativa adatta per la crescita delle piante è nell'intervallo 60-90%. I valori inferiori al 60% si possono verificare durante la ventilazione in climi aridi, o quando le piante sono giovani con piccole foglie, e questo può causare stress idrico. seri problemi possono verificarsi se l'umidità relativa superiore il 95% per lunghi periodi, soprattutto di notte come questo favorisce il rapido sviluppo di malattie fungine es Botrytis cinerea.

Mantenere la VPD sopra un certo valore minimo aiuta a garantire un'adeguata traspirazione e riduce anche problemi di malattie. Durante il giorno, l'umidità di solito può essere ridotta utilizzando la ventilazione. Tuttavia, durante la notte, a meno che la serra sia riscaldata, le temperature interne ed esterne possono essere simili e se l'umidità esterna è elevata, non è facile ridurre l'umidità interna. Poiché l'umidità relativa è funzione della temperatura dell'aria può essere fatto riscaldando l'aria serra ma l'operazione è costosa e non programmata per cui si tende ad evitare tale soluzione. Altrimenti è possibile forzare aria su una superficie fredda che si trova all'interno della serra, diverso dal materiale di rivestimento. Avviene condensazione sulla superficie fredda, l'acqua di condensa viene raccolta e può essere riutilizzato e umidità assoluta dell'aria di serra umida viene ridotta.

5.2.5 Descrizione del sistema serra caso applicativo

La descrizione completa del caso di studio è riportata nel Capitolo 6. Di seguito è riportata una rappresentazione tecnica del prototipo di serra studiato.

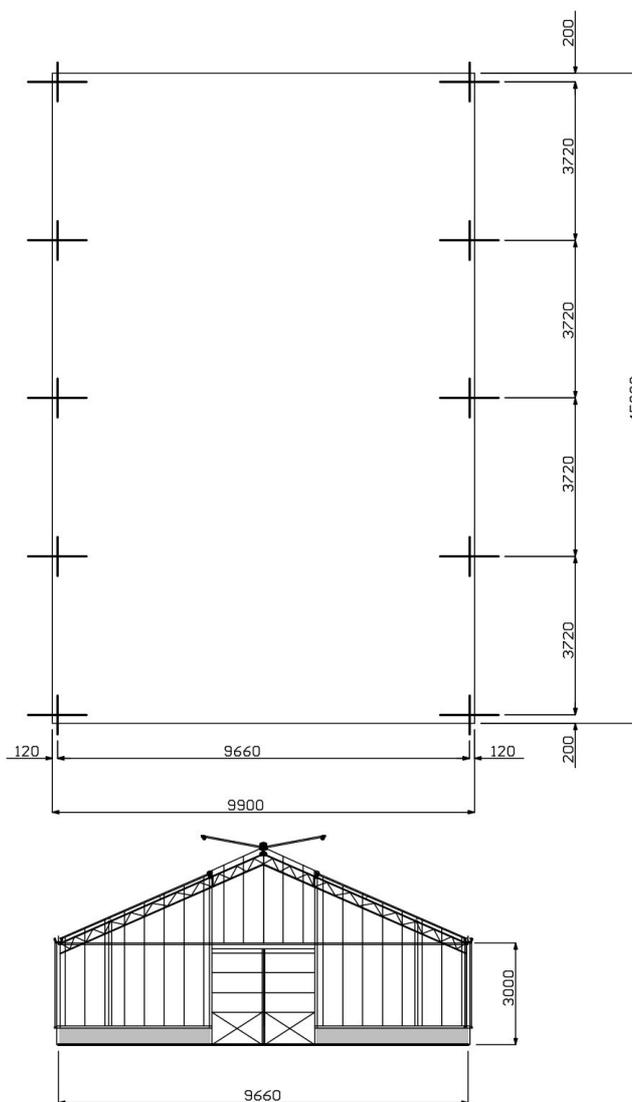


Figura 5-12: Rappresentazione tecnica del prototipo di serra

5.2.6 Modello termico

Lo sviluppo del modello termico è stato fatto seguendo tre fasi principali:

- Modellazione la radiazione in ingresso oraria
- Comprendere le dinamiche all'interno della serra
- Formalizzare le equazioni

5.2.6.1 Radiazione oraria in ingresso

La radiazione oraria in ingresso è funzione dell'orientamento delle superfici della serra e del moto relativo del sole intorno al punto in cui si trova la serra. Poiché la potenza emessa dal sole è quasi costante, il calcolo della radiazione in ingresso oraria è facile se è possibile trascurare l'interazione atmosfera con i raggi del sole. Purtroppo, questo non è il caso, quindi ci sono vari metodi per prendere in considerazione queste interazioni. L'atmosfera riflettere e assorbire potenza radiante così la quantità di radiazione del fascio che raggiunge la superficie terrestre è quasi la metà della potenza emessa dal Sole.

L'altra frazione della potenza emessa viene parzialmente assorbita ma una quantità enorme raggiunge la superficie terrestre come radiazione diffusa. La somma di queste due quantità dà la potenza in ingresso alla serra. Esistono relazione in grado di calcolare le due quantità in funzione della condizione attuale atmosferica partendo dalla potenza radiante nella parte superiore dell'atmosfera, come il metodo ASHRAE o il modello Clouston e Temps (1977).

Poiché è difficile accedere a condizioni atmosferiche orarie istantanee da normali siti di previsioni meteo la radiazione in ingresso è calcolata a partire dalla energia della radiazione media mensile che arriva sul sito di ubicazione della serra utilizzando le seguenti relazioni:

$$G_{\text{HOR, glob}}''(\tau) = \frac{\bar{E}_{\text{HOR, beam+diff}}}{\Delta\tau_{\text{SR-SS}}} Rh_{\text{glob}}(\tau)$$

Eq 13 Radiazione globale sul piano orizzontale

$$G_{\text{HOR, diff}}''(\tau) = \frac{\bar{E}_{\text{HOR, diff}}}{\Delta\tau_{\text{SR-SS}}} Rh_{\text{diff}}(\tau)$$

Eq 14 Radiazione diffusa sul piano orizzontale

$$G_{\text{HOR, beam}}''(\tau) = G_{\text{HOR, glob}}''(\tau) - G_{\text{HOR, diff}}''(\tau)$$

Eq 15 Radiazione diretta sul piano orizzontale

Dove i parametric delle equazioni sono di seguito descritti:

$G_{\text{HOR, glob}}''(\tau)$ = radiosità globale sul piano orizzontale [W/m²]

$G_{\text{HOR, diff}}''(\tau)$ = Radiosità diffusa sul piano orizzontale [W/m²]

$G_{\text{HOR, beam}}''(\tau)$ = Radiosità diretta sul piano orizzontale [W/m²]

$\bar{E}_{\text{HOR, beam+diff}}$ = Radiazione globale mensile media giornaliera [J/m²]

$\bar{E}_{\text{HOR, diff}}$ = Radiazione diffusa mensile media giornaliera [J/m²]

$\Delta\tau_{\text{SR-SS}}$ = durata del giorno [h]

$Rh_{\text{glob}}(\tau)$ = Rapporto giornaliero su orario globale

$Rh_{\text{diff}}(\tau)$ = Rapporto giornaliero su orario diffuso

Per calcolare questi parametri è necessario conoscere la posizione relativa di ogni superficie ed il sole ora per ora. Le equazioni che descrivono il processo sono funzione del giorno dell'anno, la latitudine e altri parametri temporali e geografici. Per l'elaborazione completa delle equazioni si rimanda a successive pubblicazioni.

5.2.6.2 Dinamiche nel sistema serra

Le dinamiche all'interno di un sistema serra includono una vasta ed intrecciata quantità di processi; tuttavia, l'obiettivo di questo modello è di essere un buon supporto per una strategia di controllo per la temperatura ed il flusso di fotoni all'interno della serra.

Poiché il modello per il controllo climatico all'interno della serra deve essere inizialmente semplice, sono state fatte alcune assunzioni.

1. L'aria interna è un fluido ben miscelato con le stesse proprietà in ogni punto
2. Le masse termiche inerziali all'interno della serra sono sempre in equilibrio termico con l'aria
3. i flussi di massa del vapore acqueo sono trascurati
4. la radiazione in ingresso è completamente assorbita dal sistema serra (non vi è dispersione della radiazione a basse lunghezze d'onda)
5. coefficiente di trasmissione del vetro alla radiazione ad onda lunga pari a zero

In base al presupposto sopra il modello risulta come un modello di scambio termico tra il suolo, l'aria e l'ambiente esterno. I processi coinvolti in questa dinamica sono mostrati in Figura 5-13.

La temperatura dell'aria è influenzata dalla convezione con il terreno all'interno e l'ambiente esterno, la ventilazione e una frazione di radiazione ad onda corta dal sole. Alcuni materiali all'interno serra sono opachi alle radiazioni solari, e secondo l'ipotesi (b) l'irraggiamento solare assorbito è completamente emesso sotto forma di radiazione ad onda lunga con conseguente innalzamento della temperatura interna.

La temperatura del terreno è influenzato dalla radiazione solare, dalle condizioni ambientali, dalla convezione con l'aria interna e dall'evapotraspirazione. La frazione della radiazione solare non assorbita dalle superfici opache all'interno della serra è completamente assorbita dal terreno contribuendo ad aumentare la sua temperatura. Gli altri processi sono dispersioni termiche. L'evapotraspirazione utilizza una frazione di energia in entrata per vaporizzare l'acqua all'interno del suolo, tenendo in considerazione anche l'acqua utilizzata dalle piante per assumere nutrienti che viene conseguentemente rilasciati come vapore acqueo. L'interazione della radiazione ad onda lunga con l'ambiente è il flusso di calore radiante dal terreno verso il cielo 'freddo'. A causa dell'ipotesi (e) il cielo terreno LW flusso di calore è completamente assorbito dal muro e emesso di nuovo verso l'aria.

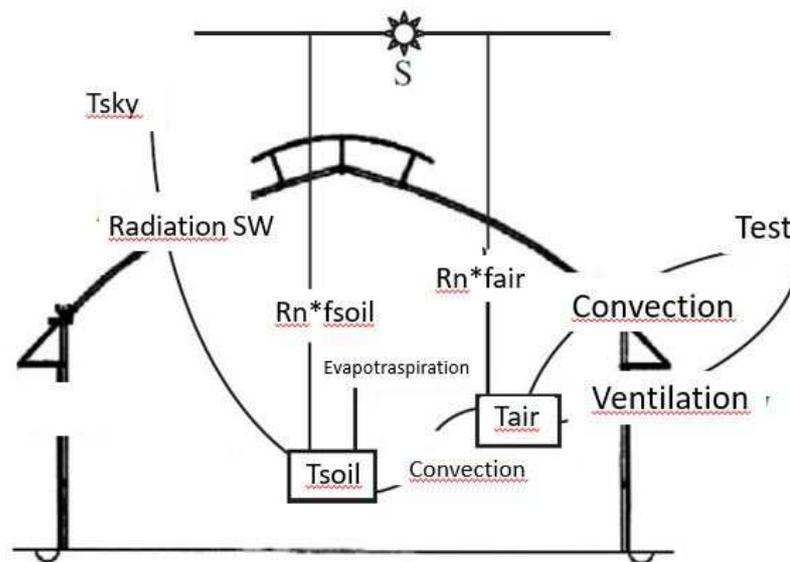


Figura 5-13: Dinamiche del sistema serra

5.2.6.3 Formalizzazione delle equazioni

In questo modello ci sono due variabili di stato, la temperatura dell'aria e la temperatura del terreno, le quali variazioni nel tempo sono descritte da due equazioni differenziali di conservazione dell'energia riportate rispettivamente sotto.

$$M_{air} C_{air} \frac{dT_{air}}{d\tau} = \mathcal{Q}_{LWsoil} + \mathcal{Q}_{opaque} + \mathcal{Q}_{vent} + \mathcal{Q}_{conv,soil-air} + \mathcal{Q}_{AHU} + \mathcal{Q}_{conv,est-air}$$

Eq 16 Equazione differenziale per la temperatura dell'aria

$$M_{soil} C_{soil} \frac{dT_{soil}}{d\tau} = \mathcal{Q}_{rad} - \mathcal{Q}_{LWsoil} - \mathcal{Q}_{ETo} - \mathcal{Q}_{conv,soil-air}$$

Eq 17 Equazione differenziale per la temperatura del terreno

Dove:

τ = tempo [s]

T_{soil} = temperatura del terreno [K]

T_{air} = Temperatura dell'aria [K]

C_{air} = Calore specific dell'aria [J/kgK]

M_{air} = Massa dell'aria [kg]

C_{soil} = Calore specifico del terreno [J/kgK]

M_{soil} = massa del terreno [kg]

\mathcal{Q}_{LWsoil} = flusso di calore a grandi lunghezze d'onda tra terreno e cielo [W]

$\mathcal{Q}_{\text{opaque}}$ = frazione della radiazione solare assorbita dalle superfici opache all'interno della serra e rilasciata all'aria [W]

$\mathcal{Q}_{\text{vent}}$ = flusso di calore per ventilazione [W]

$\mathcal{Q}_{\text{conv,soil-air}}$ = flusso di calore per convezione tra terreno ed aria [W]

\mathcal{Q}_{AHU} = flusso di calore dell'UTA [W]

$\mathcal{Q}_{\text{conv,est-air}}$ = flusso di calore convettivo tra l'ambiente e l'aria all'interno della serra [W]

\mathcal{Q}_{rad} = Flusso di calore solare radiativo

P_{el} = Flusso di calore incidente sul terreno prodotto dalle lampade [W]

\mathcal{Q}_{ETo} = flusso di calore per evapotraspirazione [W]

Si rimanda ad ulteriori pubblicazioni l'esplicitazione dei singoli termini delle equazioni sopra indicate.

5.2.7 Modello del sistema di controllo

Per un sistema dinamico generico l'MPC permette di formulare il problema del controllo dello stesso ambiente a due obiettivi:

1. mantenere lo stato del sistema vicino ad uno stato di equilibrio o nei pressi di una traiettoria di equilibrio prefissata
2. minimizzare il costo delle operazioni di controllo che servono per soddisfare l'obiettivo 1

Per fare ciò il controllore necessita di un modello del sistema da controllare composto da variabili di stato (x) variabili di controllo (u) e termini di rumore (ω) viene riportata sotto la formulazione generale del modello del sistema:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) + \omega(t) \\ y(t) &= C(t)x(t)\end{aligned}$$

In questo tipo di formulazione la seconda equazione (y) rappresenta semplicemente l'uscita del modello visualizzabile all'operatore. Nel nostro modello risulta essere:

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ PF \end{bmatrix}$$

Formulazione valida nel caso si abbia un misuratore di temperatura e di flusso di fotoni all'interno della serra altrimenti si possono cambiare i valori della matrice C in maniera da ricavare una delle due grandezze.

Nel nostro caso le equazioni differenziali che descrivono il modello sono:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) = \frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{\dot{Q}_{opachi} + \dot{Q}_{rad,trasp} + \dot{Q}_{vent} - \dot{Q}_{evap} + \dot{Q}_{sources} + \dot{Q}_{AHU}}{M_a C_a} \\ \dot{x}_2(t) = \frac{\partial PF}{\partial t} = A_{bio}(t) \left[4.57 * G_{tot}^* + \sum_{j=lamps} \phi_{p,j}^* \right] \end{bmatrix}$$

$$x(t) = [T_a \quad PF]$$

$$u(t) = [\dot{Q}_{AHU} \quad \dot{m}_{vent} \quad P_{el} \quad f_{shad}]$$

dove x_1 è l'equazione differenziale che descrive la temperatura e x_2 quella che descrive il flusso di fotoni. Il prossimo passo sarà quello di portare le due equazioni ad avere una forma finale matriciale del tipo generico e quindi definire $A(t)$, $B(t)$ e $\omega(t)$.

Questo modello poi verrà utilizzato nella funzione minimizzante di ottimizzazione del costo del tipo:

$$I = \min \left[(x - x_0)^T Q (x - x_0) + u^T R u \right]$$

Sono state identificate 2 grandezze di stato e 4 di controllo che vengono riportate qui sotto:

$$\begin{aligned} x_1 &= T_{air} = T_a \text{ a } [K] \\ x_2 &= PF \text{ a } [\mu mol] \\ u_1 &= \dot{Q}_{AHU} \text{ a } [W] \\ u_2 &= \dot{m}_{vent} \text{ a } \left[\frac{kg}{s} \right] \\ u_3 &= \dot{Q}_{sources} = \dot{Q}_{lamps} = P_{el} \text{ a } [W] \\ u_4 &= f_{shad} \text{ a } [\%] \end{aligned}$$

Poiché il flusso di fotoni è essenziale per la crescita delle piante, ma non è stato possibile modellarlo con un'equazione differenziale, un'alternativa è stato inserirlo nel modello termico come una fonte di calore. Il controllo di questo parametro è stato costruito direttamente all'interno del modello termico utilizzando un ciclo che impone di seguire le esigenze perfetto flusso di fotoni per il basilico.

Poiché tale modello è applicato ad un caso di studio di una serra prototipale installata ad Albenga, come descritto nel Capitolo 7, per definire tutti i parametri coinvolti, ed in particolar modo le esigenze puntuali della coltivazione oggetto di studio (basilico) ed elaborare dunque compiutamente il modello termico del sistema serra e le matrici di coefficienti all'interno del controllo, è stata avviata una campagna di monitoraggio dei principali parametri di interesse, al

termine della quale verranno analizzati i dati e definita la strategia e le modalità applicative del modello di controllo in oggetto.

[28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]

6 Progettazione e realizzazione prototipale di una serra ad alta efficienza

Obiettivo primario del Progetto SAMLAB è stata la creazione di un laboratorio per la sperimentazione di tecnologie innovative dedicate a migliorare l'efficienza energetica dei processi di coltura in serra e di relativi semplici processi manifatturieri ad essi legati.

Tale prototipo di serra innovativa è stata progettata e realizzata nel Comune di Albenga, presso il CeRSAA, in cui come previsto sono stati enfatizzati gli aspetti legati alla sensoristica ed all'implementazione della tecnologia ad energia geotermica.

6.1 Criteri generali e progettazione

La valutazione delle diverse tecnologie adottate dal mercato circa il controllo climatico in serra, con particolare focus sull'innovazione tecnologia, l'efficienza energetica, ed il rispetto per l'ambiente, ha indirizzato la scelta prototipale verso la soluzione impiantistica innovativa che sfrutta l'energia geotermica accoppiata ad una pompa di calore.

Con la realizzazione dell'impianto geotermico si intende conseguire un significativo risparmio energetico per la struttura servita, mediante la geotermia a bassa entalpia. Questa tecnologia ha i vantaggi di coniugare:

- compatibilità tra esigenze progettuali e tutela ambientale
- risparmio di combustibile fossile
- utilizzo di energia a bassa emissione di sostanze inquinanti

La pompa di calore elettrica utilizza il terreno come sorgente termica; l'efficienza energetica di tale sistema risente in minima parte delle variazioni climatiche esterne e quindi è quasi costante per tutto il tempo di funzionamento. L'efficienza energetica della macchina è mediamente più alta quando si usa il terreno come forma di energia rispetto all'aria, grazie al ridotto salto termico tra fonte e cessione dell'energia. La pompa di calore reversibile permette di far fronte anche al raffrescamento.

La progettazione dell'impianto deriva da: calcolo dei carichi termici mensili, tipo di terreno e n. sonde geotermiche, caratteristiche della pompa di calore; il campo sonde è dimensionato per garantire una temperatura interna in inverno di ca 22 °C e in estate di ca 30 °C; l'impianto è dimensionato per una potenza di picco INVERNALE è di ca 16 kW ed ESTIVA di ca 17 kW; fabbisogno termico INVERNO 25 kW; fabbisogno raffrescamento ESTATE 17 kW; l'impianto di distribuzione ha una temperatura di mandata di 40 °C e ritorno di 35 °C in inverno, e una temperatura di mandata di 9 °C e ritorno di 14 °C in estate.

6.2 Descrizione del prototipo innovativo di serra

Il modello di serra realizzato è di tipo a doppia falda, con pianta rettangolare di dimensioni 9.9 m per i lati Nord e Sud e 15.3 m per quelli Est e Ovest, con altezze di colmo e di gronda rispettivamente pari a 5.6 m e 3.5 m.

Nelle figure seguenti vengono riportate alcune delle tavole tecniche di progetto.

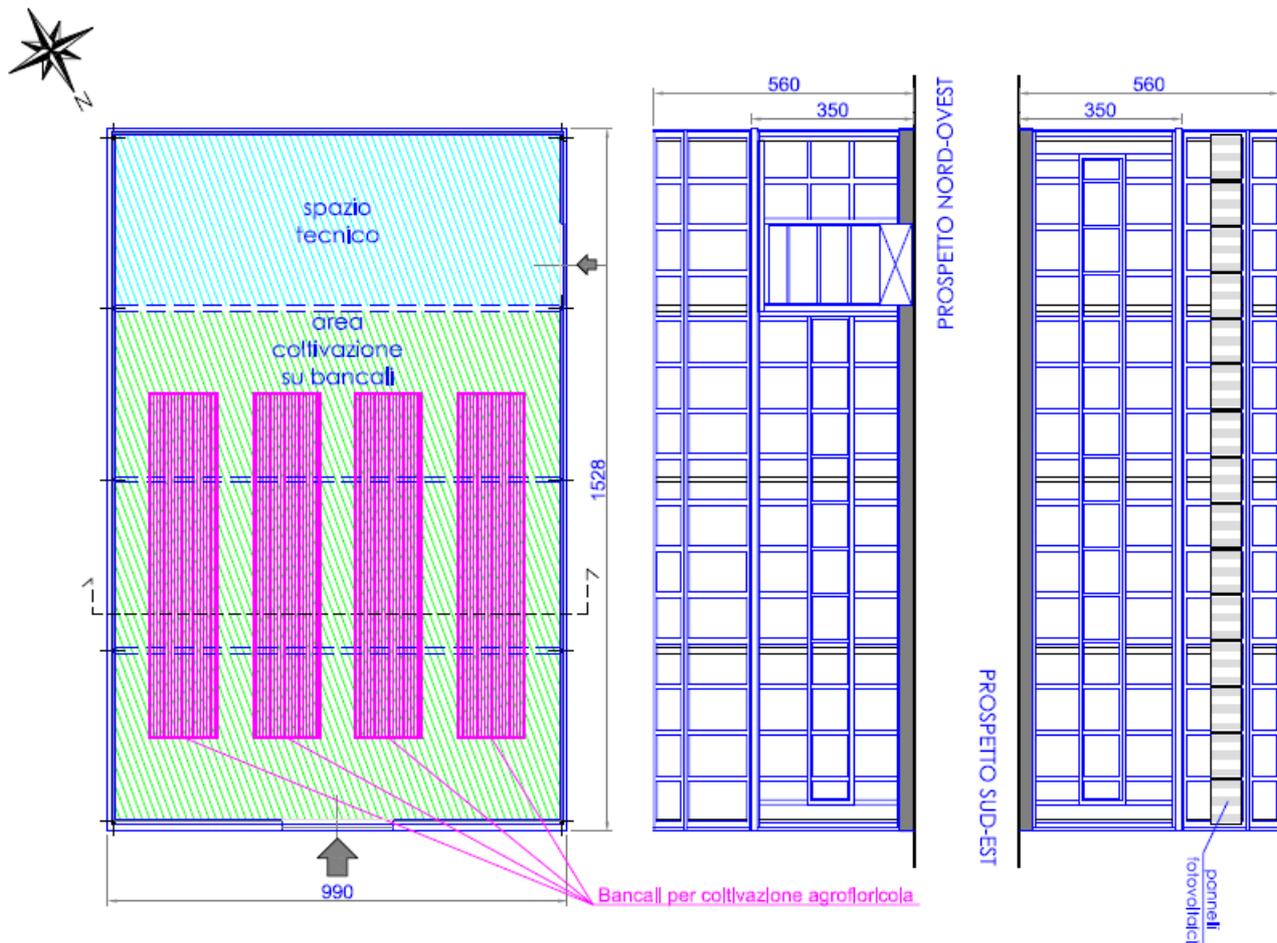


Figura 6-1: Tavola di progetto serra – Pianta e Prospetti laterali

6.2.1 Struttura della serra

La serra è in ferro-vetro adibita alla coltivazione, per una superficie di mq. 150 circa. La struttura portante è composta da elementi in acciaio pronti per l'installazione ed assemblati con bulloneria opportunamente dimensionata. Le capriate sono composte da tralicci elettrosaldati realizzate in profili di acciaio ferroso, le colonne in profili IPE con relative piastre elettrosaldate, le crociere fissate sulle capriate e alle colonne in profilo a U pressopiegato.

L'aerazione della serra è effettuata a mezzo di sportellature incernierate al colmo, sul perimetro si possono installare o sportellature a compasso o sportellature verticali da mt. 1

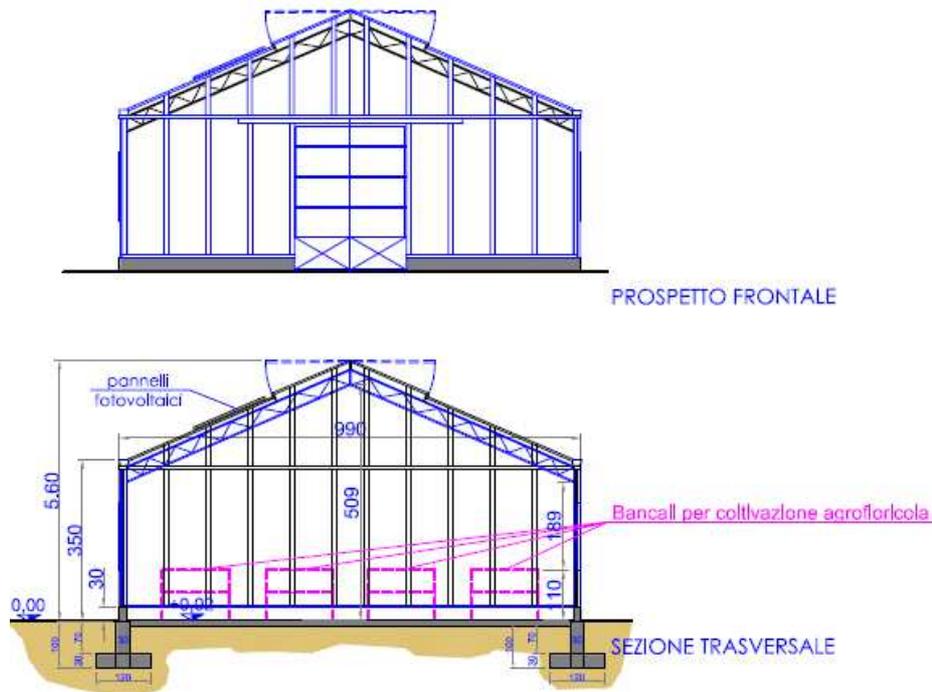


Figura 6-2: Tavola di progetto serra – Prospetto frontale e sezione trasversale

La movimentazione delle sportellature è a mezzo di motoriduttore con cinghie sul tetto e a presa diretta sul perimetro in rispetto delle norme antinfortunistiche, fine corsa a pistoncino per la regolazione dell'apertura e chiusura delle sportellatura, asse comando in tubo zincato 1" collegato a mezzo di giunzione in tubo e fissato con bulloneria 8x50, supporto del tubo in lamiera zincata con inserito cuscinetto schermato, cremagliere zincate a C con rocchetto in bronzo e fissaggio alo tubo a mezzo di viti a pressione e al corrente a mezzo di copiglia zincata.

Il tamponamento tetto zona serra è realizzato con vetro K GLASS S temperato spessore 4 mm.

Il fissaggio delle lastre al profilo portavetro svolto tramite guaina fermavetro in PVC.

Dimensioni:

- Navata da mt. 9,66 n° 1
- Passi da mt. 3,72 n° 4
- Altezza in gronda mt. 3,50 (mt. 3,200 vetro + muro)
- Sportellature al colmo da mt. 1,70 n° 2
- Falde fisse da mt. 3,40 n° 2

L'impianto antigrandine è applicato alla serra in rete metallica (escluso la zona dove sono stati installati i pannelli fotovoltaici)

6.2.2 Quadro elettrico

La parte elettrica è relativa al sistema di comando delle aperture e parte dal quadro di comando montato in corrispondenza della porta di ingresso nell'area di servizio. Il Quadro comando

aperture è realizzato con grado di protezione IP65 e munito di doppia porta: la porta esterna con finestra trasparente permette il controllo visivo delle lampade di segnalazione, dei pulsanti e dei commutatori, la porta interna alloggia i commutatori ed i pulsanti di comando.

Tutti i motori sono protetti contro il sovraccarico ed il cortocircuito mediante opportuni dispositivi (salvamotori). Tutte le utenze sono dotate di commutatore AUT-O-MAN per selezionare il funzionamento manuale o automatico prelevando il comando da una centralina contenuta nel quadro stesso. La centralina è dotata di sonda di temperatura per il comando in automatico delle aperture e dei sensori di velocità del vento e presenza di pioggia per la chiusura automatica in caso di temporale. La centralina non differenzia i colmi ed i laterali durante il funzionamento automatico.

6.2.3 Impianto geotermico

Il campo sonde geotermico è costituito da n. 6 sonde geotermiche verticali a doppia U della profondità di 100 metri, con resa termica del terreno di 45 W/m.



Figura 6-3: Esempio di sonde geotermiche utilizzate nel progetto

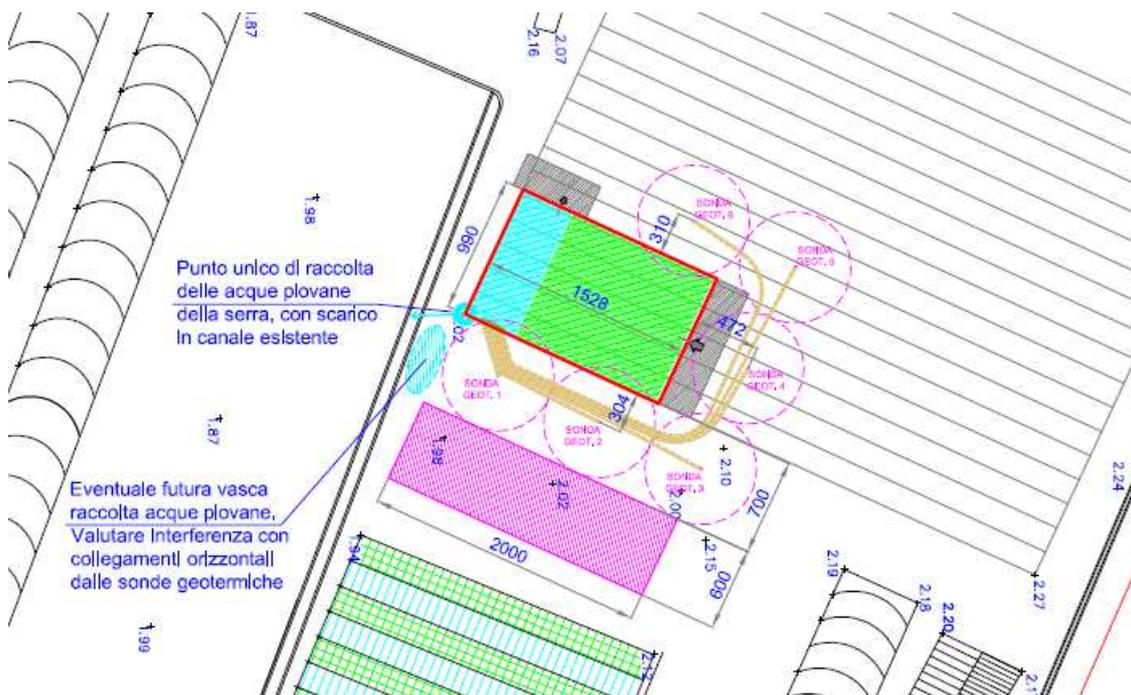


Figura 6-4: Planimetria generale di intervento

Le sonde geotermiche sono corredate di termoresistenze per la misurazione della temperatura in profondità, applicate sulla tubazione della sonda n.1 alla profondità di 80 metri e 40 metri ed in testa, sulla sonda n. 6 in testa; la sonda n. 1 è stata sottoposta a GRT (Ground Response Test).

6.2.4 Pompa di calore

In accoppiamento al sistema di sonde geotermiche è stata installata una pompa di calore geotermica terra/acqua 5-22 kW ECOFOREST modello ECOGEO B3 per il riscaldamento/raffrescamento attivo. Come accumulo inerziale si è adottato un accumulo da 300 litri per acqua calda “invernale” o fredda “estiva”, CORDIVARI.

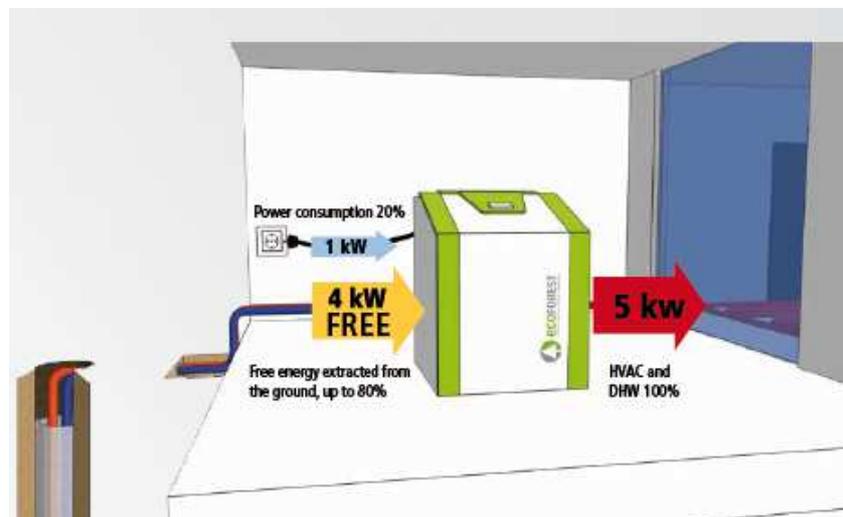
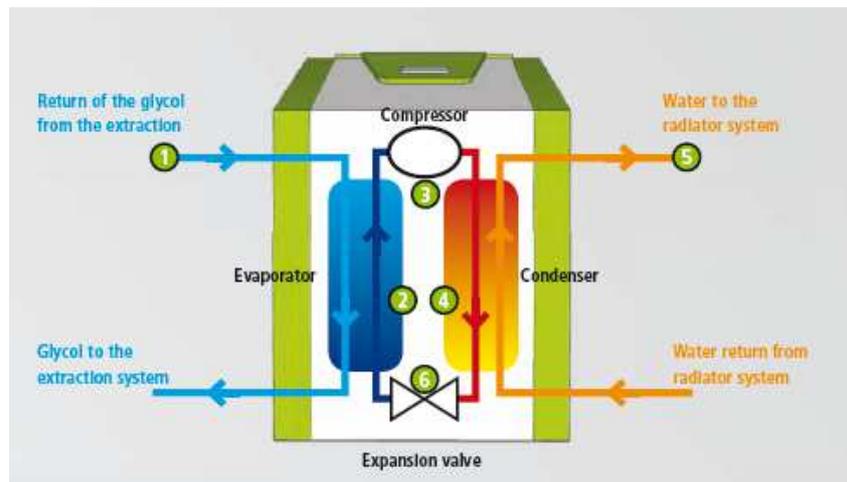


Figura 6-5: Schema semplificato funzionamento pompa di calore installata

6.2.5 Unità di Trattamento Aria

Allacciata alla pompa di calore è stata installata un'unità di trattamento aria AERMEC, con portata 4100 mc/h e canali tessili AIRMIXING Evoair per riscaldamento e raffrescamento dell'ambiente; n. 3 canali tessili posti sotto n. 3 bancali in cemento, dimensionati in base alla portata della UTA.



Figura 6-6: Unità di trattamento Aria (UTA)

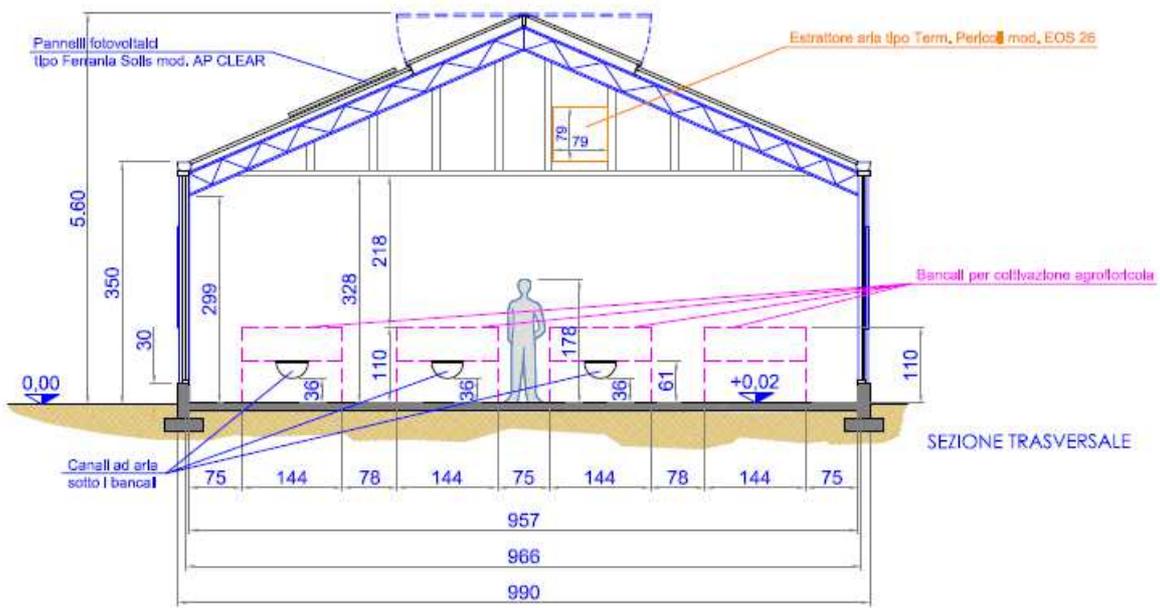


Figura 6-7: Tavola di progetto Sezione trasversale e posizionamento maniche

6.2.6 Impianto fotovoltaico

Sul lato Sud della struttura è stato realizzato un impianto fotovoltaico da 1,9 kWp circa.

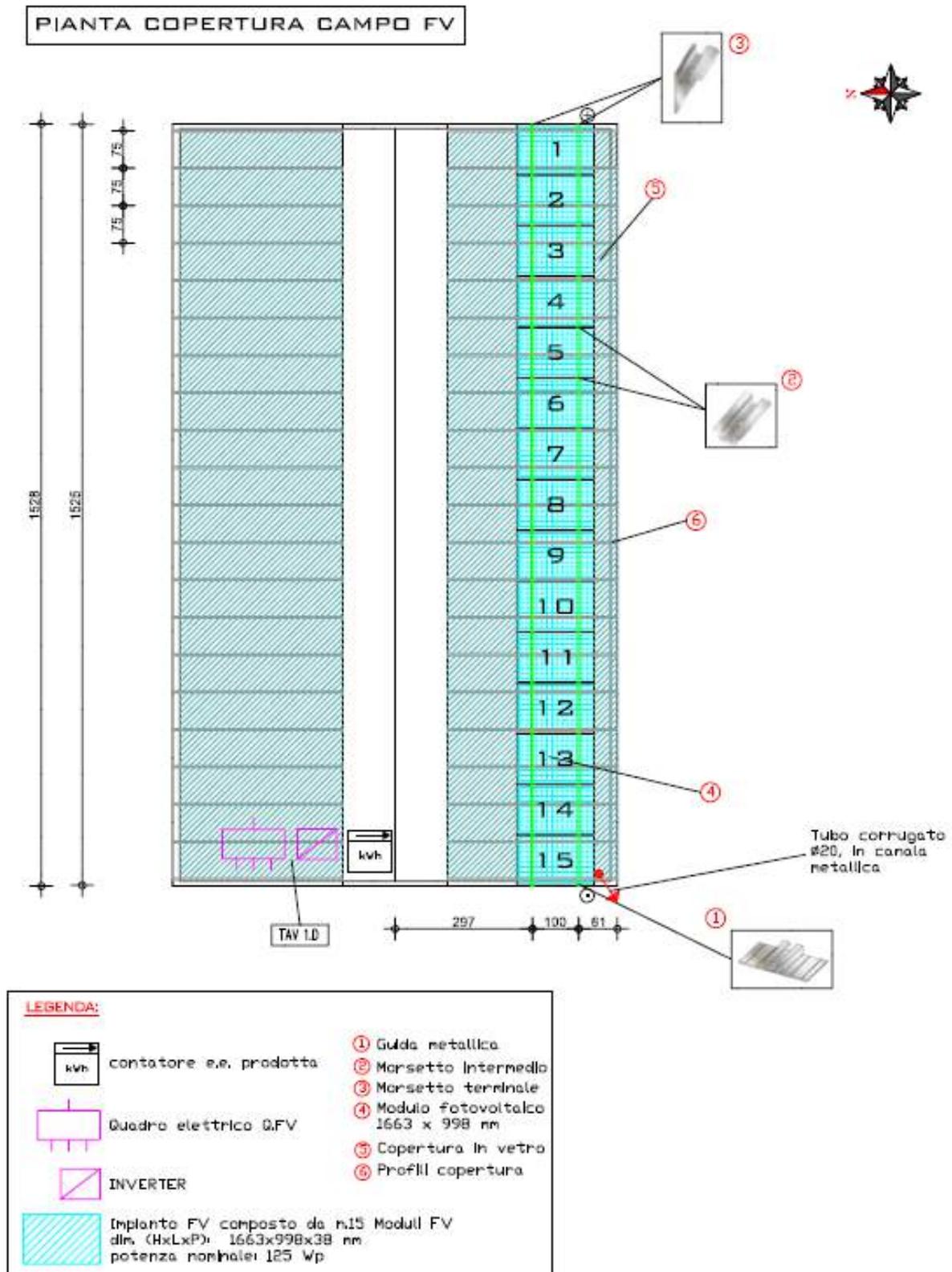


Figura 6-8: Impianto fotovoltaico – Tavola di progetto – Pianta

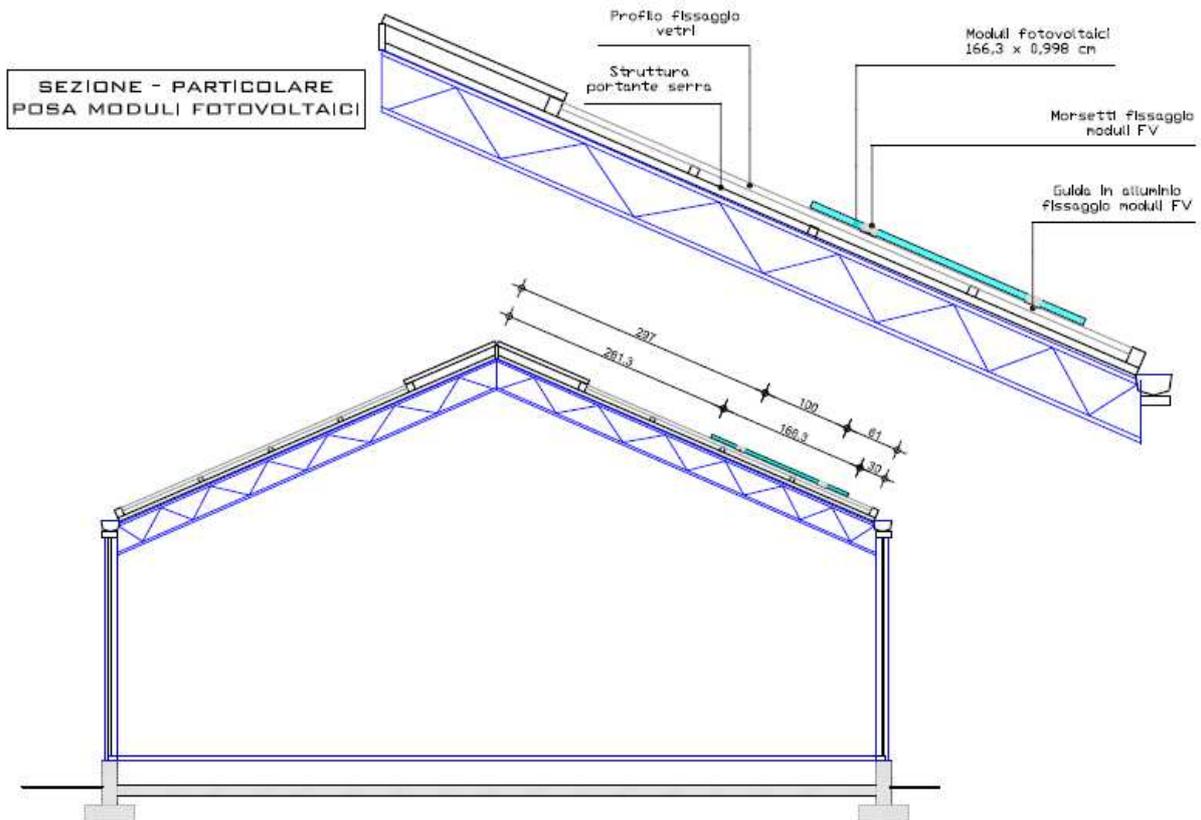


Figura 6-9: Impianto fotovoltaico – Tavola di progetto – Sezione trasversale

Caratteristiche Elettriche

Tipo		AP 30 -125
Prestazioni in Condizioni Standard (STC): Irraggiamento 1000 W/m ² ; Temperatura del Modulo 25°C; AM 1.5		
Potenza nominale	P _{mpp} (W)	125
Tensione alla massima potenza	V _{mpp} (V)	15,10
Corrente alla massima potenza	I _{mpp} (A)	8,30
Tensione a circuito aperto	V _{oc} (V)	18,74
Corrente di corto circuito	I _{sc} (A)	8,82
Fill Factor	%	75,83
Efficienza modulo	%	7,55
Tolleranza di potenza	%	-2 ,+2
Temperatura di lavoro	(°C)	- 40 / + 85
Massima tensione	(V _{oc})	1000
NOCT	(°C)	43 ± 2
Prestazioni alla NOCT: Irraggiamento 800 W/m ² ; Temperatura del Modulo 43°C; AM 1.5		
Maximum Power	P _{max} (W)	91,8
Maximum Power Voltage	V _{mpp} (V)	14,67
Maximum Power Current	I _{mpp} (A)	6,23
Open Circuit Voltage	V _{oc} (V)	17,66
Short Circuit Current	I _{sc} (A)	6,76
Design, Dimensioni, Ombreggiamento		
Celle		Silicio Multicristallino -156 x 156 mm - 3 bb
Numero celle	no.	30
Numero di stringhe	no.	6 o 3
Ombreggiamento	%	50
Strato frontale		Alta Trasparenza, anti-riflesso, 3,2 mm , vetro temperato
Strato dorsale		Strato dorsale ad alta trasparenza
Incapsulante		EVA (copolimero Etilene -Vinil Acetate)
Scatola di giunzione		IP 65 / IP67 - Classe II - 2 diodi di by-pass
Cavi		2 unipolari - sezione 4mm ² - innesto rapido - lunghezza 1 m
Connettori		MCT4
Lunghezza	mm	1663
Larghezza	mm	998
Spessore cornice	mm	38
Peso	kg	18,0

Tolleranza di misurazione per tutti i valori elettrici ±10% (eccetto P_{mpp} e NOCT)

6.2.7 Riscaldamento bancali

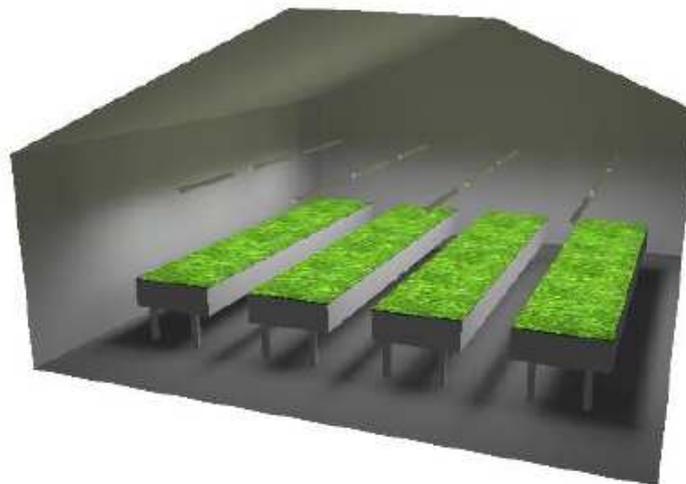
Sistema di riscaldamento dei bancali mediante serpentina idraulica (n. 2 bancali) a bassa temperatura, mandata acqua ca 40 °C così organizzati: n. 1 bancale in cemento con serpentina idraulica direttamente posata sul piano di cemento del bancale, tessuto, terriccio per semina nel terreno; n. 1 bancale in cemento con serpentina idraulica posata su pannello isolante, tessuto, parte in terriccio per semina nel terreno e parte senza terriccio per semina in vasetto, per un totale complessivo di 22 mq. Inoltre è presente un sistema di riscaldamento dei bancali con tappetini elettrici WARMSET così organizzati: n. 1 bancale in cemento con tappetino elettrico, tessuto, terriccio per semina nel terreno; n. 1 bancale in cemento con tappetino elettrico, tessuto, terriccio per semina nel terreno e parte senza terreno per semina in vaso, per un totale complessivo di 22 mq. Sia i bancali con i tappetini idraulici sia i bancali con i tappetini elettrici hanno controllo individuale, con possibilità di differenziare le temperature.



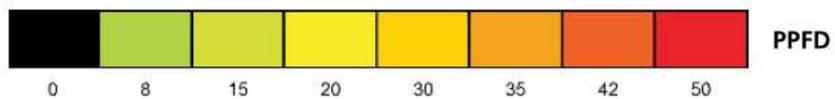
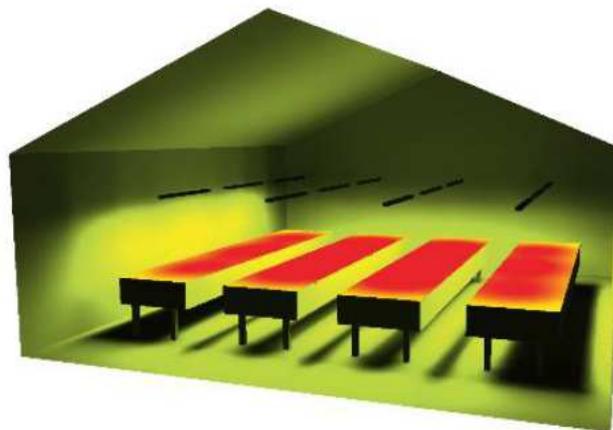
Figura 6-10: Tappetini riscaldati per il riscaldamento dei bancali

6.2.8 Impianto a LED

Un impianto di luci LED VALOYA è stato progettato e realizzato per regolare il flusso radiante verso le colture principalmente durante la notte, e favorire la crescita della coltura e la produttività. Ogni bancale è corredato di n. 4 lampade LED, ciascuna temporizzata, poste ad una distanza dal bancale di ca 1,50 metri; tale distanza è stata definita in base al tipo di lampada e coltura; tale distanza potrà essere diminuita fino alla distanza di 0.50 metri dal bancale.



Option 1 - Valoya B200 AP673L / h = 1.5 m



Option 2 - Valoya B200 AP673L / h = 1.5 m

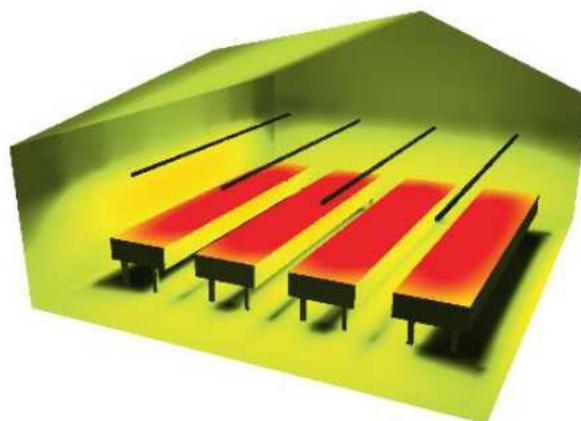


Figura 6-11: Sistema Led – Simulazione di funzionamento

	AP673L
Ultra violet [< 400 nm]	0 %
Blue [400 - 500 nm]	12 %
Green [500 – 600 nm]	19 %
Red [600 - 700 nm]	61%
Far Red [700 – 800 nm]	8 %
Par [400 - 700 nm]	92 %
Match to RQE curve	6 %
CCT [K]	2000
CRI	60
PSS	0.84

Tabella 6-1: Sistema LED - Dati dello spettro standard

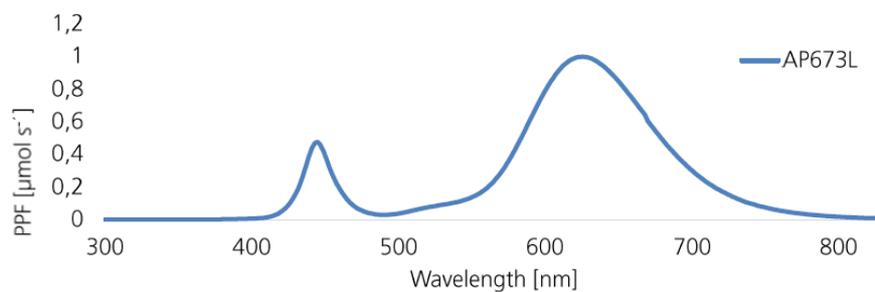


Figura 6-12: Sistema LED - grafico dello spettro

6.2.9 Sensoristica

Sono stati installati i sensori per il monitoraggio di vari parametri quali ad esempio: temperatura del terreno, umidità del terreno, temperatura dell'aria interna, temperatura dell'aria esterna, luminosità, ecc. A seguito di questo monitoraggio sarà possibile determinare come controllare e regolare tutto l'impianto legato al controllo climatico del sistema serra, ovvero funzionamento pompa di calore, accensione UTA in base alle condizioni di temperatura e umidità dell'aria, funzionamento estrattore aria, regolazione delle aperture, regolazione della movimentazione delle teline ombreggianti. L'architettura e le specifiche del sistema di monitoraggio e controllo compaiono nel capitolo precedente.

6.3 Fasi realizzative

A seguito della progettazione e completata la definizione dei dettagli costruttivi e impiantistici, è stato realizzato presso il Ce.R.S.A.A. nel Comune di Albenga un prototipo innovativo di serra ad alto contenuto tecnologico per il risparmio energetico, con la seguente sequenza delle fasi realizzative.

1. Tracciamento e **delimitazione dell'area** destinata alla costruzione della serra e dell'area di cantiere



2. Scavo delle fondazioni



3. **Realizzazione delle fondazioni**, predisposizione dei cavidotti per il passaggio degli impianti e realizzazione delle reti di scarico, preparazione del piano di posa del pavimento elicotterato



4. **Realizzazione del campo sonde geotermico** mediante la realizzazione di sonde verticali a circuito chiuso con le seguenti caratteristiche:

- perforazione a distruzione di nucleo di spinta fino alla profondità di 100 m dal piano campagna con macchina perforatrice a doppia testa di rotazione mediante rivestimento con tubazioni provvisorie di rivestimento, recuperate dopo l'installazione e la cementazione della sonda geotermica (macchina perforatrice Casagrande Hutte HBR205)

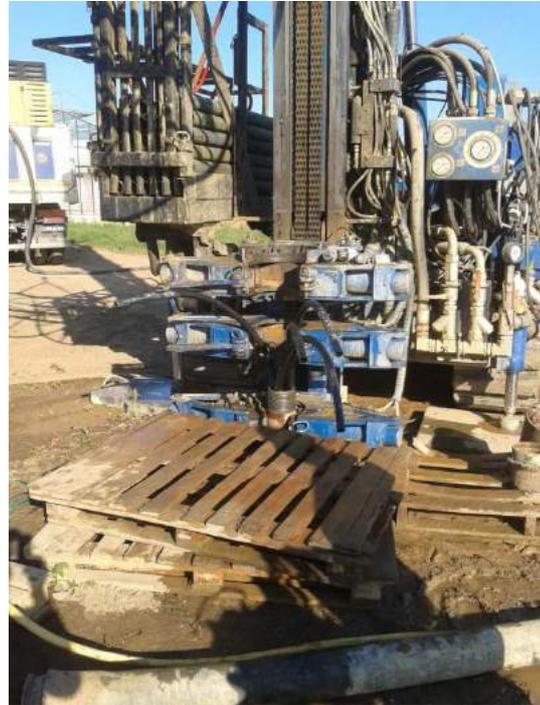
- inserimento nei fori di n. 6 sonde geotermiche del tipo a doppia U in polietilene PE100-RT SDR 11 PN 16, d.e. 32 mm, d.i. 26 mm, ciascuna di lunghezza pari a 100 m (materiale Haka Gerodur – Germania)

- cementazione del foro mediante iniezione di miscela composta da acqua / leganti minerali cementizi / bentonite preidrata e

composti stabilizzatori della conducibilità termica (betonico Termoplast plus) a conducibilità termica certificata non inferiore a 1,8 W/m°C, da fondo foro fino a piano campagna con utilizzo di pompa di iniezione ; prova di flusso e prova di tenuta eseguite sulle sonde geotermiche finite

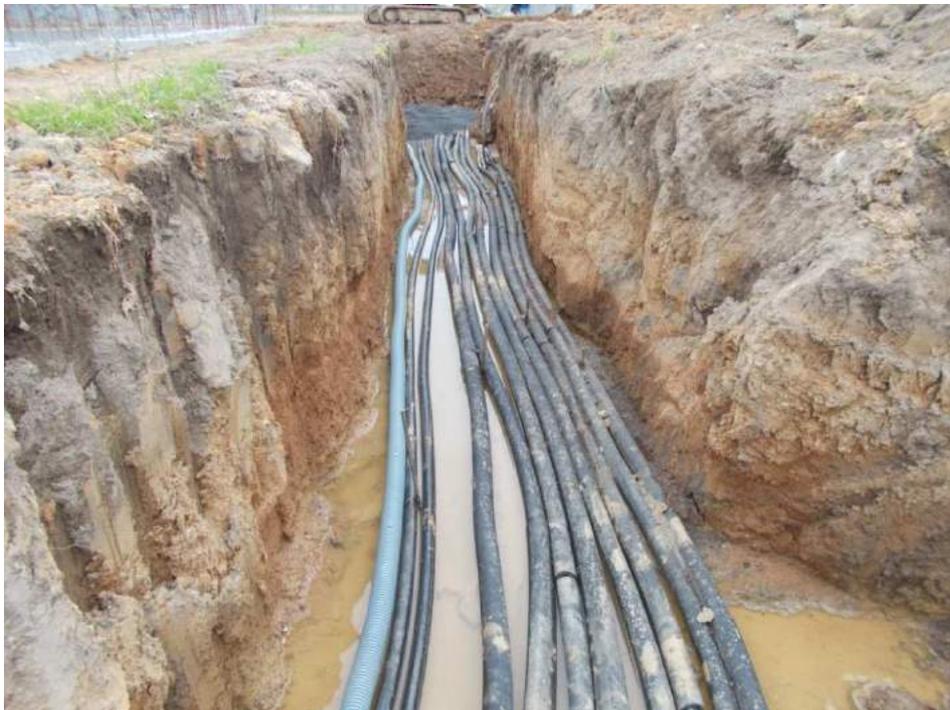


- realizzazione di n. 2 pozzetti ispezionabili in testa alle sonde n.1 e n. 6, per consentire l'esecuzione di prova GRT (Ground Response Test), dotate di termoresistenze per il monitoraggio della temperatura delle sonde anche in profondità (-80 metri);



5. Realizzazione dei **collegamenti orizzontali** in scavo predisposto alla profondità di min 1 metro da piano di campagna, di raccordo della testa delle sonde al collettore in centrale mediante saldatura della testa delle sonde alle tubazioni orizzontali, stesura delle tubazioni

orizzontali in polietilene PE100 PN16 d.e. 40 mm, tutte coibentate con materiale isolante Armaflex, posate su letto di sabbia pulita di spessore non inferiore a cm 10 e ricoperte interamente da strato di sabbia pulita dello spessore non inferiore a cm 10;



6. Realizzazione della **struttura della serra** in acciaio zincato (colonne, capriate, colmi, arcarecci, correnti, grondaie, ecc.), profili portavetro in alluminio, areazione della serra mediante sportellature incernierate al colmo e sportellature verticali sul perimetro e

motorizzate nel rispetto delle norme antinfortunistiche, portoni di ingresso scorrevoli (n.2), tamponamento del tetto della serra con vetro K GLASS tipo S temperato spessore 4 mm e tamponamento perimetro e paratia con vetro K GLASS tipo S normale spessore 4 mm, impianto antigrandine applicato in rete metallica; telaio per fissaggio termoestrattore d'aria, impianto di coibentazione interno orizzontale e laterale motorizzato con telo Basic5 Argentum AIC 65 (65% di ombreggio, 60 % di coibentazione), impianto elettrico a norma di legge per il comando della aperture e delle teline ombreggianti/coibentanti con quadro di controllo (Aurora Serre, Agricontrol).





7. Realizzazione della **centrale geotermica** così composta:

- pompa di calore geotermica (Marca ECOFOREST)
- accumulo inerziale (MarcaCORDIVARI)
- collettore geotermico per n. 6 sonde (materiali in assemblaggio OVENTROP) e coibentazione dei tratti a vista (Marca ISOGENOPACK)
- unità di trattamento aria (Marca AERMEC), circolatore ad inverter e canali tessili semicircolari (Marca EVOAIR Airmix) installati su n. 3 bancali
- materiali di completamento: tubazioni di collegamento, valvole miscelatrici, elettropompe di circolazione ad inverter, manicotti, sfiati, raccorderia, termometri, misuratori pressione, vasi di espansione;
- riempimento del circuito (sonde - collegamenti orizzontali - pompa di calore – accumulo) con l’inserimento di una percentuale di glicole





8. Installazione e **allestimento dei bancali** in cemento mediante:

- posa dei 4 bancali in cemento forniti dal Cersaa (dimensioni 2.50x7,50 metri)
- posizionamento dei tappetini idraulici di riscaldamento dei bancali costituiti da tubazione riscaldante ad acqua, in due soluzioni: fissaggio sul bancale della serpentina idraulica, posa del tessuto, posa del terriccio per piantumazione diretta nel terreno; fissaggio sul bancale di pannello isolante, posa della serpentina integrata, posa del tessuto, posa del terriccio di coltivazione (parte con terriccio per piantumazione diretta nel terreno/parte senza terriccio per coltivazione in vaso), posa delle sonde di temperatura
- posizionamento dei tappetini elettrici di riscaldamento dei bancali costituiti da sistema di riscaldamento elettrico Warmset Black con centralina di gestione della temperatura e sonde di rilevazione a terra, in due soluzioni: posa del tappetino elettrico, posa del tessuto, posa del terriccio per piantumazione diretta nel terreno; posa del tappetino elettrico, posa del tessuto senza terriccio per coltivazione in vaso





9. Realizzazione dell'**impianto elettrico della serra**, a norma di legge, per il funzionamento della centrale geotermica (pompa di calore, unità di trattamento aria, riscaldamento tappetini elettrici, illuminazione led e illuminazione di servizio)



10. Realizzazione **impianto di illuminazione interna alla serra**, a norma di legge mediante: installazione di n.16 lampade LED ad ampio spettro VALOYA Grow Light temporizzate per l'illuminazione ottimale ad alta intensità delle coltivazioni con massimo risparmio energetico (n. 4 lampade/bancale); installazione illuminazione di servizio a LED (ditta DISANO)





11. Realizzazione **impianto fotovoltaico** composto da n. 15 pannelli fotovoltaici al silicio multi cristallino classe 125 W trasparente AP 30 CLEAR (ditta FERRANIA SOLIS) e componentistica (Inverter ABB UNO 2.0-TL-OUTD-S)



12. Realizzazione di **impianto di irrigazione** mediante tubazione zincata di mandata su ogni bancale, pendoli a innesto, micro spray, raccorderia e accessori



13. Installazione dei **sensori per il monitoraggio e il controllo** dei parametri climatici della serra (temperatura suolo/bancale, temperatura ambiente/sotto bancale, temperatura ambiente/altezza media sopra bancale, luminosità/sopra i led, umidità suolo/bancale) e centralina CPU



7 Conclusioni

In questi ultimi anni stiamo assistendo ad un evolvere vortiginoso delle nuove tecnologie legate alla gestione dell'informazione che permettono sempre più semplicemente ed a basso costo di monitorare e controllare in remoto sistemi e applicazioni di tipo diverso. Similmente, dal punto di vista energetico, nuove tecnologie sembrano oggi rendere possibili e sostenibili attività una volta impensabili, sia dal punto di vista ambientale che economico. La rapida diffusione della conoscenza e delle potenzialità insite nelle nuove tecnologie è una necessità per rendere competitive le imprese italiane e quelle liguri.

La sfida che ha visto coinvolti un consorzio costituito da piccole medie imprese liguri, dal Centro di Sperimentazione e Assistenza Agricola (Ce.R.S.A.A.) e dall'Università di Genova come Scuola Politecnica ha affrontato il tema dell'efficientamento energetico e del controllo della qualità dei parametri ambientali nel settore delle colture protette in serra. Questo comparto, per decenni eccellenza ligure dal punto di vista della qualità del prodotto e del bacino occupazionale, soffre oggi più che in passato la concorrenza di competitors del nord Europa in grado ottimizzare il processo produttivo facendo ricorso massiccio all'innovazione.

Il Consorzio del presente progetto Sam Lab ha voluto essere parte attiva e propositiva in questa competizione di grande respiro, di rilevante valenza strategica e, al contempo, grande complessità. A partire dal capofila Erde Srl, il gruppo di ricerca è stato in grado di lavorare con intensità e metodo affrontando il tema dell'integrazione tecnologica nelle serre agricole mettendo in campo un approccio multidisciplinare che ha consentito di mettere a frutto e condividere le competenze di soggetti diversi per estrazione e provenienza professionale. In questo senso la finalità del Programma Par Fas sono state completamente recepite e messe in pratica.

Il progetto proposto e realizzato ha portato alla realizzazione di un ambiente serra ad altissimo contenuto tecnologico in grado di utilizzare l'energia della terra e del sole (a fini termici ed elettrici) avvalendosi di sistemi di controllo dei parametri climatici interni di assoluta innovazione per tipologia e quantità di variabili controllate (temperature, illuminamento e radiazione fotosintetica, ricambio d'aria naturale e forzata, umidità, erogazione della potenza termica e dell'estrazione dell'energia dal sistema geotermico).

Questo ambizioso programma voleva però essere anche partecipativo per tutti i soggetti liguri del settore. I risultati prodotti permettono alle piccole medio imprese della Regione Liguria di avere un approccio "hands on", cioè pratico, pragmatico e partecipativo alle nuove tecnologie utilizzabili per le colture in serra, con particolare riferimento alle energie rinnovabili, all'efficientamento energetico e alle tecnologie a basso costo per il suo monitoraggio e controllo.

Aver realizzato questo progetto in un periodo di crisi economica vuol dire sicuramente aver vinto una scommessa difficile e la sua attuazione è stata sicuramente merito oltre che dei partecipanti, del finanziamento messo a disposizione da Regione Liguria. La scommessa futura riguarda, invece, il mantenimento di tale laboratorio. Aver posizionato il laboratorio-serra presso il sito del Ce.R.S.A.A., ente strumentale del sistema delle Camere di Commercio, è sicuramente un primo passo utile per far sì che la diffusione dei risultati possa avvenire in primo luogo presso le aziende del settore interessate.

I prossimi passi riguardano la creazione di un processo virtuoso tale per cui quanto mostrato in questo libro bianco e realizzato all'interno del laboratorio-serra rimanga vivo nel tempo e possibilmente possa replicarsi con grande successo.

Bibliografia

1. Campiotti et al, Ambiente risorse e salute, Efficienza energetica e fonti rinnovabili per l'agricoltura protetta, 2010;
2. ENEA, Quaderno – L'efficienza energetica nel settore agricoltura, 2011;
3. European Union, State of art on energy efficiency in agriculture, 2012;
4. Coldiretti, I problemi della floricoltura e del vivaismo e le proposte di Coldiretti, 2006;
5. Ce.R.S.A.A., Stima della consistenza nazionale delle serre sottoposte a riscaldamento, 2012;
6. AIEL, Risparmio energetico e biomasse agroforestali per il riscaldamento delle serre, 2012
7. Ce.R.S.A.A., Tabella di raccolta dati riguardo i parametri chimico fisici ideali per alcuni tipi di colture, 2015.
8. Università degli studi di Milano, L'ambiente Protetto, 2012;
9. INEA, I Costi di produzione della floricoltura ligure, 2014
10. Ce.R.S.A.A., Raccolta dati orticoltura e floricoltura in italia, 2015;
11. ARSIA DIAF, Efficienza energetica nelle serre, 2002;
12. CRA-ING Laboratorio di Treviglio, *Il Progetto FLoREner*, 2009;
13. Mendicino, Indoor light quality and sustainable energy use in new concept greenhouses for Mediterranean climate, 2015;
14. Muzzi, Analisi energetica su base oraria di una serra agricola finalizzata alla fattibilità di un impianto geotermico a pompa di calore, 2015;
15. Ce.R.S.A.A., Realizzazione di un censimento delle serre fotovoltaiche esistenti in italia (CENS), 2014;
16. <http://www.biologia.unige.it/>
17. www.biocourse.com, Student online learning center by Mc Graw Hill.
18. FAO, *Good agricultural practices for greenhouse vegetal crops*, 2013.
19. Sethi V.P., 2009, On the selection of shape and orientation of a greenhouse: thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*. 83: 21-38.
20. E. Paietta, Modellazione di sonde geotermiche verticali per la simulazione e il dimensionamento degli impianti a pompa di calore geotermica nelle colture protette in serra, Università degli Studi di Genova, 2015.
21. A. Priarone, M. Fossa, E. Paietta, D. Rolando, *Energy demand hourly simulations and energy saving strategies in greenhouses for the Mediterranean climate*, Università degli Studi di Genova, 2015.
22. Bernier M., Pinel P., Labib R. e Paillot R. (2004), *A multiple load aggregation algorithm for annual hourly simulations of GCHP Systems*, *HVAC&R*, Research 10, 471-487.
23. Fabrizio E. (2012), *Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection*, *Energy and Buildings* 53, 57-63.
24. Dalla Pietà D., Fossa M. (2006), *Modeling and Design of Borehole Heat Exchangers for Ground-Source Heat Pump Applications*, XXIV National UIT Congress.
25. Fossa M., Paietta E. (2013), *Comparison of multiple load aggregation algorithms for annual hourly simulations of geothermal heat pumps*, EGC 2013 Conference, Pisa, Italy

26. Molina-Giraldo, N., Blum, P., Zhu, K., Bayer, P., Fang, Z. A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection, *Int. J. Thermal Sciences*, 50 (12), 2506-2513, 2011
27. Fossa M., Rolando D., Priarone A., Vaccaro J. Numerical evaluation of the Ground Response to a Thermal Response Test experiment. In: *Proceedings of EGC 2013*. p. 1-8, ISBN: 9782805202261, Pisa, Italy, 2013
28. Caponetto R. Soft computing for greenhouse climate control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2000, 8(6): 253-760.
29. Zhang L. H., Sun L., Han S. F., et al. Measurement and Control System of Soil Moisture of Large Greenhouse Group Based on Double CAN Bus. *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. 2011, 2:518-521.
30. Salazar A., Rojano A. A Model for the Combine Description of the Temperature and Relative Humidity Regime in the Greenhouse. *Ninth Mexican International Conference on Artificial Intelligence (MICAI)*, 2010, 113:117.
31. Molderink A., Bakker V., Bosman M.G. C., et al. Management and Control of Domestic Smart Grid Technology. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2010, 1(2): 109-119.
32. Meng-Shiuan Pan; Lun-Wu Yeh; Yen-Ann Chen. A WSN-Based Intelligent Light Control System Considering User Activities and Profiles, *IEEE Sensors Journal*, 2008; 8(10): 1710-1721.
33. Shilong Lu; Xi Huang; Li Cui. Design and implementation of an ASIC-based sensor device for WSN applications, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009; 55(4):1959-1967.
34. Garcia Macias J.A.. Browsing the Internet of Things with Sentient Visors. *Computer*. 2011, 44(5): 46-52.
35. Hong S., Kim D., Ha M., et al. SNAIL: an IP-based wireless sensor network approach to the internet of things Sungmin. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(6): 34-42.

RIFERIMENTI



Ing. Maria Rapetti

MariaRapetti@erde.it



Prof. Roberto Sacile

Roberto.Sacile@unige.it



Prof. Marco Fossa

Marco.Fossa@unige.it



Dott. Giovanni Minuto

giovanni.minuto@sv.camcom.it



info.energheigroup@gmail.com