POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Studio di un sistema di climatizzazione per serre adibite a colture aeroponiche

Relatore: Prof. Marco Carlo Masoero
Correlatore: Ing. Gregorio Tosi

Candidata
Cristina Riva

Anno Accademico 2020/2021

Abstract

L'eccessivo sfruttamento del suolo, l'utilizzo di diserbanti e lo spreco d'acqua sono alcune delle motivazioni che hanno spinto l'umanità a ricercare metodi di coltivazione più sostenibili.
Tra di essi si distingue l'aeroponica, una tecnica innovativa che consiste nella produzione di piante, con apparato radicale poco esteso, in assenza di substrato. Le specie vegetali assorbono solo la quantità di soluzione nutritiva di cui hanno bisogno e la parte in eccesso viene recuperata conseguendo minimi sprechi sia in termini di acqua sia di sostanze nutritive.

La struttura in cui la tecnica aeroponica può essere applicata è la serra chiusa, priva di aperture nella copertura; infatti, è essenziale mantenere determinate condizioni ambientali all'interno dell'ambiente protetto ed evitare il rischio di contaminazioni.

Una soluzione impiantistica in grado conseguire le condizioni climatiche interne obiettivo e di uniformare il più possibile la temperatura e l'umidità relativa dell'aria contenuta all'interno della serra, è costituita da due pompe di calore a portata di fluido variabile collegate ad unità interne poste in un vano tecnico.
La sfida principale è ottenere un trattamento dell'aria analogo a quello che si otterrebbe all'interno di una unità di trattamento aria, senza averne a disposizione una vera e propria.

Confrontando le prestazioni che tale impianto dovrebbe garantire qualora fosse installato, in Italia, a tre latitudini differenti, Torino, Grosseto e Messina, è possibile evidenziare come le condizioni climatiche proprie di ciascun luogo influenzino la potenza richiesta per il riscaldamento e per il raffrescamento.
Quest'ultimo risulta essere l'aspetto più problematico da controllare in tutte le località indagate, in particolare per quanto riguarda il contenimento dell'umidità relativa, soprattutto nei caldi pomeriggi estivi, quando, avendo raggiunto la temperatura desiderata, si sarebbe portati a fermare il raffrescamento.

Fissando le condizioni esterne pari a quelle relative alla località di Torino, sono state eseguite ulteriori analisi modificando alcuni parametri, come percentuale di ombreggiatura, orientazione spaziale della serra, parametri termo-igrometrici obiettivo e materiale di copertura.
I risultati mettono in luce la dipendenza delle potenze in gioco dalle caratteristiche proprie della serra e possono guidare nella scelta delle soluzioni migliori nell'ottica di ridurre il consumo energetico per la climatizzazione.

Se l'adozione di pompe di calore permette di contenere l'emissione di gas serra, l'installazione di moduli fotovoltaici può comportare anche un risparmio di energia elettrica, utilizzando quella da essi prodotta per alimentare le pompe di calore.
Per questo motivo, diventa interessante valutare la producibilità di un impianto fotovoltaico installato su una falda del tetto della serra.

La presente trattazione si propone, inoltre, di fornire un'idea dei costi associati ai dispositivi adibiti alla climatizzazione e al loro funzionamento durante tutto l'arco dell'anno.

In ultimo, è stata riportata una soluzione impiantistica alternativa che vede sempre come generatore di energia una pompa di calore, ma che alimenta un sistema idronico comprensivo di una unità di trattamento aria vera e propria e di accumuli inerziali.

Indice

Abstract 2
Introduzione....7
Capitolo 1. Coltura aeroponica....9
1.1. L'aeroponica nel tempo....9
1.2. Tecnica di coltivazione....10
1.3. Testimonianze di colture aeroponiche in Italia....11
1.4.Vantaggi e svantaggi....12
Capitolo 2. Tipologie di serre e materiali di copertura utilizzati....14
2.1. Tipologie di serre e dimensioni tipiche....14
2.2. Struttura portante....16
2.3. Fondazioni....16
2.4. Elementi trasparenti utilizzabili per la copertura: caratteristiche tecniche e costi....16
2.4.1. L'effetto serra....16
2.4.2. Vetro....17
2.4.3. Materie plastiche....18
2.4.4. Tabella di confronto caratteristiche tecniche e costi....20
2.4.5. Conclusione....21
2.5. Serre adibite a colture aeroponiche....21
Capitolo 3. Sistemi di ombreggiatura....23
3.1. Tipologie di sistemi di ombreggiamento....24
3.1.1. Teli ombreggianti....24
3.1.2. Reti ombreggianti....26
3.1.3. Vernici ombreggianti....27
3.2. Possibilità di applicare pannelli fotovoltaici per realizzare una parziale schermatura....28
3.2.1. La radiazione solare....28
3.2.2. I moduli fotovoltaici....30
3.2.3. Vantaggi....31
3.2.4. Problematiche....31
3.2.5. Soluzioni costruttive....32
3.3. Conclusione....34
Capitolo 4. Climatizzazione serre....36
4.1. Umidità relativa....36
4.2. Controllo della $CO2$....37
4.3. Riscaldamento....38
4.4. Raffrescamento....41
4.4.1. Cooling Pad....42
4.4.2. Sistema package....42
4.4.3. Fogging....43

4.4.4. Condizionamento dell'aria: sistemi a compressione di vapore 44
4.5. Sistema di ventilazione 48
4.5.1. Ventilazione naturale 49
4.5.2. Ventilazione forzata 50
Capitolo 5. Studio del sistema di climatizzazione di una serra adibita a coltura aeroponica 52
5.1. Descrizione modello modulo di serra di riferimento 52
5.2. Condizioni ambientali interne richieste 54
5.3. Condizioni critiche 54
5.3.1. Osservazioni su gestione di climatizzazione e ventilazione 59
5.4. Descrizione modello impianto di climatizzazione di riferimento 60
5.5. Controllo del clima interno 61
5.5.1. Evapotraspirazione 61
5.5.2. Stagione invernale 63
5.5.3. Stagione estiva 65
5.5.4. Ventilazione controllata 68
5.5.5. Fotovoltaico 69
5.6. Calcolo dei costi di esercizio 72
Capitolo 6. Casi studio 74
6.1. CASO STUDIO 1: serra posizionata in Piemonte 74
6.1.1. Potenza richiesta per riscaldamento 74
6.1.2. Potenza richiesta per raffrescamento 75
6.1.3. Fotovoltaico 78
6.2. CASO STUDIO 2: serra posizionata in Toscana 80
6.2.1. Potenza richiesta per riscaldamento 80
6.2.2. Potenza richiesta per raffrescamento 82
6.2.3. Fotovoltaico 84
6.3. CASO STUDIO 3: serra posizionata in Sicilia 86
6.3.1. Potenza richiesta per riscaldamento 86
6.3.2. Potenza richiesta per raffrescamento 88
6.3.3. Fotovoltaico 90
6.4. Scelta ventilatori di immissione e serrandine regolabili 92
6.4.1. Ventilatori di immissione 93
6.4.2. Ventilatori di estrazione 95
6.4.3. Bocchette di mandata e serrandine regolabili 96
6.4.4. Filtri 97
6.5. Scelta modello pompa di calore 98
6.6. Calcolo dei costi 101
6.7. Confronto 106
6.8. Variazione inclinazione moduli fotovoltaici 109
Capitolo 7. Variazione delle potenze richieste in relazione a modifiche di alcuni parametri 112

7.1. Variazione ombreggiamento....112
7.2. Variazione orientazione serra....114
7.3. Variazione condizioni interne richieste....122
7.4. Variazione materiale di copertura....130
7.5. Variazione potenza moduli fotovoltaici....134
Capitolo 8. Alternativa con sistema idronico....137
8.1. Sistemi idronici e impianti VRF a confronto....137
8.2. Descrizione sistema idronico adottato....140
8.3. Confronto costi sistema VRF e sistema idronico....143
Conclusione....145
Indice delle figure....148
Indice delle tabelle....151
Bibliografia....154

Introduzione

L'innovativa tecnica di coltivazione aeroponica risponde all'esigenza di diminuire l'impatto ambientale legato alle attività agricole, ma allo stesso tempo comporta nuove sfide come l'attenta progettazione della struttura e del suo sistema di climatizzazione, i quali devono garantire le adeguate condizioni climatiche per lo sviluppo delle colture all'interno dell'ambiente protetto.
Le tipologie di serre, i materiali con cui esse vengono realizzate e i sistemi con cui si ottiene il loro ombreggiamento e la loro climatizzazione sono diversi, pertanto una conoscenza generale di questi aspetti può indirizzare nella scelta delle alternative più adatte nel caso specifico della coltura aeroponica.
In particolare, si è individuato, come modello, una serra a padiglione, di piccole dimensioni, priva di aperture e provvista di un sistema di climatizzazione basato sulla tecnologia della pompa di calore VRF e di ventilazione meccanica.
Lo scopo della seguente trattazione è la valutazione delle potenze richieste per il raffrescamento e per il riscaldamento del modello di serra prima citato posto a tre diverse latitudini, che differiscono per le condizioni climatiche esterne, la determinazione dei relativi costi d'esercizio e della producibilità di un eventuale impianto fotovoltaico installato sulla falda sud del tetto della serra stessa.
La tesi si propone, inoltre, di individuare le soluzioni più convenienti dal punto di vista del risparmio energetico attuabili scegliendo opportunamente il materiale di copertura della serra, la sua orientazione spaziale e la percentuale di ombreggiamento.

Capitolo 1. Coltura aeroponica

L'aeroponica è una tecnica di coltivazione a ciclo chiuso, ovvero in cui la sostanza nutritiva viene recuperata, che, diversamente da tutte le altre tipologie di coltivazione, non richiede un substrato nel quale far crescere le piante. Esse vengono nutrite nebulizzando direttamente sulle radici una soluzione di acqua e sostanze nutritive **[1]**.

1.1. L'aeroponica nel tempo

La prima apparizione della tecnica aeroponica avvenne nel 1911, quando V. M. Artsikhovski pubblicò sulla rivista "Experienced Agronomy" l'articolo "On Air Plant Cultures", in cui venne descritto il metodo da lui applicato per studiare la fisiologia delle radici delle piante, nebulizzando varie sostanze nell'aria circostante. Egli progettò il primo sistema aeroponico e dimostrò la sua applicabilità nella coltivazione dei vegetali **[2]**.

Fu F. W. Went nel 1957 a coniare il termine "aeroponica", in relazione ai propri esperimenti sulla crescita di piante di caffè e di pomodori con radici sospese all'interno di un contenitore a tenuta stagna e nutrite grazie ad una nebbia fine di nutrienti nebulizzata da iniettori di atomizzazione **[3]**.

Negli anni precedenti al 1966, i sistemi aeroponici erano utilizzati solo come strumentazione da laboratorio per lo studio della struttura delle radici delle piante **[3]**.

Nel 1983 l'azienda GTi introdusse sul mercato il primo sistema aeroponico commerciale a ciclo chiuso venduto su larga scala. Fu chiamato "Genesis Rooting System". Esso doveva semplicemente essere collegato ad una presa elettrica e a ugelli per la vaporizzazione dell'acqua ed il suo funzionamento era tenuto sotto controllo da numerosi sensori di vario genere **[4]**.

A partire dal nuovo millennio, non sono mancati i brevetti italiani; recentemente l'azienda Agricooltur ha progettato e realizzato il sistema statico Aerosmart e il sistema dinamico Aeromatic.

Aerosmart è costituito da vasche di nebulizzazione connesse tra loro, sulle quali sono disposte le piastre di coltivazione in cui alloggiano le piante. Queste piastre possono essere trasportate sino al luogo di vendita: le piante continuano a crescere fino al momento di essere consumate e, così, conservano le proprietà organolettiche.

Aeromatic è adatto a coltivazioni su più ampia scala: una macchina consente la movimentazione delle piastre di coltivazione verso un'unica vasca di nebulizzazione permettendo alle piante di nutrirsi secondo le proprie esigenze e di automatizzare tutto il processo, dalla semina alla raccolta. Tutto ciò è ottenuto grazie alla presenza di sensori che riconoscono le piante che hanno raggiunto il giusto livello di crescita e fanno in modo che le piastre, sulle quali si trovano tali piante, vengano espulse dal sistema e caricate un carrelli che le portano al luogo di vendita **[5]**.

L'azienda ha, inoltre, brevettato il sistema di conservazione Aerofresh: si tratta di espositori all'interno dei quali dei nebulizzatori continuano a nutrire le piante fino al momento del loro acquisto. L'acquirente deve semplicemente porre la pianta da egli scelta in un contenitore riempito con acqua; questo gli permetterà di consumare il prodotto ancora fresco **[1]**.

1.2. Tecnica di coltivazione

La coltivazione con tecnica aeroponica viene svolta al chiuso, in serre opportunamente attrezzate e climatizzate.
Le piante possono svilupparsi da talee o da piccole piantine poste direttamente in vasi a rete in cui avviene un veloce sviluppo dell'apparato radicale grazie agli alti livelli di ossigeno e di umidità disponibili.
I vasi sono disposti su pannelli che poggiano su una canaletta, la quale sostiene il pannello e isola gli apparati radicali (sospesi) dall'ambiente esterno.

Figura 1: vegetali coltivati in aeroponica [1]

Tramite appositi canali e nebulizzatori, la miscela di acqua e sostanze nutritive viene spruzzata, sotto forma di microscopiche gocce, ad intervalli appositamente studiati, sulle radici.
La programmazione della nebulizzazione può anche essere affidata ad economiche centraline da giardinaggio.
La nebulizzazione consente di migliorare l'assorbimento e l'assimilazione della miscela.

Per la maggior parte delle specie vegetali le dimensioni ideali delle goccioline è compresa tra 20 e 100 micron. Le goccioline più piccole saturano l'aria, mantenendo i livelli di umidità all'interno della camera di crescita, mentre le gocce più grandi creano un maggior contatto con le radici.
Sotto ai 30 micron le gocce tendono a rimanere nell'aria come una nebbia, sopra ai 100 micron tendono a cadere prima di raggiungere le radici e comportano una minore disponibilità di ossigeno per il sistema radicale **[6]**.

È essenziale selezionare il tipo più adatto di ugello atomizzatore in modo da ottenere la dimensione delle gocce di soluzione nutritiva voluta.
Gli ugelli possono avere piccoli o grandi fori, i primi presentano un elevato rischio di otturamento, per evitarlo è richiesto l'utilizzo di filtri; questo problema è inferiore nella seconda tipologia di fori, ma richiedono una maggiore pressione per funzionare in modo corretto.

La soluzione nutritiva viene preparata in un'apposita tanica e viene, poi, spinta nelle canaline grazie ad una elettropompa **[7] [8]**.
Quest'ultima può essere azionata in modo intermittente consentendo un grande risparmio di costi: le pompe utilizzate in aeroponica, infatti, sono molto più potenti rispetto quelle impiegate, ad esempio, in idroponica **[6]**.

La parte di soluzione nutritiva non assorbita viene raccolta, filtrata e, se necessario, disinfestata e riutilizzata **[9]**. Siccome si ha un frequente ricircolo della sostanza nutritiva, è molto

importante misurare i livelli di pH (misura dell'acidità o alcalinità) e di conducibilità elettrica (quantità totale di sali disciolti) della soluzione e correggerli in modo da consentire una soddisfacente crescita delle coltivazioni.

Anche le temperature dell'ambiente interno e della soluzione nutritiva, devono essere tenute sotto controllo; esse, infatti, influenzano sia la crescita iniziale delle piante sia il periodo di raccolta.
Se la temperatura aumenta, i processi chimici procedono a velocità più elevata, comportando un deterioramento dell'attività enzimatica **[10]**.

Ma il parametro più importante per lo sviluppo delle colture è l'umidità: la loro crescita è fortemente influenzata da aumenti o diminuzioni dell'umidità relativa, che possono anche provocare malattie.

Esistono due tipi di sistemi aeroponici: a bassa e ad alta pressione.
La prima tipologia è caratterizzata dalla presenza di una pompa a bassa pressione che spinge la soluzione nutritiva nei tubi di distribuzione sui quali sono applicati gli ugelli.
Il loro principale difetto consiste nel non sempre adeguato apporto di nutrienti; infatti, quando la pianta è diventata matura, potrebbe presentare zone asciutte perchè non irrorate dalle sostanze nutritive. Quindi, di solito, le unità a bassa pressione vengono utilizzate unicamente per spiegare il principio di funzionamento di un sistema aeroponico.
Nel secondo caso, invece, la pompa è ad alta pressione e il dispositivo include anche sistemi per la purificazione dell'acqua e la sterilizzazione della sostanza nutritiva.
L'utilizzo tipico è per coltivazioni di alto valore economico, in grado di compensare gli alti costi di setup associati a questo metodo di orticoltura **[2]**.

1.3. Testimonianze di colture aeroponiche in Italia

Le prime serre adibite a colture aeroponiche sorte in Italia furono installate intorno all'anno 1990 in Sardegna; la tecnologia già sviluppata in Olanda fu trasferita sull'isola senza tener conto delle diverse condizioni ambientali e socio-economiche e, quindi, determinando un sovradimensionamento degli impianti stessi rispetto alle reali esigenze del territorio **[11]**.

Attualmente solo poche aziende hanno una conoscenza consolidata del metodo, alcune lo stanno studiando nell'ottica di implementarlo nei prossimi anni **[12] [13]**.

A Sestu, Cagliari, in Sardegna, nel 2011, furono costruite serre aeroponiche nelle quali venivano coltivati sedano, basilico, pomodori, fragole**[14]**.

In Piemonte, opera l'azienda Agricooltur, in Carignano, Torino. All'interno del suo sito internet vengono pubblicizzati prodotti ortofrutticoli coltivati con tecnica aeroponica, tra cui: diversi tipi di erbe aromatiche (basilico Genovese, basilico rosso, salvia, timo, lavanda e altre), insalate, ortaggi (ravanello, bietola, porro e non solo), frutta e verdura (pomodori, fragole, peperoni) **[1]**.
Anche a Nizza Monferrato vengono coltivate erbe aromatiche e ortaggi con sistema aeroponico **[15]**.

In Campania, in Nola, Napoli, si trova, invece, la Società Agricola Perrotta che coltiva prevalentemente menta, timo e canapa con tecnica aeroponica **[16]**.
Ulteriori testimonianze si trovano in Sicilia, nel ragusano, dove si trova un'azienda agricola che coltiva menta, rucola, insalate, basilico e pomodori **[17]**; per la produzione di basilico sono nate serre aeroponiche sia in Liguria **[18]** sia in Toscana **[19]**. Così come anche in Calabria, in

Stefanaconi, Vibo Valentia **[20]**.
Come si può dedurre dagli esempi di vegetali effettivamente coltivati, uno dei limiti di questa tecnica è l'impossibilità di essere applicata per le colture tradizionalmente estensive come mais, grano, riso e per le tipologie di piante che hanno un grande sviluppo radicale.

1.4.Vantaggi e svantaggi

La coltura aeroponica offre svariati vantaggi.
La coltivazione in ambiente protetto e l'assenza di terreno, nel quale spesso proliferano agenti patogeni che devono essere controllati tramite sterilizzazioni disinfestanti **[9]**, consentono di evitare l'utilizzo di fitofarmaci; inoltre le radici, essendo libere in aria, non comunicano tra loro e quindi il rischio di contaminazione è molto limitato, infatti se una pianta si ammala, non trasmette malattie o batteri alle altre.
I vegetali coltivati in aeroponica mostrano una maggiore resa rispetto quelli ottenuti con tecniche tradizionali e un più alto contenuto di flavonoidi, fenoli e proprietà antiossidanti **[10]**.

Le radici di piante adiacenti non devono competere per l'acqua e per le sostanze nutritive perché esse sono presenti in abbondanza, di conseguenza la densità di piante dipende solo dall'estensione del fogliame (le foglie di piante diverse entrano in competizione per captare la luce) **[21]**.
Inoltre, la pianta matura può essere rimossa facilmente in qualsiasi momento senza creare disturbo per le altre piante **[10]**.

Essendo un processo a ciclo chiuso, si ha un grande risparmio di acqua, fino al 95%, e di sostanze nutritive, tra l'80 e il 90% **[1] [8]**. La tecnica utilizzata, infatti, permette di ottenere un'elevata ossigenazione delle radici che potranno, quindi, crescere velocemente con un quantitativo minimo di acqua e sali minerali. Inoltre l'acqua non captata dalle piante viene recuperata e ri-immessa nel circuito.

Anche l'impatto ambientale è contenuto, in quanto, l'emissione di $\boldsymbol{CO_2}$ è ridotta del 50%, l'inquinamento delle falde acquifere è evitato grazie al ciclo chiuso ed esiste la possibilità di sfruttare suoli non adatti alla coltivazione (le piante sono "sospese") e luoghi caratterizzati da scarsità di acqua ed energia **[1] [8]**.

Un aspetto positivo, dal punto di vista del consumatore, è la disponibilità di prodotti a chilometro zero, infatti, il luogo di coltivazione può essere vicino a quello di consumo.

Dal punto di vista del coltivatore, l'utilizzo dell'aeroponica è importante per la "clonazione" di piante con un basso tasso di successo nella propagazione vegetativa, di piante che hanno importanti usi medicinali o che sono molto richieste dal mercato **[2]**.

Questa tecnica presenta, però anche alcuni svantaggi, che risiedono soprattutto nella maggiore complessità del sistema e nei maggiori costi degli impianti.
Oltre alla necessità di creare un ambiente protetto, vi è quella di utilizzare appositi strumenti per effettuare un monitoraggio costante e preciso di illuminazione, nutrimento, temperatura, umidità, pH. Di conseguenza gli operatori agricoli devono essere specializzati per gestire il sistema di controllo computerizzato.
Tutto questo a fronte di un piccolo margine sul mercato agricolo e della convinzione di molti consumatori che i prodotti dell'aeroponica siano meno nutrienti di quelli provenienti dall'agricoltura tradizionale.

Capitolo 2. Tipologie di serre e materiali di copertura utilizzati

Nel corso del tempo la geometria della struttura serricola si è evoluta e modificata, insieme anche ai materiali con cui essa viene costruita.
In questo capitolo si intende indagare le tipologie di serre oggi maggiormente utilizzate e focalizzare l'attenzione sui materiali usati per realizzare la copertura trasparente.

2.1. Tipologie di serre e dimensioni tipiche

Secondo quanto riportato nella normativa per la progettazione delle serre UNI 13031-1:2004, una struttura può essere definita "serra" se:
-sia adibita alla coltivazione o alla protezione di piante;
-presenta una copertura che permetta l'ingresso della radiazione solare;
-sia possibile controllare la temperatura interna, garantendo le condizioni climatiche richieste;
-le condizioni lavorative al suo interno siano idonee in termini di sicurezza sul lavoro e di dimensioni dello spazio, quest'ultima è garantita da un volume per unità di superficie compreso tra 1,8 e 2 m^3/m^2.

Inoltre, la normativa distingue due classi di serre in relazione alla previsione della vita utile del progetto, a prescindere dai materiali con cui è realizzata la serra.

Tabella 1: classificazione serre in base a normativa UNI 13031-1:2004 **[22]**

Classification [c]	Minimum design working life		
	15 year	10 year	5 year
Class A [a]	A15	A10	-
Class B [b d]	B15	B10	B5

[a] Class A greenhouses shall have a minimum design working life for the structure of either 15 years or 10 years and shall be designated as Class A15 or A10 greenhouse accordingly.
[b] Class B greenhouses shall have a minimum design working life for the structure of 15 years, 10 years or 5 years and shall be designated as Class B15, B10 or B5 greenhouses accordingly.
[c] Greenhouses clad in glass shall have a minimum design working life of not less than 15 years.
[d] Where expensive crops and/or equipment are present in the greenhouse a design working life of at least 10 years is recommended.

Sotto l'aspetto delle soluzioni strutturali e geometriche adottate, le serre possono essere classificate come segue:

- **Serra-tunnel:** presentano una struttura a settore di arco, la copertura è solitamente realizzata in film plastico, sono generalmente strutture mobili. Le sue caratteristiche peculiari sono basso costo e ridotta tecnologia per la climatizzazione;

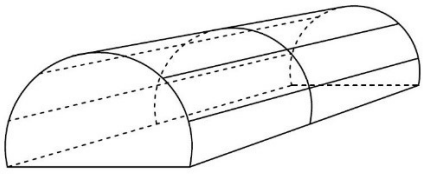


Figura 2: serra tunnel

- **Serre a tetto curvilineo:** presentano un tetto con profilo curvilineo, sorretto da montanti verticali, solitamente la copertura è realizzata con film o lastre di materiale plastico. Nelle pareti e sul tetto sono presenti luci per la ventilazione;

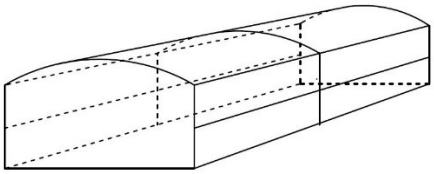


Figura 3: serra a tetto curvilineo

- **Serre con tetto a falde piane simmetriche o asimmetriche**, dette anche "a padiglione": presentano un tetto a falde piane sorretto da pareti verticali, la copertura è realizzata utilizzando lastre in vetro o in materiale plastico. Le aperture per la circolazione dell'aria sono posizionate lungo i lati e al colmo. In questa tipologia rientrano le serre Venlo: colonne verticali e una trave orizzontale costituiscono la struttura portante primaria, sul cui estradosso poggia quella secondaria del tetto; generalmente la copertura è realizzata in vetro.

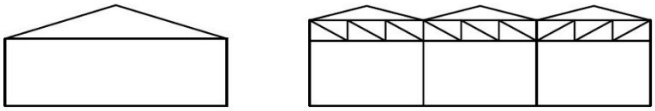


Figura 4: serre a padiglione e serre Venlo

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva che mostra le dimensioni tipiche di queste tipologie di serre:

Tabella 2: dimensioni delle più comuni tipologie di serre **[23]**

	Serra-tunnel	Serre a tetto curvilineo	Serre a padiglione doppia falda
Luce campata [m]	6,40-16,00	6,40-9,00	6,00-7,00/8,50-9,00
Modulo strutturale [m]	3,00-3,10/3,72-3,85	1,50/3,00/4,00	1,50/2,00/2,50
Lunghezza [m]	60,00-100,00	30,00/42,00	30,00-42,00-61,50/100,00
Altezza di gronda [m]	2,00/3,00	2,00/3,00	-
Altezza di colmo [m]	3,50/6,00	3,00/5,00	2,80/3,30
Inclinazione falde [°]	21°-30°	-	-
Totale [m²]	380-1600	190-380	180-1000

Dal punto di vista tecnologico si distinguono:

-**Serre a bassa tecnologia (LTG):** le caratteristiche principali sono struttura semplice, copertura in materiale plastico, quasi totale assenza di sistemi di controllo delle condizioni climatiche interne e di riscaldamento;

-Serre a media tecnologia (MTG): presentano una struttura in metallo che sorregge una copertura in lastre di materiale plastico o vetro, è presente il controllo climatico;

-Serre ad alta tecnologia (HTG): solitamente sono realizzate in ferro zincato e, come materiale di copertura, è utilizzato il vetro, le condizioni climatiche interne sono controllate e sono presenti impianti di climatizzazione.

2.2. Struttura portante

Attualmente, i materiali più impiegati nella costruzione delle strutture portanti delle serre di produzione sono ferro zincato, leghe di alluminio e acciaio.
Il primo ha elevata conducibilità termica, ma consente una buona coibentazione, grazie alla possibilità di avere uno stretto collegamento tra copertura e struttura, ed è utilizzato in serre di grandi dimensioni.
L'allumino, invece, è molto costoso ed utilizzato soprattutto nei profili porta-vetro.
Infine, l'acciaio, possiede proprietà analoghe al ferro zincato, ma è più costoso e ha una durata maggiore **[24]**.

Questi materiali, a differenza del legno e del cemento, molto diffusi in passato, permettono di ottenere sezioni ridotte e, quindi, maggiore spazio utile e luminosità.
Caratteristiche di una buona struttura portante sono leggerezza, ridotta superficie ombreggiante e resistenza adeguata per sorreggere la copertura della serra, resistere alle sollecitazioni dovute al vento e ai carichi accidentali.

2.3. Fondazioni

Le serre, in particolar modo quelle permanenti, devono essere dotate di fondazioni che le conferiscano stabilità e le isolino dal contatto diretto con il terreno, contribuendo a ridurre le dispersioni di calore.

La scelta della tipologia di fondazione deve essere fatta principalmente in base alle caratteristiche del terreno, alle dimensioni della serra e alle condizioni climatiche.
Nel caso di serre non temporanee, sono di tipo superficiale e possono essere continue, in calcestruzzo armato, oppure discontinue, costituite da plinti isolati **[25]**.

2.4. Elementi trasparenti utilizzabili per la copertura: caratteristiche tecniche e costi

La tipologia di materiale utilizzato per realizzare la copertura condiziona fortemente le condizioni climatiche che si instaurano all'interno della serra; infatti le caratteristiche fisiche, ottiche e meccaniche dei diversi materiali influenzano la quantità di radiazione solare e il modo con cui essa si trasmette all'interno.
Inoltre, la copertura fornisce protezione meccanica dagli agenti esterni e crea "l'effetto serra".

2.4.1. L'effetto serra

La radiazione solare, che giunge sulla superficie terrestre, è composta da onde elettromagnetiche, ciascuna caratterizzata da una determinata lunghezza d'onda.
Questa grandezza fisica è definita come il rapporto tra la velocità dell'onda, che dipende dalle proprietà del mezzo in cui essa si propaga, e la frequenza (numero di oscillazioni che l'onda elettromagnetica compie in un secondo) $\boldsymbol{\lambda = v/f}$.

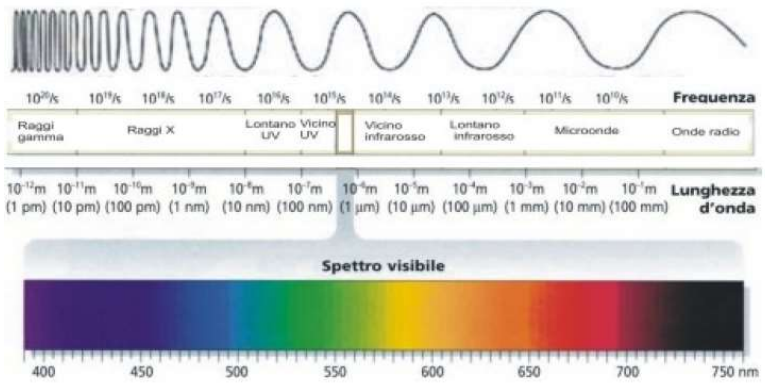


Figura 5: Composizione radiazione solare [26]

Riferendosi ai processi che avvengono all'interno di una serra, di particolare interesse sono quelle bande di lunghezze d'onda che generano il cosiddetto "effetto serra":

- la PAR, Photosynthetically Active Radiation, che rende possibile la fotosintesi (lunghezze d'onda tra i 380 nm e i 710 nm) e viene misurata in μmol/(s·m²);
- l'infrarosso.

La serra acquisisce il calore, che penetra attraverso la copertura, per irraggiamento solare nelle lunghezze d'onda comprese tra 350 e 2500 nm e cede il calore che viene re-irraggiato nelle lunghezze d'onda comprese tra 2500 e 35000 nm, ovvero l'infrarosso "lungo", costituito da onde fortemente calorifiche.
Si può, quindi, affermare che l'effetto serra sarà tanto più elevato quanto maggiore sarà la capacità della copertura della serra di far passare le radiazioni del visibile e infrarosse "corte" e di essere impermeabile alle radiazioni infrarosse "lunghe" **[27] [28]**.

L'incidenza delle radiazioni di interesse, viene massimizzata grazie all'impiego di materiali di copertura più trasparenti possibili, quali il vetro e alcuni materiali plastici in film o in lastre **[29]**.

Vengono impiegati principalmente materiali plastici, la cui forma, dimensione e le caratteristiche qualitative sono indicate nella normativa UNI 10452 o vetro, la normativa di riferimento in questo caso è la UNI 13031-1:2020.

2.4.2. Vetro

In passato, il vetro, era il materiale più utilizzato nella costruzione delle serre.
I suoi principali pregi sono l'elevata trasparenza, la capacità di creare l'effetto serra e il fatto che il vetro permetta la trasmissione delle lunghezze d'onda più utili per il processo fotosintetico **[30]**.
Per contro, però, è un materiale molto costoso e pesante, tale da richiedere strutture portanti più resistenti e quindi ulteriori maggiori costi.

Esistono diverse tipologie di vetro che sono state e continuano ad essere impiegate per realizzare la copertura delle serre:

-**vetro float**: è il tipo di vetro piatto più diffuso, tende a rompersi in frammenti taglienti, per questo motivo è considerato pericoloso. Se impiegato nella copertura delle serre assume spessore di 4mm, solitamente **[31]**;

-**vetro temperato**: viene ottenuto per indurimento tramite un opportuno trattamento termico. Questo processo permette di ottenere un vetro più resistente alla rottura e allo shock termico. Gli spessori tipicamente adottati variano da 3 a 16 mm **[31] [32]**;

-**vetro camera**, detto anche **vetro isolante**: è formato da due o tre lastre di vetro separate da intercapedini riempite con un gas (ad esempio, aria o argon). Presentano spessori variabili tra 17 e 20 mm;

-**vetro stratificato:** è costituito da due lastre incollate grazie ad una speciale pellicola che lo rende più resistente.

-**vetro basso emissivo**: grazie agli ossidi metallici con cui viene trattata una delle due superfici della lastra, esso blocca la radiazione solare infrarossa, responsabile del trasferimento di calore, evitando il surriscaldamento degli ambienti interni (in questo caso si può usare anche il termine "vetro selettivo") e, allo stesso tempo, impedisce la dispersione di calore verso l'esterno. Può raggiungere valori di trasmittanza termica di 1 W/$(m^2 \cdot K)$ **[33] [34]**;

-**vetro diffusivo:** recenti studi olandesi hanno messo in mostra l'effetto benefico della luce diffusa sulla crescita delle piante, che risultano meno "stressate". In tal senso assumono particolare interesse i "vetri diffusivi" che, interagendo con la radiazione solare, fanno in modo che sulle piante non si creino zone d'ombra e zone fortemente irradiate. I costi sono, però, maggiori dei vetri piani normali e, per questo motivo, non sono ancora molto diffusi **[35] [32]**.

Oggigiorno, il vetro temperato è la tipologia più utilizzata, per ragioni economiche e di sicurezza. È utilizzato anche il vetro basso emissivo, i cui costi, però, sono spesso proibitivi; mentre, ad esempio, il vetrocamera non trova larga applicazione, principalmente a causa del costo elevato.

Esperti affermano che il vetro, in generale, sia adatto alle serre di produzione solo se abbinato a pannelli fotovoltaici con, inoltre, un trattamento per aumentare la diffusione della luce **[36]**.

2.4.3. Materie plastiche

Negli ultimi anni, le classiche coperture in vetro sono state affiancate (e saranno progressivamente sostituite) da nuovi materiali plastici sotto forma di lastre e di teli **[36]**.

Film plastici

Sono usati principalmente come copertura delle serre-tunnel.
Tendono a perdere le loro caratteristiche meccaniche e ottiche nel tempo a causa della combinazione delle azioni dovute a temperatura, raggi UV e ossigeno, che causano termossidazione e foto ossidazione, è dunque, necessario addittivarli con opportune sostanze stabilizzanti.
Si deve, inoltre, evidenziare che un aumento dello spessore del film, ne prolunga la durata nel tempo.

I teli in film plastico possono essere realizzati in:

-**cloruro di polivinile (PVC):** genera un effetto serra maggiore rispetto al polietilene, infatti presenta una trasparenza alla radiazione infrarossa lunga del 32% e a quella corta del 90%; però, ha

una scarsa resistenza a rottura, si deforma facilmente e, se la serra non è ventilata in modo opportuno, può provocare un eccessivo innalzamento delle temperature;

-**polietilene (PE)**: usato principalmente per le serre-tunnel di fascia bassa, a livello amatoriale. È caratterizzato da basso costo, consente una copertura rapida e facile delle serre, in quanto è venduto in strisce molto lunghe, presenta caratteristiche meccaniche e fisiche migliori del PVC e ha buone proprietà ottiche. Allo stesso tempo, però, degrada facilmente a causa della sua ipersensibilità ai raggi UV e disperde molto il calore;

-etilene vinil acetato (EVA): resiste bene all'invecchiamento, crea un ottimo effetto serra, si deforma meno rispetto al PVC, ha buone proprietà meccaniche, ottiche e anti-condensa, ma è più costoso **[37]**;

-sono stati realizzati anche **teli fotoselettivi**: sono materiali innovativi e ancora troppo costosi per essere applicati nelle serre di produzione; hanno la peculiarità di selezionare le lunghezze d'onda che favoriscono la fotosintesi. Permettono, inoltre, di controllare le popolazioni di parassiti **[36] [35]**.

Policarbonato

Usato sia per serre-tunnel, sia per serre a doppia falda.
Presenta un'ottima trasparenza alla radiazione luminosa visibile, elevata resistenza all'impatto, leggerezza, elevate proprietà meccaniche e d'isolamento termico.

In commercio, si trova sotto forma di:

-lastre ondulate: da normativa UNI 10452 viene definita lastra ondulata quell'elemento la cui sezione trasversale è costituita da ondulazioni approssimativamente sinusoidali tali da rafforzare la struttura dell'elemento stesso.
Possono essere eseguiti trattamenti che le proteggano dall'invecchiamento, causato dai raggi UV, e trattamenti anti-condensa.

-lastre in policarbonato alveolare: da normativa UNI 10452 viene definita lastra alveolare (o lastra a pareti multiple) quell'elemento costituito da due pareti parallele esterne collegate tra loro da costolature interne; inoltre, tra le pareti esterne possono essere posizionate una o più pareti sottili interne.
Tale struttura consente di ottenere un ottimo isolamento termico e elevata resistenza agli urti. Possono anche essere realizzati con una protezione UV sul lato esterno, essa conferisce maggiore resistenza all'invecchiamento **[38]**.

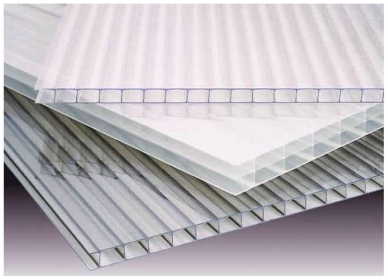


Figura 6: lastre in policarbonato alveolare **[39]**

Polimetacrilato di metile (PMMA)

In commercio si trovano lastre nella versione ondulata o alveolare con lunga durata.

Il PMMA presenta un'elevata trasmissione della luce solare diretta ed è opaco all'infrarosso lungo, questo crea un effetto serra maggiore rispetto a quello ottenibile usando lastre di policarbonato, inoltre è inerte nei confronti degli agenti atmosferici, è leggero e ha una bassa conducibilità termica **[24]**.

Vetroresina

Le lastre in vetroresina sono costituite da resina e fibra di vetro con funzione rinforzante; hanno buone proprietà meccaniche, durata maggiore rispetto ai film plastici, costo inferiore rispetto al vetro e consentono un'ottima trasmissione della luce.
Sul mercato si trovano prodotti che resistono alle escursioni termiche da -40 a +120 °C e che, grazie ad opportuni trattamenti, non ingialliscono come la tradizionale vetroresina e garantisco un passaggio della luce diretta del 90% e di quella diffusa del 80% **[36]**.

2.4.4. Tabella di confronto caratteristiche tecniche e costi

La seguente tabella riassume le principali caratteristiche dei materiali utilizzati per le coperture delle serre. I costi sono stati calcolati come media dei valori riportati sui prezziari delle regioni Sardegna, Abruzzo, Emilia Romagna, Puglia, Sicilia e Lazio, in quanto non è stato possibile reperire tale informazione nelle schede tecniche dei materiali in commercio.

Tabella 3: caratteristiche tecniche e costi dei materiali per copertura **[24] [27] [36] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48]**

	Trasmittanza [W/m^2K]	TRASPARENZA [%]			Peso [kg/m^2]	Durata [anni]	Prezzo medio [€/m^2]
		Radiazione visibile diretta	Radiazione visibile diffusa	Infrarosso lungo			
Vetro 4 mm	5,8	89	91	1	11,5	-	8,66
Vetro temprato 3-16 mm	5,3-3	81-91	81-91	-	10-37	-	11,78-16
Vetro camera 24 mm	2,8-1	80	12	12	20		35
Vetro stratificato 3+3 mm	4,5	90	-	-	16	-	35-36
Film plastico di polietilene per ogni 0,01 mm di spessore	15,6-7,5	91	40	79	0,21	3-4	0,8
Film plastico in PVC 0,1-0,2 mm	10,7-5,5	92	91	60	0,12	3-4	-
Film plastico in EVA 0,1-0,2 mm	12,6-6,8	92	76	39	-	3-4	4,5-14 [€/m]
Lastre di PMMA ondulate 0,5-2,3 mm	7	92	-	0	2-3	7-8	-
Lastre di PMMA alveolari 16 mm	2,9-5,9	83	70	0	5	15	-
Lastre in vetroresina trattata serre tipo Faylon 1mm	5,65	90	80	4	-	-	7
Lastre di PVC ondulato 1mm	6	79	-	5	1,45	10	10
Lastre di policarbonato ondulato in lastre 1 mm	5,7	89	Circa 20	-	1,2	10	9,38
Lastre di policarbonato alveolare spessore 8 mm	3,3	79	Circa 20	-	1,55	10	15,12
Lastre di policarbonato alveolare spessore 10 mm	2,5	70	Circa 20	-	1,75	10	18,48
Lastre di policarbonato alveolare spessore 16 mm	1,8	63	Circa 20	-	2,8	10	21,613

2.4.5. Conclusione

Sebbene il vetro garantisca le prestazioni migliori dal punto di vista delle qualità ottiche e della durata (una durata maggiore comporta anche minore produzione di rifiuti e, quindi, minore impatto sull'ambiente), spesso il suo utilizzo non è giustificato nella realizzazione della copertura delle serre di produzione, in particolare per i suoi elevati costi.

Di conseguenza, la maggior parte delle coperture, viene oggi realizzata con materiali plastici, sia in forma di film, per le serre più semplici, sia in lastre rigide. I loro principali vantaggi risiedono nella facilità d'istallazione, nell'economicità e leggerezza.
Purtroppo questa scelta comporta anche degli svantaggi, soprattutto per i film:
- facile degradazione, con conseguente ingiallimento e riduzione della luce trasmessa;
- usura;
- tendenza alla formazione di condensa.

L'effetto della condensa ha un grande impatto sulla quantità di luce che entra all'interno della serra. In inverno, il materiale di copertura è sempre coperto di condensa. La combinazione del materiale di copertura con un qualsiasi tipo di rivestimento determina il modo in cui l'acqua si condensa: un tetto idrofobico provoca la formazione di grandi gocce d'acqua che sfavoriscono la penetrazione della luce, al contrario, su un tetto idrofilo si genera una sorta di pellicola di acqua che migliora la penetrazione della luce di circa 1-2% rispetto alla copertura asciutta **[49]**.

Infine, un aspetto di solito sottovalutato, è la necessità di mantenere la superficie della copertura della serra pulita, sia all'interno che all'esterno. Ciò può fare la differenza di anche il 10% di penetrazione della luce.

2.5. Serre adibite a colture aeroponiche

Nel caso specifico di serre adibite a colture aeroponiche è innanzitutto essenziale adottare serre completamente chiuse, senza aperture, in modo da evitare ogni possibile contaminazione da agenti esterni. Questa configurazione presenta anche il vantaggio di poter realizzare un controllo più accurato delle condizioni climatiche interne, che si traduce in una migliore resa delle coltivazioni.
La richiesta termica invernale risulta minore rispetto a quella delle serre convenzionali, mentre la richiesta di raffrescamento risulta superiore **[50]**.

Per quanto riguarda la geometria della serra e il grado di avanzamento tecnologico, la tipologia di serra più adatta è a padiglione e a media tecnologia.
Solitamente non superano i 4 m di altezza in modo da ottenere un volume totale di aria interna, che dovrà essere climatizzata, ridotto.

Dal confronto tra i diversi tipi di materiali più comunemente usati per la realizzazione delle serre, quello che meglio risponde alle esigenze delle serre aeroponiche in termini di costi non eccessivi e buon isolamento termico, risulta essere il policarbonato in lastre alveolari.
Le lastre in vetro, pur assicurando bassi valori di trasmittanza, presentano costi troppo elevati, legati anche alla necessità di realizzare strutture portanti adeguate a sopportare il peso specifico del vetro, molto superiore rispetto a quello dei materiali plastici.
Le lastre ondulate in policarbonato, pur avendo costi ridotti, presentano valori di trasmittanza troppo elevanti; questo comporterebbe la necessità di installare un impianto di climatizzazione molto potente e costoso.

Capitolo 3. Sistemi di ombreggiatura

Ombreggiare una serra è un valido metodo in grado di realizzare un ambiente adatto alla crescita delle piante ottimizzandone la qualità e la quantità prodotta, soprattutto nelle regioni più calde e soleggiate **[51]**.

Il sistema di ombreggiatura ha diversi effetti:
-protegge le colture dall'irraggiamento da infrarosso e dal conseguente eccessivo innalzamento di temperatura nei mesi più caldi: le piante, infatti, devono ricevere la quantità ottimale di luce solare durante il giorno, ma se l'ingresso di luce è accompagnato da un eccessivo ingresso di calore, l'elevata temperatura che si viene a generare rischia di danneggiarle;
-durante la notte, permette di trattenere all'interno della serra il calore accumulato durante il giorno **[52]**;
-controlla l'ingresso degli insetti dalle aperture nella copertura, in modo da poter diminuire l'uso di pesticidi, riducendo, però, la capacità ventilante delle aperture stesse **[53]**.

I diversi sistemi offrono svariati valori di ombreggiamento dal 10 anche al 90%; si deve, però, sottolineare che questi valori siano generici, valutati sull'interno spettro della luce, e non diano informazioni sul modo in cui ciascuna lunghezza d'onda venga attenuata. Questa informazione sarebbe molto utile in quanto lunghezze d'onda diverse (PAR, infrarosso vicino, infrarosso lontano, ultravioletto) hanno effetti diversi sulle coltivazioni e sull'ambiente protetto **[54]**.

Il sistema di ombreggiamento più appropriato a seconda dell'esigenza, deve essere scelto innanzitutto in relazione alla latitudine alla quale è installata la serra e alla quantità di radiazione solare richiesta dalle piante coltivante in essa.
Le condizioni climatiche sono molto divere tra nord, centro e sud Italia.
Se si vuole avere un ciclo produttivo continuo tutto l'anno, tutte le colture richiedono ombreggiamento a partire dal mese di maggio.
La percentuale di ombreggiamento dipende dal tipo di pianta **[55]**:
-le solanaceae, come pomodoro e peperone, richiedono molta luce, quindi è sufficiente un ombreggiamento del 30-40-50%;
-le baby leaf (lattuga, spinacino, rucola), che hanno bisogno di poca luce, possono essere ombreggiate fino all'80-85% al sud (in realtà, però, alle basse latitudini può non essere conveniente coltivare durante il periodo estivo) e 40-60% al nord.

Ogni coltura, infatti, necessita, per poter crescere e svilupparsi in modo ottimale, di un determinato apporto di radiazione luminosa. In tabella sono riportati i valori consigliati per alcuni tipi di colture:

Tabella 4: valori di radiazione luminosa consigliati per diversi tipi di specie vegetali **[23]**

Illuminamento consigliato [µmol/(s·m²)]	
Lattuga	250-450
Fragola	250-450
Pomodoro	450-750

Il µmol/s è l'unità di misura del flusso luminoso per la ortofloricoltura. Quindi il µmol/(s·m²) è l'unità di misura dell'illuminamento.
Il flusso luminoso è la quantità di energia luminosa emessa, in tutte le direzioni, da una sorgente nell'unità di tempo.

L'illuminamento è il rapporto tra il flusso luminoso incidente su una superficie elementare e l'area della superficie stessa **[26]**.

1 $\frac{\mu mol}{s \cdot m^2}$ corrisponde a 0,21 $\frac{W}{m^2}$ **[56]**.

Secondo quanto afferma il Sig. Régis Benoist, gestore di Benoist Horticulture a Faremoutiers, in Francia, l'obbiettivo da perseguire è il massimo livello di luminosità accompagnato da un non eccessivo ingresso di calore. Questo si potrebbe ottenere se si riuscisse a massimizzare il passaggio delle onde PAR, diminuendo quello delle onde dell'infrarosso vicino.
Egli continua dicendo che il sistema di ombreggiatura contribuisca anche alla creazione di una luce diffusa sulla coltura, condizione ottimale per il suo sviluppo.

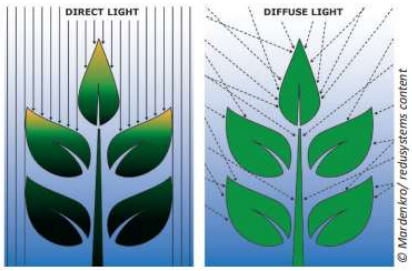


Figura 7: effetto di luce diretta e di luce diffusa sulle piante **[57]**

Tuttavia, l'utilizzo di un sistema di ombreggiatura fisso, come vernice bianca, potrebbe causare una riduzione di resa circa proporzionale alla riduzione di radiazione **[58]**.
Una soluzione potrebbe essere la rimozione tempestiva delle vernici, metodo poco flessibile e molto dispendioso in termini di tempo, oppure l'adozione di teli mobili comandati manualmente o per mezzo di un sistema automatico impostato sul controllo della radiazione luminosa e della temperatura (metodo più costoso) **[59]**.

Apposite centraline di controllo gestiscono l'apertura e chiusura dei sistemi ombreggianti in funzione della luminosità e della temperatura volute **[60]**.

3.1. Tipologie di sistemi di ombreggiamento

I metodi con cui si può ottenere l'ombreggiatura sono vari; ad esempio, l'uso di vernici, teli ombreggianti parzialmente riflettenti (posizionati internamente o all'esterno), reti, film d'acqua sopra il tetto fino ad arrivare ai pannelli fotovoltaici **[53]**.
Essi possono ricoprire la serra nella sua interezza o essere posizionati solo sul tetto, in modo che i raggi ultravioletti entrino tramite le pareti laterali.

3.1.1. Teli ombreggianti

I teli ombreggianti vengono utilizzati sia in inverno sia in estate: nel primo caso lo scopo è ridurre le perdite di calore durante la notte creando una camera d'aria tra telo e copertura (che ha funzione di isolante termico) e diminuendo le perdite di calore per irraggiamento verso la volta celeste; nel secondo caso l'obiettivo è ombreggiare la serra. In generale ciò che si intende ottenere è la diminuzione dell'energia richiesta per il riscaldamento e per il raffrescamento.

Si tratta di tessuti prevalentemente di tipo magliato (tipo Raschel): presentano fili di ordito

avvolti a formare “catenelle” che andranno ad intrecciare ed inglobare i fili di trama, sono molto elastici e indemagliabili **[61]**.
Possono essere monofilo oppure misti con bandelle e monofilo.
La scelta dipende dall’applicazione: se l’obiettivo è il solo ombreggiamento si possono usare tessiture monofilo nere che si limitano a tagliare la luce, se l’esigenza fosse ombreggiare ed abbattere la temperatura, converrebbe usare teli Raschel in bandella.
L’azienda Arrigoni S.p.a., ne propone una realizzata con una bandella in polietilene ad alta densità: questo materiale è molto più resistente rispetto agli altri utilizzati in tessitura e può essere trattato con particolari additivi, che gli conferiscono la capacità di lasciarsi attraversare da parte della luce incidente, diffondendola.
Quindi è in grado di ombreggiare, migliorare la qualità della luce all’interno della serra e abbassare la temperatura, sia grazie al colore chiaro del telo (trattiene poco calore) sia agli additivi che riflettono la radiazione infrarossa che porta calore.
Si ricorda, infatti, che i colori scuri ombreggiano, ma non permettono alla luce di attraversare il tessuto. Se si vuole ottenere un parziale passaggio di luce, si devono utilizzare reti trattate con coloranti chiari.
A seconda del colore dello schermo, le lunghezze d’onda dello spettro solare che penetrano nella serra sono diverse; questo si traduce nella differente “qualità” della luce entrante **[51]**.

Un esempio riportato dall’Azienda Arrigoni riguardante l’effetto dei loro teli, è quello del pomodoro ombreggiato con lo schermo termo-riflettente di loro produzione, modello 2633BL PRISMA LDF (tessuto Raschel in bandella): esso permette di ottenere un abbattimento della temperatura di circa 8°C.

La durata del telo non dipende dalla tipologia di tessitura, ma dalla stabilizzazione UV e dallo spessore del filo: teli neri, ovvero trattati con Carbon Black, durano di più proprio grazie a questo additivo che è molto più resistente agli UV rispetto ai coloranti usati negli schermi chiari **[62]**.

Di particolare interesse, nell’ottica di ottenere un’illuminazione uniforme delle colture, sono gli schermi termo-riflettenti, provvisti di trattamento Light Diffusion (LD) che, a differenza dei teli tradizionali, i quali lasciano passare luce diretta in modo non selettivo, permettono il passaggio solo di determinate radiazioni, diffondendole.
Sempre l’azienda Arrigoni ha messo a confronto l’effetto sulla luce di un telo PRISMA con trattamento LD e uno privo di LD:

Tabella 5: confronto tra telo con LD e senza LD **[63]**

Radiazione	PRISMA HDF con trattamento LD			Telo senza LD		
	Totale [%]	Diretta [%]	Diffusa [%]	Totale [%]	Diretta [%]	Diffusa [%]
Solare 200-2500nm	41	13	28	33.1	14.7	18.4
PAR 400-700 nm	35.3	9.5	25.7	26.2	10.2	16
IR Solare 760-2500 nm	48.5	17.1	31.5	42	20	21.9
UV 280-380	16.5	8.8	7.8	10.6	10.1	0.4
UVA 320-380 nm	16.5	8.8	7.7	10.6	10.1	0.4
UVB 280-320 nm	17.4	8.9	8.6	10.6	10.2	0.5
IR lungo 7500-12500 nm		43			60.4	

La tabella mette in evidenza il fatto che la PAR, Radiazione Fotosinteticamente attiva, grazie al trattamento LD, venga maggiormente diffusa, rispetto a quanto viene fatto da un telo senza LD, così come avviene anche per tutte le altre componenti della radiazione luminosa.
Anche la luce ultravioletta viene diffusa in gran parte, essa è molto importante per le piante perché stimola, ad esempio, la produzione di polifenoli (antiossidanti).

In conclusione, gli schermi in grado di diffondere la luce, oltre a contribuire al raffrescamento della serra, incrementano la quantità di PAR disponibile per la pianta, consentono una maggiore fotosintesi, riflettono l'infrarosso corto, responsabile delle bruciature sulle piante, e migliorano la qualità delle piante.

Un'altra azienda produttrice di teli ombreggianti per serre è Polyplants, essa propone anche schermi provvisti di trattamento Flame Protect **[39] [64]**, ad esempio teli:
-a bandelle trasparenti alternate a bandelle di alluminio con filo acrilico anti-condensa che garantiscono un ombreggio del 55% e un risparmio energetico del 58%, per lo più usati nelle serre adibite alle coltivazioni floricole in vaso;
-schermi detti ad oscuramento totale (ombreggio 96%, risparmio energetico 40%), adatti ad essere installati all'interno delle serre:
-schermi per pareti laterali, accoppiati con un film protettivo contro i raggio UV, che ne aumenta la resistenza all'usura, la durata e facilita l'arrotolamento (ombreggiamento 59% e risparmio energetico 65%).

Gli schermi possono essere fissi o mobili, in quest'ultimo caso, viene adottato un sistema automatico composto da una sonda di luminosità e da una centralina elettronica in cui viene impostato il valore di lux o micromoli di fotoni che si vuole ottenere sulla pianta; quando la luce solare supera un certo limite, il sistema lo rileva e apre il telo.
Questo sistema può mantenere arrotolato il telo durante la mattina per ricevere quanta più luce possibile, aprirlo durante le ore più calde e ri-arrotolarlo la sera.
È un metodo molto flessibile, ma poco diffuso a causa del suo costo elevato.

Inoltre, i teli possono essere installati sia all'interno sia all'esterno della serra: nel primo caso, la radiazione solare riesce ad attraversare la copertura trasparente della serra e a scaldarne l'interno, i teli potrebbero ostacolare la ventilazione naturale e aumentare la radiazione termica emessa in serra a causa della loro propria emissione termica.
Invece, l'installazione esterna è in grado di aumentare l'efficienza del raffreddamento, a fronte, però, di costi maggiori e di una maggiore complessità di installazione **[65]**; questa sarebbe la soluzione più efficiente, ma la difficoltà di montaggio porta a preferire i teli installati all'interno della serra **[66]**.

3.1.2. Reti ombreggianti

Le reti ombreggianti sono il sistema di ombreggiamento più diffuso dopo le vernici, grazie al loro costo non elevato e alla semplicità di installazione. Esse presentano la stessa struttura dei teli, ad esempio le reti monofilo sono ottenute dalla sovrapposizione ortogonale di fili di trama e fili di ordito che garantiscono rigidità e stabilità, ma la tipologia di fili utilizzata è diversa e le maglie sono meno fitte. Inoltre dovrebbero essere installate all'esterno della serra, non all'interno, per evitare che, nei momenti più caldi, la loro emissione termica aumenti i livelli di radiazione termica e di temperatura nella serra (questo problema non si verifica quando la temperatura dell'aria è bassa) **[51]**.

Il materiale più utilizzato per la realizzazione delle reti ombreggianti è il polietilene ad alta densità stabilizzato contro i raggi UV, esso infatti è molto resistente alla rottura e all'usura **[67]** e può anche subire un trattamento alluminizzato per creare maggiore rifrazione e un maggiore effetto di luce diffusa al di sotto della rete **[62]**.

A seconda della finezza delle maglie delle reti, esse possono offrire diversi gradi di ombreggiamento, il sito dell'azienda Polyplants propone, ad esempio, reti in polietilene ad alta densità (PEHD) stabilizzato UV e Carbon Black, che garantiscono un'ombra che può andare dal 30% al 90%.

Figura 8: Rete ombreggiante 30% **[68]**

3.1.3. Vernici ombreggianti

L'utilizzo di vernici ombreggianti è il metodo più tradizionale utilizzato per migliorare il microclima della serra e diminuire la quantità di radiazione solare entrante.
La gamma di tali vernici varia dalla semplice pittura bianca in calce (ossido di calcio, $Ca(OH)_2$ o carbonato di calcio, $CaCO_3$, mescolati con acqua) a prodotti specifici.
È bene conoscere la composizione della pittura e preferire sostanze naturali (calce, gesso) al posto di prodotti a base di polimeri sintetici in modo da non rilasciare sostanze inquinanti nell'ambiente nel momento della rimozione della vernice **[69]**.
L'operazione da svolgere consiste nel colorare la superficie di copertura della serra, con un numero di passate proporzionali alla percentuale di ombreggiamento che si vuole ottenere: 1, 2 o 3 passate in modo da ottenere il 10, poi 30, poi 50 poi 70% di oscuramento a seconda dell'esigenza.
Spesso la verniciatura deve essere riapplicata perché eventi atmosferici estremi, come temporali, possono asportarla.
In ogni caso, durante il periodo invernale, è necessario provvedere alla sua rimozione.

Tra i prodotti che si trovano attualmente in commercio vi sono, ad esempio, "OMBRASER SPECIAL", di Polyplants: è utilizzabile su tutti i tipi di coperture, biodegradabile al 100%, dopo essersi essiccato è molto resistente alla pioggia e ha un ottimo potere coprente. Esso riflette e rinfresca nelle giornate soleggiate ma diventa trasparente quando il cielo è nuvoloso. Non è necessario provvedere alla sua rimozione perché degrada spontaneamente con le piogge autunnali **[70]**. Ma in caso lo si volesse rimuovere anticipatamente, si può fare ricorso al prodotto OMBRANET.

3.2. Possibilità di applicare pannelli fotovoltaici per realizzare una parziale schermatura

L'energia solare intercettata dai vari sistemi di ombreggiamento viene riflessa e, quindi, non può essere utilizzata.
Siccome si tratta di una quantità di energia non trascurabile, si è pensato che fosse utile sfruttarla, applicando dispositivi in grado di captarla e di convertirla in energia elettrica: le celle fotovoltaiche.

In Italia, grazie in particolare alle tariffe incentivanti messe a disposizione dal GSE e dalle forme di incentivazione contenute in Piani di Sviluppo Rurale regionali, nel biennio 2009-2010, sono stati effettuati molti studi relativi alla possibilità di installare moduli fotovoltaici sulle falde del tetto delle serre agricole. Essi, però, non sono stati accompagnati da un lavoro di indagine dei limiti e dei problemi che l'utilizzo del fotovoltaico potrebbe comportare **[71]**.

3.2.1. La radiazione solare

Il Sole può essere considerato come un corpo nero, ovvero un emettitore ideale di radiazione elettromagnetica che ha una distribuzione spettrale dall'ultravioletto all'infrarosso.
Viene definita costante solare la densità di potenza relativa alla superficie unitaria, che si trova al di fuori dell'atmosfera, perpendicolare alla direzione di incidenza del raggio solare ed è pari a 1367 W/m^2.
La radiazione globale che raggiunge la superficie terrestre è composta da tre contributi:
-la radiazione diretta: è la quota di radiazione extra-atmosferica che raggiunge la superficie in linea retta;
-la radiazione diffusa: è la quota di radiazione extra-atmosferica che viene dispersa;
-l'albedo: quota di radiazione che raggiunge un ricevitore dopo essere stata riflessa dalla superficie terrestre.
Le percentuali di radiazione diretta e diffusa dipendono dalle condizioni metereologiche: se il cielo è limpido la componente diffusa di solito non supera il 20% del totale, mentre è preponderante se il cielo è coperto.

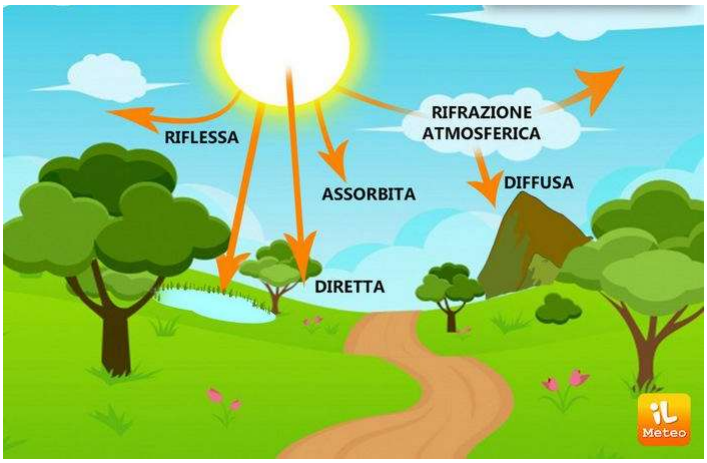


Figura 9: suddivisione della radiazione solare attraverso l'atmosfera **[72]**

La quantità di radiazione che raggiunge la superficie terrestre varia durante l'arco della giornata ed è minore rispetto quella che incide sull'atmosfera.
Essa, infatti, viene in parte riflessa verso lo spazio, in parte assorbita dagli elementi che costituiscono l'atmosfera e in parte diffusa (scattering) a causa degli urti delle onde elettromagnetiche con le molecole dell'aria e con il pulviscolo atmosferico.

Per tenere conto di questa attenuazione si sfrutta il concetto di massa d'aria, AM: quanto più è lungo il percorso del raggio, ossia quanto maggiore è la porzione di atmosfera che esso deve attraversare, più grande sarà l'attenuazione.
La massa d'aria è definita come la lunghezza relativa del percorso del raggio diretto attraverso l'atmosfera e viene calcolata come $AM = \frac{1}{\cos \vartheta_z}$ dove ϑ_z è l'angolo tra la perpendicolare al suolo e la direzione della radiazione solare (angolo di zenit).
Lo spettro extra-atmosferico viene indicato con AM 0, mentre AM 1,5 indica uno spettro con irradianza 1000 W/m² viene usato per le prove di qualifica su celle e moduli fotovoltaici.
L'attenuazione dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione stessa.

Per quantificare la potenza totale, proveniente da una sorgente irradiante, che incide su una superficie di area unitaria, si usa l'irradianza [W/m²].
Al livello del suolo, essa dipende dall'angolo di tilt, ovvero l'inclinazione della superficie ricevente rispetto al piano orizzontale, e dall'altitudine sopra il livello del mare.

L'irradiazione è, invece, l'irradianza integrata nel tempo e si misura in kWh/m². Nel progetto degli impianti fotovoltaici è importante l'irradiazione media giornaliera o mensile **[73]**.

Siccome i moduli fotovoltaici sono solitamente installati inclinati rispetto all'orizzontale, riescono a captare sia la radiazione diretta sia quella diffusa; quest'ultima varia durante il giorno al variare della posizione del Sole, quindi risulta interessante individuare la posizione della nostra stella nella volta celeste (la parte visibile di un'immaginaria sfera celeste al cui centro si trova la Terra e sulla quale vengono proiettati i corpi celesti).
L'arco percorso dal Sole nella volta celeste varia nel corso dell'anno e dipende dal punto di osservazione, quindi per determinare la sua posizione rispetto ad un punto fisso sulla Terra, è necessario determinare due particolari coordinate: l'altezza solare β, angolo compreso tra la linea che congiunge idealmente un osservatore con il centro del sole e il piano orizzontale, e l'azimut ϕ, angolo compreso tra la proiezione sul piano orizzontale della linea che congiunge idealmente un osservatore con il centro del Sole e la direzione sud.
Questi angoli vengono definiti in relazione ad altri parametri:
-la latitudine φ a cui si trova l'osservatore: è la misura angolare della porzione di meridiano compresa tra l'equatore e il parallelo passante per il punto in cui si trova l'osservatore **[74]**;
-l'angolo di zenit;
-l'angolo orario ω: è l'angolo compreso tra il meridiano su cui si trova il punto considerato e la perpendicolare passante per il Sole su un piano orizzontale. Esso dipende dall'ora in cui si effettua l'osservazione;

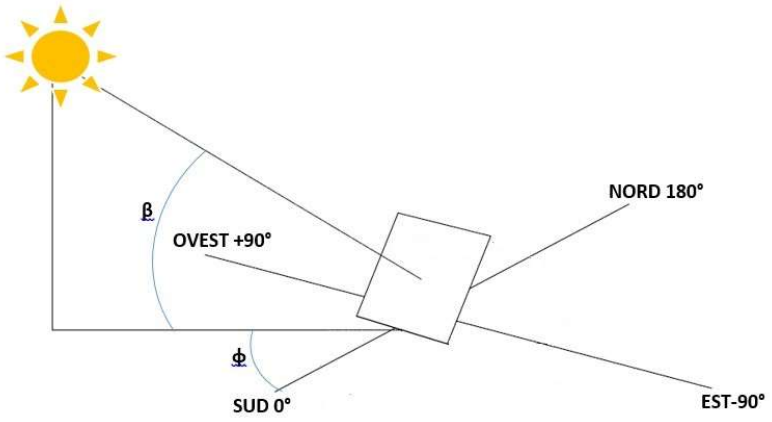


Figura 10: angoli solari

-la declinazione solare: è l'angolo che la direzione dei raggi solari forma, a mezzogiorno, sul meridiano considerato, col piano equatoriale. Esso dipende dal mese e dal giorno in cui si effettua l'osservazione e risente dell'inclinazione dell'asse terrestre, la quale varia ciclicamente tra 21,5° e 24,5° in 41000 anni ed ora è circa pari a 23° 27'.
Questa inclinazione comporta che l'altezza del Sole sull'orizzonte, a mezzogiorno, non sia uguale da un giorno all'altro, essa è massima nel giorno del solstizio d'estate e minima nel solstizio d'inverno **[25]**.

3.2.2. I moduli fotovoltaici

I moduli fotovoltaici sono dispositivi costituiti da celle interconnesse, in grado di produrre energia elettrica se esposte alla radiazione solare.
Le celle sono racchiuse ermeticamente tra due pannelli, quello superiore è realizzato in materiale trasparente per permettere alla luce di giungere fino alle celle, quello inferiore può essere opaco (generalmente in tedlar) o trasparente.
L'E.V.A. (acetato di vinil etilene) è un polimero trasparente alla luce che avvolge le celle e salda i pannelli superiore ed inferiore tra loro, rendendo ermetica la struttura.

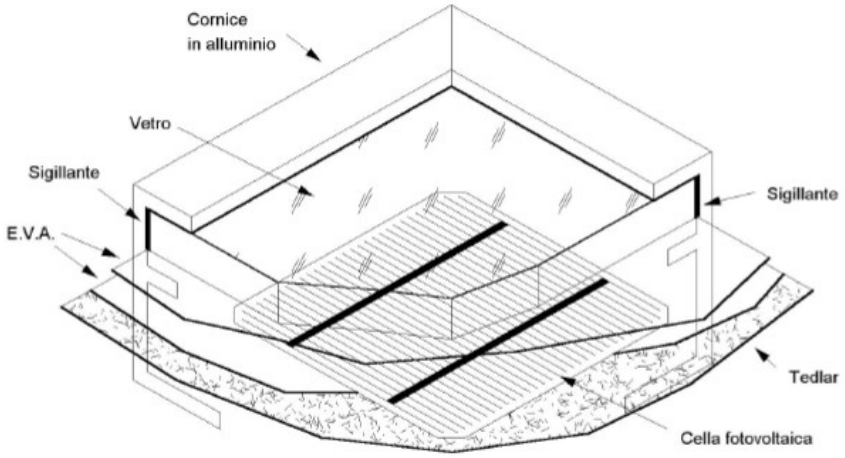


Figura 11: struttura modulo fotovoltaico tradizionale **[73]**

L'elemento fondamentale è la cella solare, si tratta di un diodo a semiconduttore opportunamente drogato posto tra due elettrodi.
Il diodo può essere costituito da diversi materiali come, ad esempio il silicio, monocristallino o policristallino. Nel caso del silicio, il drogaggio consiste nell'inserimento di atomi di Fosforo in uno strato, ottenendo un substrato "drogato N", ovvero con un eccesso di cariche negative (elettroni), e di atomi di Boro in un altro strato, ottenendo un substrato "drogato P", ovvero con un eccesso di cariche positive (lacune); essi sono separati da uno spazio che prende il nome di zona di giunzione.

Quando la radiazione solare incide sulla cella, siccome il suo spessore è piccolo, riesce a penetrare fino alla zona di giunzione e, se ha energia sufficiente, può far spostare gli elettroni dallo strato N allo strato P, innescando una corrente elettrica continua che verrà successivamente convogliata all'esterno per mezzo di una griglia metallica frontale e da un contatto posteriore e convertita in corrente alternata grazie ad un inverter **[73]**.

La potenza di una cella fotovoltaica dipende dalla temperatura dei moduli e dall'irradianza solare incidente, quindi, al fine di poter confrontare le prestazioni di diverse celle, sono state definite delle condizioni di riferimento standard STC:
-irradianza 1000 W/m²;

-temperatura dei pannelli 25°C;
-spettro 1,5 AM;
-vento 0 m/s.

Il comportamento termico dei moduli è determinato attraverso la temperatura di nominale funzionamento NOCT, definita nelle seguenti condizioni:
-irradianza 800 W/m²;
-temperatura aria 20°C;
-vento 1 m/s.

La potenza che una cella è in grado di erogate in condizioni STC è detta potenza di picco e viene espressa in Watt di picco, Wp. Tuttavia, se le condizioni si discostano da quelle standard, la potenza fornita sarà diversa e, solitamente, per temperature superiori a 25°C decresce in funzione della NOCT **[74]**.

3.2.3. Vantaggi

L'impiego dei sistemi fotovoltaici offre svariati vantaggi: non solo si ottiene l'ombreggiamento della serra, ma si produce anche energia elettrica che può essere impiegata all'interno della serra stessa, per esempio per alimentare le pompe, l'impianto di illuminazione, etc…Il surplus di energia elettrica può, inoltre, essere immesso nella rete, comportando un guadagno aggiuntivo **[75]**.
La funzione di ombreggiamento genera una riduzione della radiazione solare che entra nella serra e questo è accompagnato dalla diminuzione della temperatura dell'aria interna, dell'evapotraspirazione e, quindi, anche del consumo dell'acqua di irrigazione **[76]**.

I moduli fotovoltaici possono essere tradizionali o trasparenti, la loro installazione non può avvenire su serre la cui copertura è costituita da film plastici; al contrario è adatta, in particolare, alle serre a padiglione con lastre di vetro o plastica rigida.
In particolare, i pannelli fotovoltaici semitrasparenti possono essere installati in sostituzione di parte delle lastre della copertura.

L'ombreggiamento che si ottiene dipende dall'inclinazione dei raggi solari, dalla posizione di installazione dei pannelli, dal loro grado di trasparenza e dalla loro inclinazione **[76]**.

Un ulteriore aspetto legato all'utilizzo di pannelli fotovoltaici è la possibilità di far penetrare all'interno della serra la radiazione fotosintetica attiva (PAR) e sfruttare il rimanente range di lunghezze d'onda per generare energia elettrica. Ciò può essere ottenuto grazie a lenti in grado di concentrare la luce solare diretta sui moduli PV e di lasciar passare la luce diffusa **[77]**.

3.2.4. Problematiche

Accanto ai vantaggi derivanti dall'utilizzo del fotovoltaico, vi sono però anche alcune problematiche legate, soprattutto, alla necessità di conciliare le esigenze dei produttori dei moduli con quelle dei costruttori di serre e alle modalità di installazione dei pannelli stessi.

La regola presa solitamente come riferimento, contenuta nel V Conto Energia (le cui disposizioni di incentivazione, però, non sono state più applicate dal 6 luglio 2013 dopo il raggiungimento del tetto di 6,7 miliardi di euro), impone che la proiezione a terra della copertura fotovoltaica sia pari al massimo al 30% della copertura totale della serra o al 50% nel

caso di strutture per le quali l'autorizzazione alla costruzione sia stata rilasciata prima dell'entrata in vigore del V Conto Energia, ovvero del Decreto Ministeriale del 05/07/2012 **[78]**.
L'obiettivo della norma sarebbe, teoricamente, di consentire alla luce solare di giungere sul 50% della superficie interna della serra, ma, nella realtà, questa percentuale è inferiore. Per una località mediterranea, alle ore 12 del solstizio d'estate, si scende ad un 44%, fino ad arrivare al 10% di superficie illuminata, nel solstizio d'inverno, a causa dell'inclinazione dei raggi solari **[79]**.

Inoltre, non è sempre facile coniugare le esigenze dei costruttori di serre e dei produttori di pannelli fotovoltaici, che desidererebbero una standardizzazione dei prodotti nei rispettivi campi.
È necessario trovare dei compromessi per giungere ad una progettazione integrata, il cui obiettivo è ridurre le aree in ombra all'interno della serra. Ciò potrebbe essere possibile, ad esempio, realizzando moduli fotovoltaici di dimensioni modificate, in modo da potersi adattare alle serre, e, al contempo, una struttura della serra adatta ad ospitare i moduli.

Per quanto riguarda l'installazione di pannelli fotovoltaici in serre già esistenti, spesso non è possibile avere un'esposizione ottimale dell'intero impianto alla luce solare.
Di conseguenza la loro resa energetica è inferiore a quella dei classici impianti **[80]**.
Alcuni studi **[75]** effettuati su pannelli CIS hanno, però, evidenziato la resa non trascurabile in termini di surplus energetico generato dai moduli fotovoltaici, rispetto ai consumi della serra su cui sono stati installati.

L'impiego del fotovoltaico nelle serre è ostacolato soprattutto dalla completa opacità dei moduli tradizionali che impedisce alla radiazione solare di attraversarli e riduce la produttività della coltivazione.
Questa problematica può essere in parte risolta adottando pannelli semitrasparenti, come ad esempio, le celle di Grätzel o DSC, celle fotoelettrochimiche formate da due vetri conduttori (che costituiscono gli elettrodi), separati da uno strato di biossido di titanio (TiO_2), dal materiale attivo e dalla soluzione elettrolitica **[81]** oppure le celle fotovoltaiche organiche, in cui la componente fotoattiva è basata su composti organici del carbonio.
Il loro costo è più elevato, ma ciò può essere mitigato dal fatto che la produzione di energia pulita permetta di recuperare l'investimento a lungo termine.
Se la distribuzione delle celle semi-trasparenti fosse poco densa, all'interno della serra si riuscirebbe ad ottenere una riduzione della PAR anche solo del 3%, come dimostrato dagli studi effettuati su moduli con celle CIS disposti a file alterne sulle falde della serra del Centro di Sperimentazione e Assistenza Agricola **[71]**. Sempre con riferimento a questo esperimento, la produzione di energia elettrica è risultata diciassette volte maggiore dell'energia consumata dalle utenze interne alla serra stessa; l'energia non consumata può essere commercializzata o destinata ad altri usi all'interno dell'azienda, comportando un notevole risparmio energetico.

3.2.5. Soluzioni costruttive

Attualmente le serre fotovoltaiche non sono molto diffuse, ma si stanno studiando diverse soluzioni per renderle più accessibili e convenienti.

Inizialmente si era pensato di utilizzare moduli fotovoltaici tradizionali che, come detto precedentemente, non consentivano il passaggio della luce; si è, quindi pensato ad una loro disposizione che ovviasse al problema. Studi effettuati da Yano et al. hanno testato due differenti

disposizioni dei moduli fotovoltaici: lineare o a scacchiera. La quantità di energia elettrica prodotta è stata simile, ma la distribuzione della luce a terra è risultata molto più uniforme nel secondo caso e ha comportato una migliore crescita delle piante **[82]**.

Inoltre, esiste la possibilità di sostituire le lastre di copertura con pannelli fotovoltaici semitrasparenti: sono moduli in cui le celle fotovoltaiche sono distanziate tra loro e contenute tra due pannelli trasparenti in modo tale da permettere alla luce solare di filtrare in modo naturale all'interno dell'ambiente. Lo stesso effetto si può ottenere con la tecnologia del film sottile, soluzione particolarmente indicata nei casi di grandi superfici vetrate piane o inclinate **[83]**.

Sono state sperimentate soluzioni che prevedono vetri fotovoltaici a celle cristalline in Silicio, il cui grado di trasparenza dipende dalla distanza reciproca fra le celle; negli esperimenti effettuati, esse sono state posizionate in modo da generare una zona d'ombra pari al 30% o al 15%.
Sono stati oggetto di studio anche moduli a film sottile, di tipo CIS, con una proiezione d'ombra del 20% **[79]**.

Per assicurare una buona resa dell'impianto fotovoltaico, esso dovrebbe essere esposto il più possibile a sud e le dimensioni della serra dovrebbero corrispondere ad almeno 9 metri di larghezza e almeno 2 metri di altezza **[84]**.

S. Moretti e A. Marucci hanno studiato il potenziale di un prototipo innovativo di serra fotovoltaica provvista di pannelli fotovoltaici in grado di ruotare inseguendo il sole; questo permette di variare l'ombreggiamento all'interno della serra in relazione alle condizioni climatiche esterne.
La soluzione ottimale sembrerebbe essere utilizzare pannelli semitrasparenti e renderli "dinamici", ovvero con possibilità di orientarli seguendo il sole.
Un sistema fisso, infatti, lavorerebbe bene solo in alcuni mesi dell'anno e in condizioni di cielo terso; uno dinamico, invece, consentirebbe di variare in modo continuo l'ombra all'interno della serra, in accordo con la richiesta di luce da parte delle coltivazioni e con le condizioni metereologiche esterne, e di ottimizzare la produzione di energia elettrica.
Tuttavia, il sistema dinamico causa la perdita dell'inclinazione ottimale dei pannelli con conseguente riduzione dell'energia producibile; questo problema può essere in parte risolto adottando specchi costantemente allineati con la direzione di provenienza dei raggi solari e che li proiettano sulla superficie dei moduli.
Il sistema può anche essere reso più efficiente collegandolo a dispositivi di controllo che facciano variare l'inclinazione dei pannelli fino al raggiungimento del valore di radiazione solare interna impostata come obiettivo **[76]**.

Un sistema dinamico e semi-trasparente dà la priorità all'ingresso della luce solare nella serra, mentre le serre fotovoltaiche convenzionali con copertura totale o parziale del tetto danno la priorità alla generazione di energia elettrica.
Le due tipologie di soluzioni differiscono anche per la modalità con cui viene generata l'ombra all'interno della serra: i pannelli tradizionali creano un'area ombreggiata definita, invece i moduli semi-trasparenti ombreggiano solo in corrispondenza della cella PV **[77]**.

Importante ricordare che la radiazione solare interna alla serra non dovrebbe mai scendere sotto i 5 $MJ/m^2 \cdot$giorno, valori minori sono incompatibili con la crescita di molte colture. Questo potrebbe essere un problema nei mesi invernali e costringerebbe ad utilizzare un sistema di illuminazione artificiale.

3.3. Conclusione

Tutte le tecniche presentate in questo capitolo permettono, nei mesi caldi, un raffrescamento "passivo" della serra, in quanto non richiedono l'utilizzo di una fonte energetica (ad eccezione dell'energia necessaria per la movimentazione di schermi eventualmente automatici).
Ma, a volte, non sono sufficienti al fine di mantenere le ottimali condizioni interne; l'unica soluzione diventa, allora, l'installazione di sistemi di raffrescamento e ventilazione, di cui si parlerà nei prossimi capitoli **[85]**.

Indubbiamente, però, il loro utilizzo consente di ridurre il carico termico che deve essere abbattuto in estate, con conseguente risparmi energetico ed economico.
I sistemi sono vari e rispondono alle diverse esigenze degli utenti: dai metodi meno sofisticati come le vernici a quelli più flessibili come i teli mobili automatizzati.

Se l'ombreggiamento è ottenuto grazie a moduli fotovoltaici, si riesce anche ad ottenere un guadagno in termini di energia elettrica che può essere utilizzata direttamente nell'azienda stessa oppure venduta.

Capitolo 4. Climatizzazione serre

La climatizzazione di una serra permette di sfruttare la sua capacità produttiva tutto l'anno e consiste nel controllo della temperatura, dell'umidità relativa, della luminosità e del ricambio d'aria.
L'insieme di questi parametri definisce le condizioni climatiche interne alla serra, esse hanno un'importante influenza sui processi biologici alla base della crescita delle colture, come ad esempio, la fotosintesi e la respirazione.
In particolare:
- maggiore è l'intensità della luce, maggiore sarà l'attività fotosintetica, ma solo fino ad un certo valore. Se esso viene superato, ulteriori aumenti dell'intensità della luce non producono un aumento dell'attività fotosintetica;
- maggiore è la concentrazione di CO_2, più intenso sarà il processo di fotosintesi, ma anche in questo caso c'è un limite all'aumento dell'intensità del processo;
- maggiore è la temperatura, più aumenta l'attività fotosintetica, fino a raggiungere un valore ottimale. Quando esso viene superato, gli enzimi responsabili della fotosintesi si degradano a causa dell'eccessivo calore e il processo fotosintetico diminuisce velocemente **[69]**.

Questi motivi rendono fondamentale il controllo del clima interno ai fini dell'ottenimento di un'ottimizzazione della quantità e della qualità delle piante prodotte.

4.1. Umidità relativa

Il controllo dell'umidità è fondamentale in quanto essa influisce sulla crescita, traspirazione e insorgenza di malattie delle piante.
Se essa è eccessiva, rende più difficile l'evaporazione, al contrario, se è elevata, fa aumentare la traspirazione, fino ad ostacolare la fotosintesi.
Vi è una stretta correlazione tra umidità relativa e temperatura ambiente, è quindi necessario, controllare entrambi i parametri **[86]**.
L'umidità relativa è definita con il rapporto tra la massa di vapore d'acqua $\boldsymbol{m_V}$ contenuto in un certo volume V di aria umida e la massa di vapore $\boldsymbol{m_S}$ contenibile in condizioni di saturazione, alla stessa temperatura, nel volume V:

$$\boldsymbol{\varphi = \frac{m_V}{m_S}\Big|_T = \frac{\frac{p_V \cdot V}{R_V \cdot T}}{\frac{p_S \cdot V}{R_V \cdot T}} = \frac{p_V}{p_S}\Big|_T}$$

dove p_V è la pressione parziale del vapore d'acqua nell'aria umida e p_S è la pressione di saturazione.

Nel caso dei sistemi serricoli, al posto di umidità relativa, si preferisce parlare di Vapour Pressure Deficit (VDP): rappresenta la misura della differenza tra la quantità effettiva di vapore d'acqua presente nell'aria ad una certa temperatura e la quantità di vapore d'acqua che l'aria può contenere prima di arrivare a saturazione (quindi, prima di condensare), questo parametro tiene in considerazione, in un unico valore, sia la temperatura sia la pressione di vapore d'acqua **[87]**.

Tabella 6: valori del VPD in millibar **[88]**

TEMPERATURA [°C]	UMIDITÀ RELATIVA [%]							
	99	95	90	85	80	70	60	50
15	0,070	0,085	0,171	0,256	0,341	0,512	0,683	0,853
20	0,024	0,117	0,234	0,351	0,468	0,701	0,935	1,170
25	0,032	0,158	0,317	0,477	0,633	0,950	1,269	1,584
30	0,042	0,212	0,424	0,636	0,849	1,273	1,697	2,122
35	0,056	0,281	0,562	0,843	1,124	1,687	2,252	2,811

Un elevato valore di VDP corrisponde ad una bassa U.R. Entrambi i parametri forniscono una misura della capacità di traspirazione delle piante **[53]**.

I valori ottimali di VDP sono compresi tra 0 e 7 mbar, essi permettono di migliorare la traspirazione delle piante e ridurre il rischio di fitopatie **[89]**.

4.2. Controllo della CO_2

Oltre a temperatura e umidità relativa un altro fattore da tenere sotto controllo all'interno della serra è la concentrazione di CO_2.

L'anidride carbonica si trova naturalmente nell'atmosfera con concentrazioni di 300-400 ppm ed è considerata una delle principali sostanze nutritive delle piante, che la assimilano per permettere la fotosintesi e la emettono durante la respirazione.

L'andamento della fotosintesi, in particolare, è direttamente legato alla concentrazione di CO_2: diventa ottimale quando la quantità di CO_2 si aggira intorno a 900-1600 ppm, si arresta se la CO_2 scende sotto i 200 ppm, mentre una concentrazione superiore a 2000 ppm diventa tossica per le piante **[90]**.

Siccome durante il processo fotosintetico, le piante consumano CO_2, risulta necessario riportarla entro i valori ottimali.
Questo si ottiene monitorando accuratamente la percentuale del gas all'interno della serra, "rinnovando" l'aria e, a volte, anche aggiungendo CO_2,

Addizionare CO_2 può risultare particolarmente complesso nei casi in cui la serra sia ventilata (per raffreddare e deumidificare l'ambiente interno), di conseguenza, conviene adottare alcuni accorgimenti.
Innanzitutto, se gli ambienti sono costantemente ventilati, è inutile arricchire l'aria con CO_2, perchè essa verrebbe per la maggior parte espulsa.
Se si dispone di un ventilatore termostatico, è buona norma disattivarlo per almeno 10 minuti, durante i quali si provvede all'immissione della CO_2,
In generale, il massimo beneficio dato dall'arricchimento di CO_2 si ottiene nelle serre che utilizzano aria condizionata e deumidificatori per controllare temperatura e umidità, senza ventilazione naturale verso l'esterno **[91]**.

Centraline appositamente programmate possono gestire l'immissione di questo gas. Ad esempio la soluzione offerta dall'azienda Agricontrol è C-AGRI-CO2/1: un dispositivo collegato ad un analizzatore di concentrazione per 0-3000 ppm di CO_2. Il controllo della CO_2 è eseguito azionando con tempi proporzionali la valvola di emissione del gas nell'ambiente.

È anche possibile azionare le emissioni tramite l'orologio interno, su base oraria e possono essere arrestate da un dispositivo esterno **[92]**.

4.3. Riscaldamento

All'interno di una serra non climatizzata, durante la fredda stagione invernale, soprattutto nelle ore notturne, la temperatura dell'aria può scendere sotto il limite che garantisce un'adeguata crescita dei vegetali. Di conseguenza diventa fondamentale installare un buon impianto di riscaldamento, i cui principali obiettivi sono mantenere la temperatura interna voluta ed evitare l'instaurazione di un eccessivo movimento dell'aria in modo da non aumentare le dispersioni di calore e da rendere più omogenea possibile la temperatura.

Gli impianti di riscaldamento possono sfruttare diverse fonti di energia, fossile o anche rinnovabile, ma tutti presentano due componenti fondamentali: un generatore di calore e un sistema di distribuzione ed erogazione dello stesso.
La scelta dell'impianto dipende innanzitutto dalle esigenze delle piante coltivate nella serra. Se la coltura non è molto delicata, è sufficiente installare un generatore d'aria calda, in caso contrario si può pensare ad un doppio sistema di distribuzione (riscaldamento dei bancali o del pavimento ad acqua e riscaldamento dell'aria), che permette di ottenere un distribuzione più uniforme del calore ed evita sbalzi termici.

Generatori

I **generatori** hanno il compito di riscaldare un fluido termovettore che può essere aria o acqua.

I generatori d'aria calda possono essere di grandi o di piccole dimensioni.
I primi vengono solitamente alimentati a gas o gasolio, ma recentemente ne sono stati introdotti alimentati anche con combustibili solidi come cippato o gusci.
I vantaggi offerti sono la possibilità di spostamento e il ridotto costo di installazione, ma a fronte di elevati costi d'esercizio, condizioni termo-igrometriche non uniformi e di un rapido raffreddamento della serra in caso di interruzione dell'erogazione del calore.
Questi sistemi possono essere collegati ad un sistema di distribuzione.

Figura 12: generatore d'aria calda di grandi dimensioni **[69]**

I generatori d'aria calda di piccole dimensioni possono essere in versione pensile o portatile e sono costituiti da un corpo scaldante e un ventilatore che preleva masse d'aria all'interno della serra e le riscalda facendole passare a contatto con le superfici calde del corpo scaldante.
In versione portatile sono dotati di rotelle che ne consentano la movimentazione all'interno della serra, ma non sono molto efficienti perché l'aria calda tende a salire.
In configurazione pensile, per migliorare la distribuzione del calore, possono essere collegati a tubi forati che erogano l'aria scaldata su tutta la lunghezza della serra **[69]**.

Figura 13: generatori d'aria calda di piccole dimensioni in versione pensile (a sinistra) e portatile (a destra) **[69]**

Se il fluido termovettore è acqua, si possono adottare caldaie a gas a condensazione, che trovano in questo contesto la loro massima applicabilità, dato che il sistema è alimentato a bassa temperatura, oppure caldaie a biomassa legnosa (cippato) oppure pompe di calore.
Questi generatori devono essere collegati ad un sistema di distribuzione **[93] [94]**.

Sistema di distribuzione

Il sistema di distribuzione può essere costituito da:

-aerotermi: sono dispositivi costituiti da uno scambiatore di calore, in cui circola il fluido proveniente dal generatore di calore, e da un ventilatore. Il principio di funzionamento è basato sul riscaldamento dell'aria della serra grazie al fluido termovettore: quest'ultimo cede il proprio calore all'aria che passa all'interno dello scambiatore.
Presentano elevata flessibilità d'impiego e consentono una rapida ed uniforme distribuzione del calore collegando l'aerotermo con una tubazione in plastica con fori su tutta la sua lunghezza.
Gli aerotermi contribuiscono a migliorare gli scambi gassosi delle piante grazie al movimento dell'aria da essi generato.
Inoltre sono poco costosi e facilmente regolabili;

Figura 14: aerotermo **[69]**

-corpi radianti: sono corpi costituiti da tubazioni in polietilene ad alta densità o in acciaio, in essi il fluido (acqua) entra a circa 80-85 °C (mandata) e ritorna a circa 65-70°C; vengono posizionanti in alto, lungo le pareti laterali o sul terreno. Si tratta di un sistema che crea una distribuzione del calore diversa a seconda della posizione e della superficie dei tubi e genera notevoli gradienti di temperatura in direzione verticale.
Il vantaggio di questo sistema risiede nel fatto che, in caso di malfunzionamento o interruzione del riscaldamento, la serra si raffredda lentamente, però, al contempo, la diffusione del calore è lenta.
È possibile variare la temperatura regolando la portata del fluido termovettore o regolando la sua temperatura miscelando il fluido caldo uscente dal generatore con il fluido freddo che scorre nei tubi di ritorno **[69]**;

Figura 15: tubi radianti posti a terra **[69]**

-riscaldamento del substrato, a pavimento o dei bancali: grazie all'utilizzo di un fluido termovettore a bassa temperatura (25-35 °C), crea le condizioni climatiche ideali a ridosso delle piante, consentendone uno sviluppo ottimale, riducendo il calore disperso, ma generando umidità **[94]**.
Siccome il sistema riscalda direttamente il terreno in cui si trovano le piante, è necessario controllare accuratamente che la temperatura delle radici non superi i 25°C per evitare il rischio di danneggiarle; inoltre questo sistema non è in grado di creare un riscaldamento uniforme di tutta l'aria contenuta nella serra **[95]**.

Figura 16: sistema di riscaldamento basale **[96]**

I sistemi ad acqua con corpi radianti o a riscaldamento del substrato, rispetto a quelli ad aria, consentono di ottenere una buona distribuzione del calore, a fronte di un investimento iniziale e costi d'esercizio maggiori e di minore flessibilità.

4.4. Raffrescamento

Nei periodi estivi i principali parametri da tenere sotto controllo sono i valori di radiazione solare, temperatura e di deficit di pressione di vapore, essi, infatti, tendono ad essere elevati, al punto di aumentare lo stress delle piante e di diminuire la produttività e la qualità dei prodotti **[51]**.

Per controllare queste variabili si possono adottare diverse strategie, le principali consistono in:
-sistemi ombreggianti per ridurre l'energia entrante dall'esterno, argomento affrontato nel capitolo 3;
-ventilazione naturale o forzata, argomento trattato nel paragrafo 4.5. ;
-**impianti di raffrescamento evaporativi** di tipo fan-pad, package e fogging per asportare il calore;
-sistemi di condizionamento dell'aria, come i **sistemi a compressione di vapore**.

Solitamente, il controllo della temperatura interna, fino a valori della temperatura esterna pari a circa 27°C, può essere effettuato con la sola ventilazione, a volte abbinata a metodi passivi come i sistemi di ombreggiatura **[23]**.
Per temperature maggiori, diventa necessario ricorrere a veri e propri sistemi di raffrescamento.

Prima di spiegare il funzionamento dei vari sistemi, vengono spese poche parole riguardo alla differenza tra calore latente e calore sensibile.
Il primo è il calore che, somministrato ad un corpo, ne provoca il cambiamento di stato fisico, senza innalzare la sua temperatura, mentre il secondo è il calore che, quando viene fornito ad un corpo, ne provoca un aumento di temperatura.
Per quanto riguarda i sistemi serra, il calore latente è coinvolto nei processi di traspirazione delle piante, evaporazione dell'acqua dal suolo (quando è presente) e nella condensazione del vapore acqueo sulla superficie interna della copertura **[28]**.

4.4.1. Cooling Pad

Tra i sistemi di raffrescamento evaporativi ad aria vi è il Cooling Pad, detto anche "pad and fan": il suo funzionamento consiste nell'assorbimento del calore tramite evaporazione dell'acqua. Esso prevede l'utilizzo di grossi pannelli in cellulosa, cartone o materiale plastico poroso posti su un lato della serra e continuamente umidificati con acqua a temperatura inferiore a quella dell'aria interna alla serra e di ventilatori.

Si distinguono due categorie di impianto:

-a depressione: i ventilatori vengono posizionati sul lato opposto rispetto ai pannelli e hanno la funzione di estrarre l'aria interna, richiamando, così, l'aria esterna che è costretta a passare tramite i blocchi porosi;

-a sovrappressione: i ventilatori si trovano sullo stesso lato dei pannelli e spingono l'aria esterna attraverso essi.

L'aria, passando attraverso i pannelli, cede calore all'acqua, che evapora; di conseguenza, si ottiene un abbassamento della temperatura interna e una umidificazione dell'ambiente. Questa soluzione permette di mantenere la temperatura interna della serra più bassa di circa 6° C rispetto alla temperatura dell'aria esterna, ma la distribuzione di temperatura che si ottiene non è uniforme **[51]**.

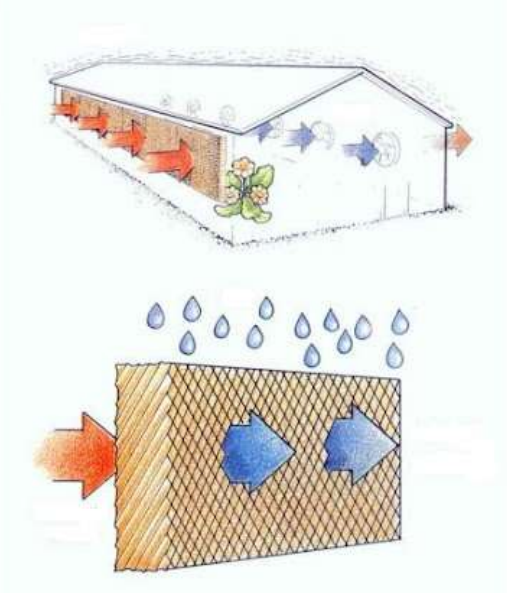


Figura 17: cooling pad **[97]**

4.4.2. Sistema package

In questo caso, il ventilatore e il pannello umidificato, si trovano nella stessa camera: l'acqua evapora grazie al calore sensibile contenuto nell'aria in ingresso e ne abbassa la temperatura. Sono sistemi a portata elevata, utilizzati nei grandi ambienti, richiedono ventilatori di grande potenza e l'aria che attraversa la camera, subisce una perdita di carico anche superiore a 60 Pa **[53]**.

Figura 18: sistema package **[23]**

4.4.3. Fogging

Il cosiddetto sistema “fog di umidificazione” sfrutta l’evaporazione dell’acqua per sottrarre il calore latente dell’aria all’interno della serra. In questo caso l’acqua si trova sotto forma di microscopiche gocce che restano in sospensione nell’aria ed, evaporando, sottraggono adiabaticamente calore all’aria.
Le gocce vengono ottenute tramite l’utilizzo di ugelli ad alta pressione oppure ugelli rotanti o a spruzzo a bassa pressione.
Nel sistema ad alta pressione e bassa portata, gli ugelli sono disposti lungo tubi di distribuzione posizionati all’altezza della linea di gronda.
Nel secondo caso, vi è la possibilità di formazione di gocce di grandi dimensioni che cadono verso il basso, facendo aumentare il rischio di formazione di funghi e parassiti **[59]**.
Inoltre, è indispensabile evitare depositi di sali che possono ostruire i fori degli ugelli.

Figura 19: sistema fogging **[23]**

I tre sistemi appena descritti coinvolgono processi adiabatici, ovvero, che non modificano il valore di entalpia (somma dell'energia interna e del prodotto tra la pressione e il volume del sistema considerato) della miscela aria-acqua: il calore sensibile presente all’interno della serra viene convertito in calore latente dell’acqua evaporata.
La loro efficienza dipende dalla temperatura e umidità relativa dell’aria esterna: aria con un basso tenore di umidità relativa avrà una maggiore capacità di raffreddamento **[53]**.
Si tratta di sistemi semplici che permettono di raffreddare la serra fino a 30°C; i primi due

sistemi descritti hanno lo svantaggio di non consentire una distribuzione uniforme di temperatura e umidità, il fogging, invece, richiede un continuo controllo degli ugelli e della pressione.
Di conseguenza, nei casi in cui fossero richieste temperature minori e un più preciso controllo di umidità e temperatura, diventerebbe necessario ricorrere a sistemi di condizionamento dell'aria.
Si deve, però, precisare che questi sistemi consumino una quantità di energia elettrica molto superiore ai metodi evaporativi; questo fatto li rende inadatti alla climatizzazione di serre di grandi dimensioni perché la spesa per il condizionamento dell'aria contenuta nella serra, dato l'elevato volume, sarebbe improponibile **[28] [23]**.

4.4.4. Condizionamento dell'aria: sistemi a compressione di vapore

Il funzionamento di questi impianti si basa sulla capacità di un particolare fluido, che percorre un ciclo chiuso, di assorbire calore da una sorgente e, conseguentemente, di diminuirne la temperatura.

Dai primi anni duemila, il settore del condizionamento dell'aria in agricoltura protetta ha visto una, seppur contenuta, diffusione dei sistemi a compressione di vapore, in particolare della tecnologia delle pompe di calore. Essi, infatti, rispetto ai sistemi evaporativi, consentono un migliore controllo climatico all'interno dell'ambiente da climatizzare, non solo in termini di temperatura e umidità, ma anche di controllo della $\boldsymbol{CO_2}$, tuttavia presentano maggiori consumi energetici **[53] [98]**.

La pompa di calore è un dispositivo che preleva calore da una sorgente a bassa temperatura (solitamente le fonti di calore sono aria, acqua di falda o il terreno) e lo rende disponibile ad una temperatura più elevata.

Rispetto ai tradizionali dispositivi che producono calore sfruttando sorgenti fossili, con la conseguente immissione di gas serra e di agenti inquinanti in atmosfera, le pompe di calore vengono alimentate grazie all'energia elettrica e sfruttano sorgenti più "pulite", diminuendo quindi l'inquinamento atmosferico. Inoltre i progressi fatti nella realizzazione di questa tecnologia la rendono una valida alternativa ai generatori tradizionali consentendo anche una riduzione del consumo di energia primaria e dei costi **[99]**.

Se l'obbiettivo è il riscaldamento, si usa il termine pompa di calore, se è il raffreddamento si parla di macchina frigorifera. Se la macchina è in grado di funzionare in entrambe le modalità, grazie all'inversione del ciclo di funzionamento, si parla di macchine "invertibili".
I cicli termodinamici vengono realizzati da un fluido frigorifero, detto fluido di lavoro, che circola all'interno della pompa di calore.

Esistono diverse tipologie di tali dispositivi:
-aria-aria: la sorgente è aria e il calore da essa prelevato viene trasferito ad altra aria;
-acqua-aria: la sorgente è acqua e il calore da essa prelevato viene trasferito ad aria;
-aria-acqua: la sorgente è aria e il calore da essa prelevato viene trasferito ad acqua;
-acqua-acqua: la sorgente è acqua e il calore da essa prelevato viene trasferito ad altra acqua;
-geotermiche: sfruttano l'energia termica presente negli strati superficiali del terreno. Questa energia deriva dal flusso geotermico proveniente dal nucleo terrestre e dalla radiazione del Sole.

Nel seguito si farà riferimento alle pompe di calore che utilizzano come fonte di calore l'aria.

Questa è la tipologia più utilizzata dal momento che l'aria è una risorsa illimitata e facilmente fruibile.

4.4.4.1. Pompa di calore aria-acqua o sistemi con fluido intermedio o sistemi idronici

È composta da una unità esterna collegata a uno o più terminali interni tramite un circuito intermedio percorso da acqua.
Nel funzionamento in raffrescamento, all'interno dello scambiatore 1, che si comporta da evaporatore, il fluido di lavoro, che si trova ad una temperatura inferiore rispetto quella dell'acqua proveniente dal terminale, assorbe calore ed evapora (4-1).
Il compressore, grazie all'energia fornita dall'esterno, comprime il fluido portandolo ad una temperatura superiore (1-2).
A questo punto, avviene il passaggio attraverso lo scambiatore 2, che si comporta da condensatore: qui il fluido cede il calore accumulato (pari alla somma del calore sottratto all'ambiente interno e del lavoro fornito al compressore) e condensa (2-3) prima di attraversare la valvola di laminazione in cui subisce un'espansione ad entalpia costante (3-4).
Di seguito è riportato un ciclo frigorifero sul diagramma di Mollier che mostra le fasi appena descritte:

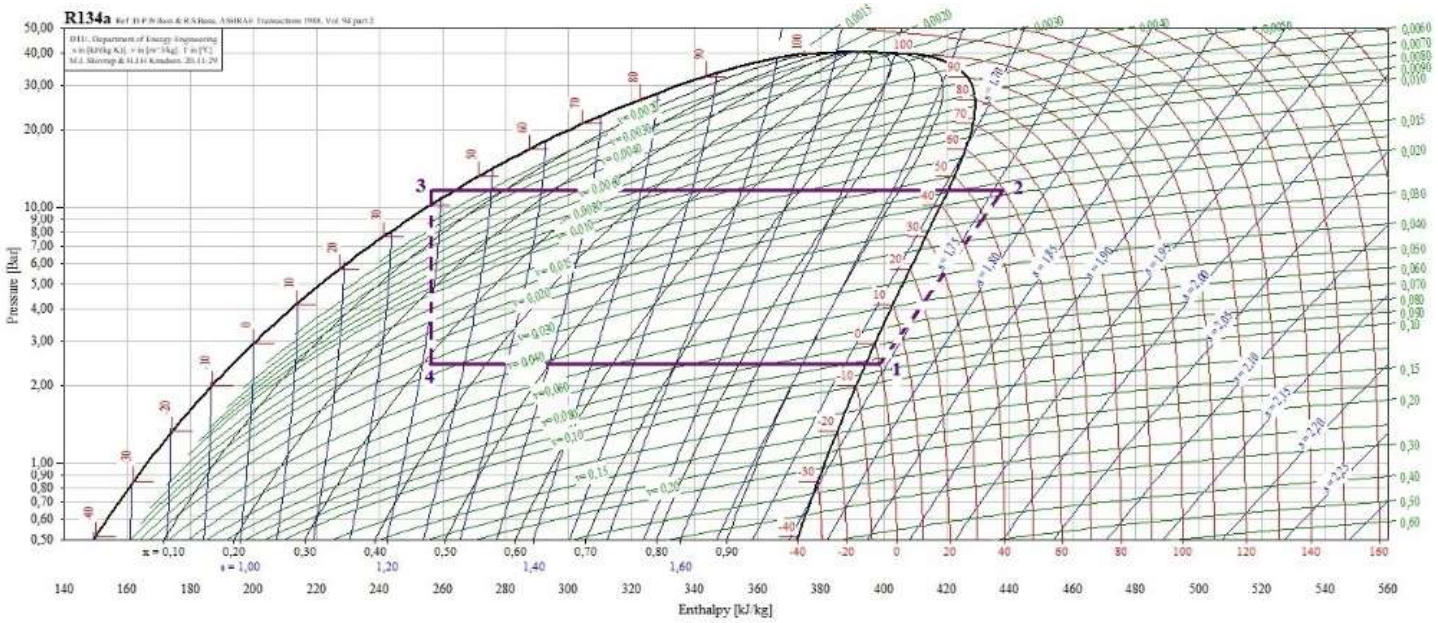


Figura 20: ciclo frigorifero su diagramma pressione-entalpia del fluido R134a

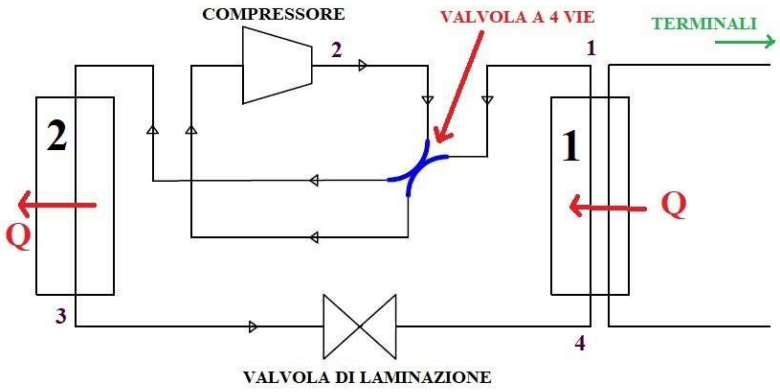


Figura 21: pompa di calore in funzionamento raffrescamento

Nel funzionamento a "pompa di calore" vero e proprio, invece, quando il fluido frigorifero passa nello scambiatore 1, che questa volta fa da condensatore, ha temperatura maggiore dell'acqua e, quindi, le cede calore che essa provvederà a trasportare fino ai terminali interni. Successivamente il fluido passa attraverso la valvola di laminazione, subisce un'espansione, la sua temperatura diminuisce diventando inferiore alla temperatura esterna; di conseguenza, all'interno dello scambiatore 2, il fluido di lavoro può assorbire calore, per poi passare nel compressore che ne aumenterà maggiormente la temperatura.

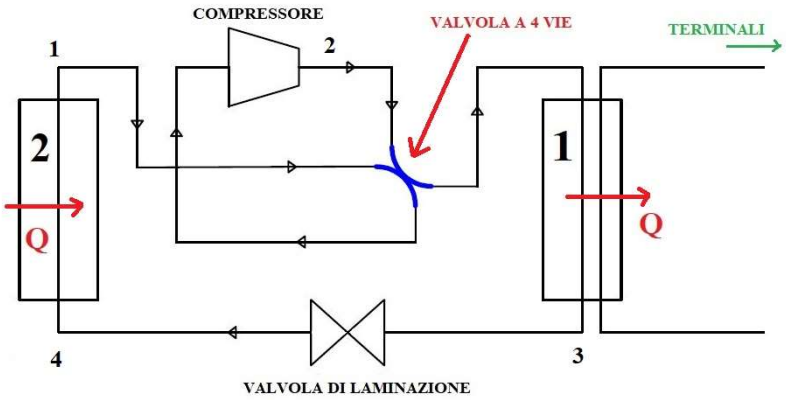


Figura 22: pompa di calore in funzione riscaldamento

Questo duplice funzionamento è possibile grazie ad una valvola a 4 vie in grado di invertire il percorso del fluido ruotando di 90°.

4.4.4.2. Pompe di calore aria-aria VRF o sistemi ad espansione diretta

Negli ultimi quarant'anni sono nate e state perfezionate le pompe di calore Variable Refrigerant Flow (VRF): il principio di funzionamento è analogo a quello delle pompe di calore tradizionali, ma non è presente il circuito idronico intermedio. Il fluido frigorifero giunge direttamente in ogni terminale interno, il quale diventa esso stesso l'evaporatore/condensatore. Il vantaggio consiste nell'assenza di uno scambio di calore intermedio, per contro però, nell'impianto non circolerà acqua, ma fluido refrigerante che, in caso di danni ai tubi, potrebbe fuoriuscire.

La tecnologia ad iniezione di vapore (E.V.I.) consente un controllo attivo del refrigerante, permettendo un miglioramento della efficienza energetica, facendo lavorare nel modo ottimale il compressore. Ciò è possibile prelevando parte del refrigerante in uscita dallo scambiatore 2,

espandendola (attraverso una valvola di laminazione), facendola evaporare in uno scambiatore di calore che funziona come un sotto-raffreddatore e iniettandola a metà del processo di compressione **[100]**.

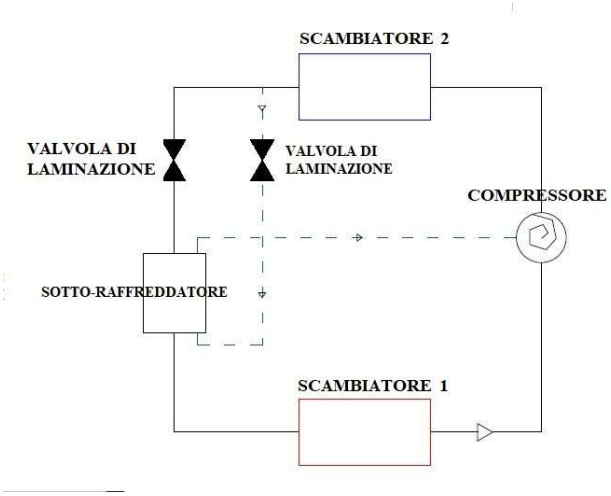


Figura 23: schema tecnologia EVI

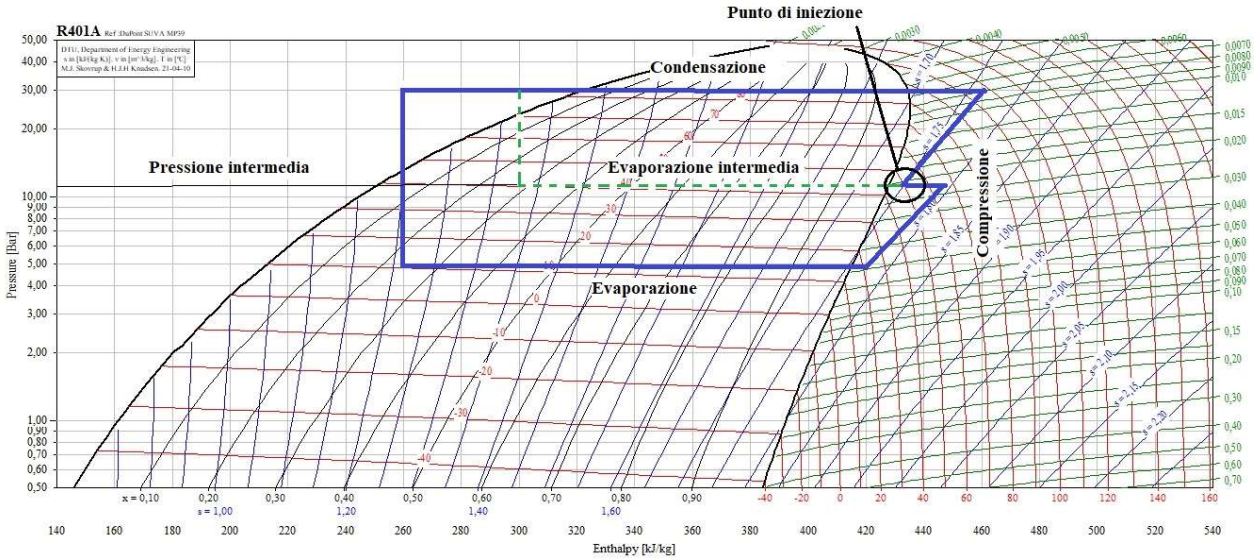


Figura 24: ciclo frigorifero con EVI

Esistono anche i sistemi VRF a recupero di calore, essi hanno la possibilità di riscaldare e raffrescare più ambienti distinti in modo indipendente e contemporaneo e possono farlo sfruttando un recupero energetico sul calore sottratto all'ambiente raffrescato **[101]**.

4.4.4.3. Coefficienti di prestazione energetica delle pompe di calore

Coefficienti di particolare importanza, che identificano le prestazioni della macchina sono:

-l'E.E.R.: relativo al funzionamento in modalità frigorifera, è il rapporto tra la potenza termica trasferita al fluido frigorifero e la potenza assorbita per ottenere questo effetto utile:

$$\boldsymbol{E.R.R.} = \frac{\boldsymbol{Q_f}}{\boldsymbol{P_{ass}}}$$

-il COP: relativo al funzionamento in modalità pompa di calore, è il rapporto tra la potenza termica erogata all'ambiente da climatizzare e la potenza assorbita:

$$\boldsymbol{COP = \frac{Q_c}{P_{ass}}}$$

E.R.R. e COP possono assumere valori maggiori di 1 e vengono determinati in relazione ad una precisa temperatura ambiente di riferimento. Il loro valore non è costante perché le condizioni di funzionamento della macchina cambiano in base condizioni operative e all'effetto utile ricercato.
Si è, infatti, osservato un aumento del COP nel momento in cui la superficie dell'evaporatore si fosse andata a trovare ad una temperatura inferiore alla temperatura di rugiada: questo fenomeno si riscontra in particolare nelle giornate più fredde ed umide ed è dovuto alla condensazione sulla superficie dell'evaporatore del vapore presente nell'aria; grazie a questa condensazione il fluido frigorifero, che circola nel dispositivo, riesce ad assorbire non solo il calore sensibile, ma anche quello latente.
Al contrario, il COP diminuisce nel caso in cui sulla superficie dell'evaporatore si venga a formare brina, che ostacola lo scambio di calore. La soluzione a questo problema è l'attuazione di cicli di sbrinamento: la valvola di inversione del ciclo viene commutata in modo da passare dalla modalità riscaldamento alla modalità raffrescamento **[99]**.
I valori di questi due parametri sono tanto più alti quando più le temperature delle sorgenti tra cui opera la pompa di calore sono vicine.

Essi sono stati affiancati dai parametri SEER e SCOP che sono valori stagionali e tengono conto delle stagioni medie di riscaldamento e raffrescamento europee e delle condizioni di progettazione **[102]**:

-il SEER: indice complessivo di efficienza energetica stagionale del condizionatore d'aria o del refrigeratore d'ambiente, è rappresentativo della stagione di raffreddamento e viene calcolato come il quoziente tra il "fabbisogno annuo di raffreddamento di riferimento" e il "consumo energetico annuo a fini di raffreddamento";

-lo SCOP: coefficiente complessivo di prestazione di una pompa di calore elettrica, è rappresentativo della stagione di riscaldamento e viene calcolato come il quoziente tra il "fabbisogno annuo di riscaldamento" e il "consumo energetico annuo a fini di riscaldamento»" **[102]**.

4.5. Sistema di ventilazione

La ventilazione viene usata all'interno di una serra per:
- sostituire l'aria calda interna con aria esterna a temperatura inferiore, in modo da ridurre la temperatura;
- modificare l'umidità: l'ingresso d'aria esterna con tenore di umidità inferiore a quello dell'aria interna alla serra permette di contrastare l'aumento di umidità causato dalla traspirazione delle piante;
- reintegrare la quantità di CO_2 presente in serra e che viene consumata dai vegetali durante la fotosintesi;
- creare una circolazione dell'aria interna in modo da favorire l'impollinazione e mantenere condizioni climatiche uniformi **[69]**.

Essa può essere naturale o meccanica, la scelta deve essere effettuata in base alla tipologia di coltura presente nella serra e alle caratteristiche dell'edificio.

4.5.1. Ventilazione naturale

La piccola richiesta di attrezzature, la ridotta manutenzione, la poca energia consumata e il basso costo hanno reso la ventilazione naturale largamente diffusa all'interno delle serre dell'area Mediterranea.
Durante la stagione invernale viene utilizzata in combinazione con il riscaldamento per diminuire l'umidità dell'aria, mentre in estate per abbassare la temperatura e aumentare l'umidità **[103]**.

La ventilazione naturale avviene grazie all'effetto camino e all'effetto vento.
Il primo è generato da differenze di densità dell'aria causate principalmente da differenze di temperatura: l'aria calda fuoriesce dalle aperture sul tetto della serra e crea una depressione che richiama aria esterna dalle aperture ricavate nelle pareti laterali. La portata che entra aumenta all'aumentare dell'apertura delle finestre, all'aumentare della differenza tra temperatura esterna ed interna e all'aumentare della differenza di altezza tra le aperture di ventilazione.
Invece, l'effetto vento è causato dalla depressione generata dal vento in corrispondenza delle aperture del tetto della serra, questa provoca l'uscita dell'aria presente al suo interno; questo effetto diventa significativo per velocità del vento maggiori di 2-3 m/s.

Diversi fattori influiscono sullo scambio di aria con l'esterno; in particolar modo, la velocità del vento è proporzionale alla portata di ventilazione, ma anche la forma e il tipo di serra, il sistema di ventilazione e il grado di apertura delle finestrature sono determinanti.
Il calore asportato può arrivare a 50-80 W per m^2 di superficie coperta, in relazione ai parametri precedentemente citati, e consente di ottenere tra i 5 e i 15 ricambi orari del volume della serra **[59]**.

Per ottenere una buona ventilazione naturale, è necessario che la superficie delle aperture laterali sia almeno pari a quella delle aperture sul colmo e la loro somma sia pari almeno al 20% della superficie coperta e che la direzione prevalente del vento sia perpendicolare all'asse longitudinale della serra.
Più nel dettaglio, le aperture del tetto devono corrispondere almeno al 16%, 24%, 32% della superficie coperta rispettivamente per l'Italia settentrionale, centrale e meridionale **[59]**.

Studi effettuati utilizzando metodi numerici e volti al miglioramento della ventilazione naturale, hanno dimostrato che la ventilazione sopra-vento sia più efficiente di quella sotto-vento, per questo motivo, le nuove costruzioni serricole sono state realizzate con grandi aperture posizionate nella direzione dei venti dominanti.
Anche la pendenza del tetto della serra influisce sulla ventilazione, di conseguenza, le tradizionali coperture orizzontali si stanno sostituendo con falde simmetriche o asimmetriche inclinate di circa 30° (le simulazioni non hanno evidenziato ulteriori miglioramenti del tasso di ventilazione per inclinazioni superiori ai 30°).
Tuttavia, la ventilazione sopra-vento ha il difetto di creare un gradiente di temperatura e umidità dal lato sopra-vento a quello sotto-vento; questo problema viene mitigato realizzando serre di larghezza inferiore ai 50 m **[104]**.

Si deve evidenziare il fatto che, nei periodo più freddi e nei casi in cui sia necessario gestire l'umidità, le finestre debbano essere chiuse.
Questo può essere ottenuto manualmente o automaticamente; l'azionamento automatico risulta essere la scelta migliore in quanto, collegando il sistema a sensori e ad una centralina, consente la chiusura rapida delle aperture in caso di improvvise precipitazioni o forte vento.

La ventilazione naturale è la migliore, per il controllo della temperatura, nelle regioni più fredde; tuttavia il calcolo del valore d'aria di rinnovo è complicato e l'intero sistema è fortemente influenzato dalle condizioni metereologiche.
Al contrario, nelle regioni in cui la temperatura ambiente arriva a superare i 33°C, può essere necessario ricorrere alla ventilazione forzata, insieme, a volte, a sistemi di raffrescamento evaporativi **[53]**.

4.5.2. Ventilazione forzata

La ventilazione meccanica provvede al rinnovo dell'aria grazie all'impiego di ventilatori elettromeccanici assiali elicoidali installati, solitamente, in testata sul tetto oppure nella parte alta di un lato della serra e di serrande, che vengono posizionate nella parte bassa della parete opposta rispetto ai ventilatori e attraverso cui entra l'aria.
I ventilatori espellono l'aria interna e creano una depressione che richiama l'aria esterna attraverso le serrande.

La ventilazione meccanica può essere:

- di tipo semplice: la temperatura e l'umidità dell'aria entrante non vengono modificate e, di conseguenza, la minima temperatura che si può ottenere in serra sarà al massimo pari alla temperatura dell'aria esterna;

- ventilazione meccanica umida: l'aria esterna viene fatta passare attraverso pannelli fibrosi umidificati. Si tratta del meccanismo già descritto nel paragrafo 4.4.1. con il nome di "Cooling Pad".

Le serrande possono essere a gravità, esse evitano la generazione di correnti contrarie quando i ventilatori sono fermi; inoltre, sono protette da griglie che impediscono l'ingresso di volatili o roditori.
Possono anche essere presenti ventilatori che effettuano un ricircolo dell'aria, a flusso orizzontale o verticale, per creare condizioni climatiche più uniformi.

I ricambi d'aria sono, in genere, pari a 10 volumi all'ora.
La portata d'aria movimentata sarà pari a Q= volume serra · ricambi orari. In base a questo valore vengono scelti i ventilatori.
La quantità di calore asportato può arrivare a 200-230 W per m² di superficie coperta **[53]**.

Capitolo 5. Studio del sistema di climatizzazione di una serra adibita a coltura aeroponica

Il Presidente del Consiglio di Amministrazione di EDO Radici Felici, Andrea Pezzoli, afferma che i sistemi di ombreggiamento e di climatizzazione, ovvero quei sistemi che controllano i fattori esogeni, siano i medesimi sia per coltivazioni tradizionali sia con tecnica aeroponica.
La scelta è legata alla tipologia di pianta che si vuole coltivare. Tale decisione costituisce, quindi, il primo passo dell'analisi.
La motivazione risiede nel fatto che i processi di fotosintesi e di crescita di colture diverse presentino una diversa sensibilità alle temperature **[105]**.

5.1. Descrizione modello modulo di serra di riferimento

Il modello di serra preso come riferimento per l'esecuzione dei successivi calcoli si ispira al modulo di serra aeroponica di proprietà dell'azienda Agricooltur con sede presso la Cascina Gorrea, in Carignano, Torino.

Si tratta di una serra a padiglione, la cui copertura è stata realizzata in lastre di policarbonato alveolare a 6 pareti con trasmittanza, U, pari a 1,6 W/(m²·K) e spessore 20 mm e la struttura portante in alluminio (densità 2700 kg/m³ e conducibilità, λ, 220 W/m·K **[106]**.

È una serra chiusa, non vi sono aperture sulle pareti o sul colmo, le quali vengono tipicamente utilizzate nelle serre tradizionali per ottenere ventilazione naturale.
Presenta un corridoio tecnico con funzione di plenum di ripresa dell'aria ricircolata; esso può essere attraversato da parte a parte nella direzione più lunga, ma non presenta punti di accesso alle zone in cui avviene la coltivazione. L'ingresso di queste ultime si trova sul lato corto della serra.
Il pavimento è realizzato in cemento armato di tipo RCK 35.

Di seguito è riportata un'immagine che dà idea dell'orientazione spaziale della serra in direzione est-ovest.

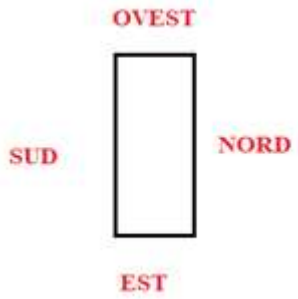


Figura 25: orientazione spaziale serra

Tale orientazione è stata scelta nell'ottica di ottimizzare la producibilità di un eventuale impianto fotovoltaico (la cui resa verrà valutata in seguito) sulla falda del tetto volta a sud e verrà mantenuta uguale in tutti i casi studio.
Anche se l'orientamento del colmo di una serra che corre da nord a sud è, nel corso dell'anno, più vantaggioso per la penetrazione della luce diretta (la quantità di luce diffusa che penetra nella serra è indipendente dalla sua orientazione), un orientamento della serra in direzione est-ovest lascia entrare più luce durante l'inverno, stagione che potrebbe risultare critica per la poca disponibilità di luce naturale **[49]**.

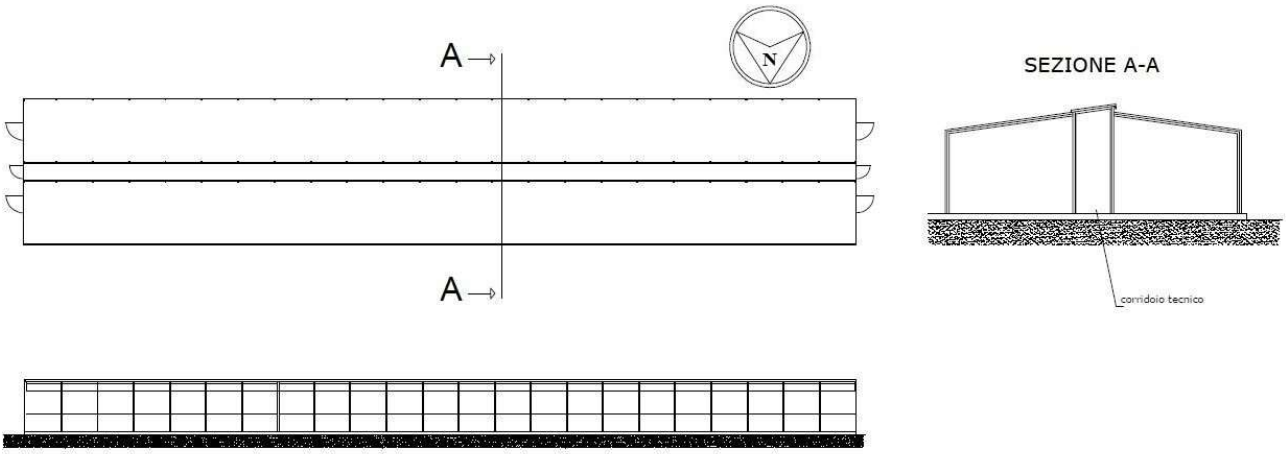


Figura 26: schema modello di serra considerato nello studio **[107]**

Tabella 7: dimensioni serra

Altezza parete	2	m
Altezza al colmo	2,5	m
Larghezza tot serra	8	m
Lunghezza serra	46	m
Larghezza corridoio tecnico	1	m
Larghezza singola zona coltivata	3,4	m
Inclinazione falde	8,4	°

Superficie disperdente N	92	m²
Superficie disperdente E	18,07	m²
Superficie disperdente O	18,07	m²
Superficie disperdente S	92	m²
Superficie tetto	362,61	m²
Superficie pavimento	368	m²
Perimetro pavimento	108	m
Volume totale	831,22	m³
Volume corridoio tecnico	127,42	m³
Volume totale zone coltivazioni	703,8	m³

Il volume della serra è volutamente minore rispetto alle serre tradizionali, lo scopo, infatti, è limitare il volume d'aria da trattare, ai fini di un miglior controllo sulla temperatura e sull'umidità e di una riduzione dei costi per la climatizzazione.

La seguente tabella riporta la stratigrafia di pareti e pavimento:

Tabella 8: stratigrafia

PARETI						
	spessore [m]	λ [W/(mK)]	U [W/(m² K)]	ρ [kg/m³]	c [kJ/(kg K)]	
Policarbonato alveolare	0,02	0,2	1,6	155		
TETTO						
	spessore [m]	λ [W/(mK)]	U [W/(m² K)]	ρ [kg/m³]	c [kJ/(kg K)]	
Policarbonato alveolare	0,02	0,2	1,68	155		
PAVIMENTO						
	spessore [m]	λ [W/(mK)]	U [W/(m² K)]	ρ [kg/m³]	c [kJ/(kg K)]	
Calcestruzzo	0,1	1,35	Calcolato secondo UNI 13370	2000	1	Da UNI 10351
Sabbia e ghiaia	0,2	2		1950	1,05	
TERRENO Sabbia e ghiaia		2				

5.2. Condizioni ambientali interne richieste

Prima di iniziare l'analisi dei casi studio è fondamentale stabilire quali debbano essere le condizioni climatiche interne da perseguire per creare un ambiente adatto allo sviluppo delle coltivazioni. Queste condizioni dipendono fortemente dalla tipologia di vegetali che si vogliono coltivare. Quindi, nell'ipotesi di coltivare baby leaf, come la lattuga, i parametri obiettivo da mantenere all'interno della serra saranno:
-CO_2 compresa tra 300 e 2000 ppm, ma il range ottimale sarebbe tra 1000 e 2000 ppm;
-umidità relativa, φ, possibilmente minore del 60%;
-temperatura interna diurna ottimale: 17-20°C;
-temperatura notturna ottimale 10-13°C;
-temperatura massima 25-30°C **[59]**;
Valori così precisi sono difficili da ottenere; più realisticamente, l'obiettivo sarebbe non scendere sotto i 16°C con φ pari, al massimo, al 60%, in inverno e non superare i 30°C con φ pari, al massimo, al 60%, in estate.

I dati di riferimento utilizzati nei calcoli successivi saranno, quindi:

Tabella 9: condizioni climatiche interne obiettivo nella stagione estiva e nella stagione invernale

OBIETTIVI				
	INVERNO		ESTATE	
T interna	20	°C	25	°C
ϕ interna	≤ 50	%	≤ 50	%

5.3. Condizioni critiche

Le principali problematiche riscontrate nella climatizzazione di una serra aeroponica sono legate al controllo della temperatura interna e, in particolare, dell'umidità relativa. Un buon impianto deve, quindi, riuscire a gestirle e a creare una loro distribuzione omogenea. Le scelte impiantistiche, di cui si parlerà nel successivo paragrafo, sono state dettate proprio da queste motivazioni.
Scendendo ad un livello di maggior dettaglio, gli obiettivi dell'impianto sono:

- mantenere valori di temperatura e umidità relativa nei limiti richiesti: per quanto riguarda la temperatura, i valori obiettivo si riescono ad ottenere installando macchine di taglia adeguata, ma, per evitare di adottare macchinari eccessivamente potenti, è necessario ricorrere ad un sistema di ombreggiamento. Esso, infatti, contribuisce passivamente al raffrescamento della serra, il quale diventa difficoltoso nelle calde giornate estive a causa della forte radiazione solare;

- mantenere adeguati livelli di $\boldsymbol{CO_2}$: le piante di una coltura aeroponica, così come quelle di una tradizionale coltivazione indoor, assorbono l'anidride carbonica disponibile nell'aria in breve tempo, di conseguenza è fondamentale fornire loro aria "nuova";

-corretto rinnovo dell'aria: è necessario fornire aria fresca e consentire la fuoriuscita dell'aria viziata, riducendo il pericolo che si sviluppino malattie all'interno della serra e, al contempo, evitando che agenti contaminanti entrino all'interno della serra. La soluzione consiste nell'adozione di ventilazione meccanica.

Tutto ciò deve essere considerato anche alla luce dell'aspetto economico. I margini di vendita delle coltivazioni aeroponiche sono ridotti; risulta, quindi, conveniente contenere i costi legati all'impianto di climatizzazione.

Per quanto riguarda le condizioni più critiche in cui può trovarsi ad operare l'impianto, si ricorda che, soprattutto nei pomeriggi estivi, l'umidità relativa all'interno della serra può superare facilmente il 60%.
Quando la temperatura esterna è molto elevata, è necessario raffrescare la serra e si possono verificare fenomeni differenti che hanno una comune soluzione: utilizzare due pompe di calore, una che raffreddi e l'altra che riscaldi l'aria raccolta nel corridoio tecnico, come se fossero una unità di trattamento aria.

Condizione 1: ventole di immissione attive e unità interne che danno raffrescamento, assenza del corridoio tecnico. L'aria esterna, ad esempio a 35°C e 50% di umidità relativa (punto E) entra in serra, viene raffrescata, la sottrazione di calore, siccome la temperatura del fluido refrigerante è inferiore alla temperatura di rugiada dell'acqua (18°C), comporta la condensazione di parte del vapore d'acqua contenuto nell'aria (da punto 2 a punto 3). Quindi l'aria trattata, esce dal condizionatore con U.R. pari al 100%, ma con un minor contenuto di vapore (punto 3). Dopo di che si mescola con l'aria interna, che si trova nelle condizioni del punto I. La miscela si porta nel punto M: è stato possibile diminuire la temperatura, ma l'umidità relativa è troppo elevata.

Soluzione 1: le ventole di immissione portano aria esterna all'interno del corridoio tecnico, metà delle unità interne la raffreddano e deumidificano fino a portarla nelle condizioni del punto 3, l'altra metà la riscalda fino a portarla nelle condizioni del punto 4. Dopo di che avverrà il miscelamento tra aria trattata ed aria interna (punto M'): i valori di temperatura e umidità ottenuti, pur non corrispondendo esattamente a quelli voluti, si avvicinano molto ad essi.
Quanto più si riesce a deumidificare grazie al raffreddamento (ovvero quando più piccola diventa l'umidità specifica all'uscita dell'unità interna, punto 3), meglio si riescono ad approssimare le condizioni ottimali.
Si precisa che le trasformazioni di raffreddamento con deumidificazione riportate di seguito, per semplicità, si avvalgono dell'ipotesi che lo scambiatore di raffreddamento abbia un numero infinito di ranghi.

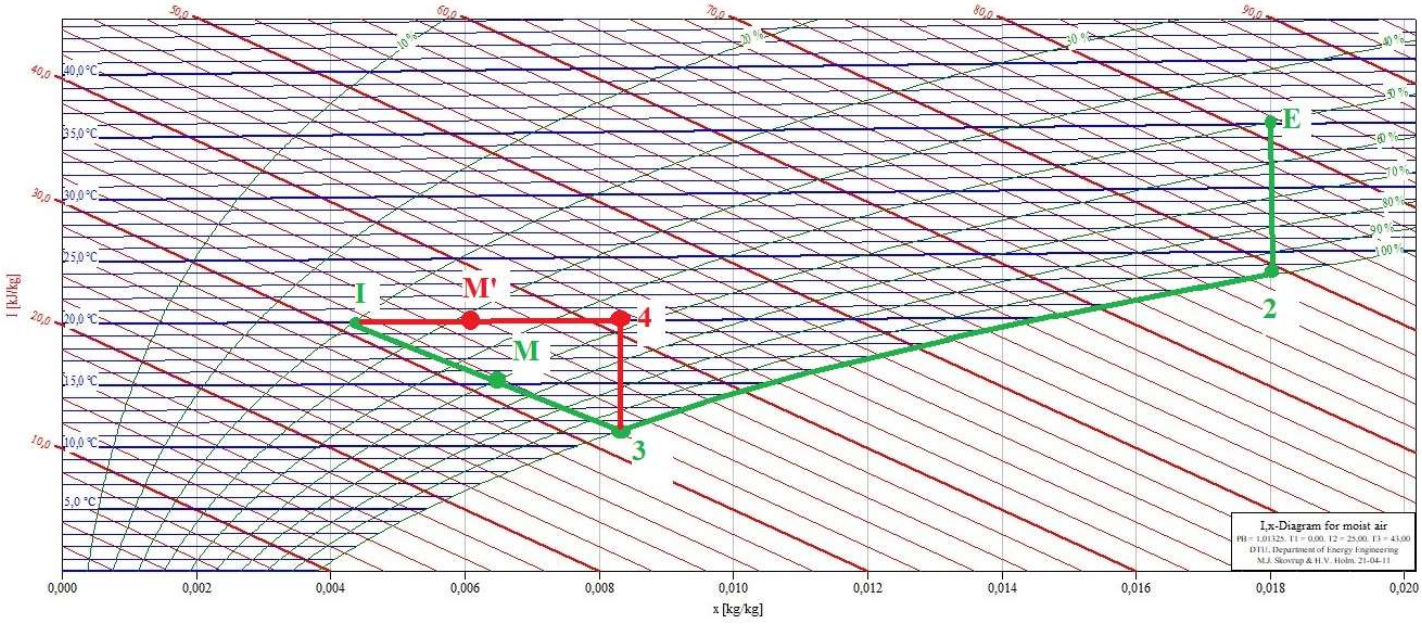


Figura 27: trasformazioni condizione 1

Soluzione 1 ottimale: le ventole di immissione portano aria esterna all'interno del corridoio tecnico, metà delle unità interne la raffreddano e deumidificano fino a portarla nelle condizioni del punto 3, l'altra metà la riscalda fino a portarla nelle condizioni del punto I, corrispondente alle condizioni interne volute.

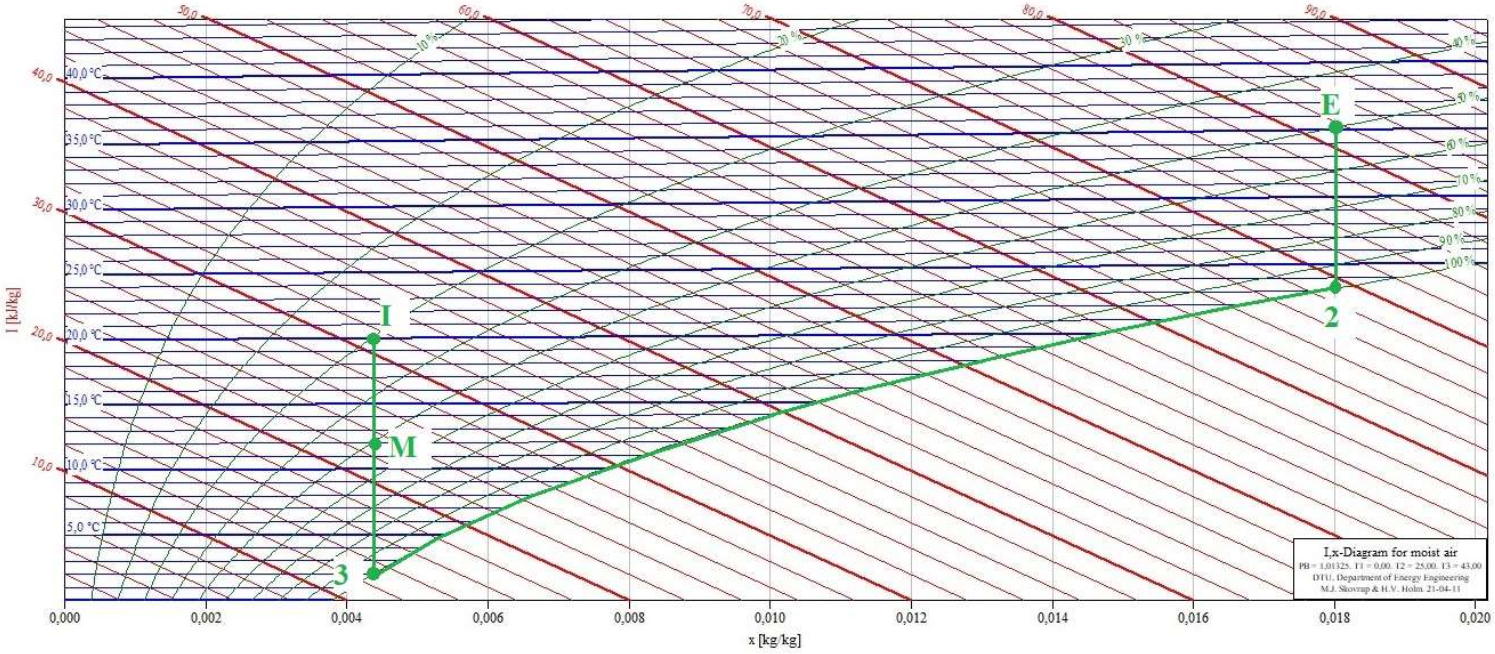


Figura 28: trasformazioni condizione 1 e soluzione ottimale

Condizione 2: ventole di immissione attive, le unità interne vengono disattivate perché la temperatura obiettivo è stata raggiunta, assenza del corridoio tecnico.
L'aria esterna entra nelle condizioni E, non viene trattata e si mescola direttamente con l'aria interna. La miscela si porta nel punto M, che si trova a temperatura e U.R. troppo elevate.

Soluzione 2: quando le ventole di immissione sono attive, mantenere sempre attive le unità interne funzionanti secondo la modalità descritta nella "soluzione 1".

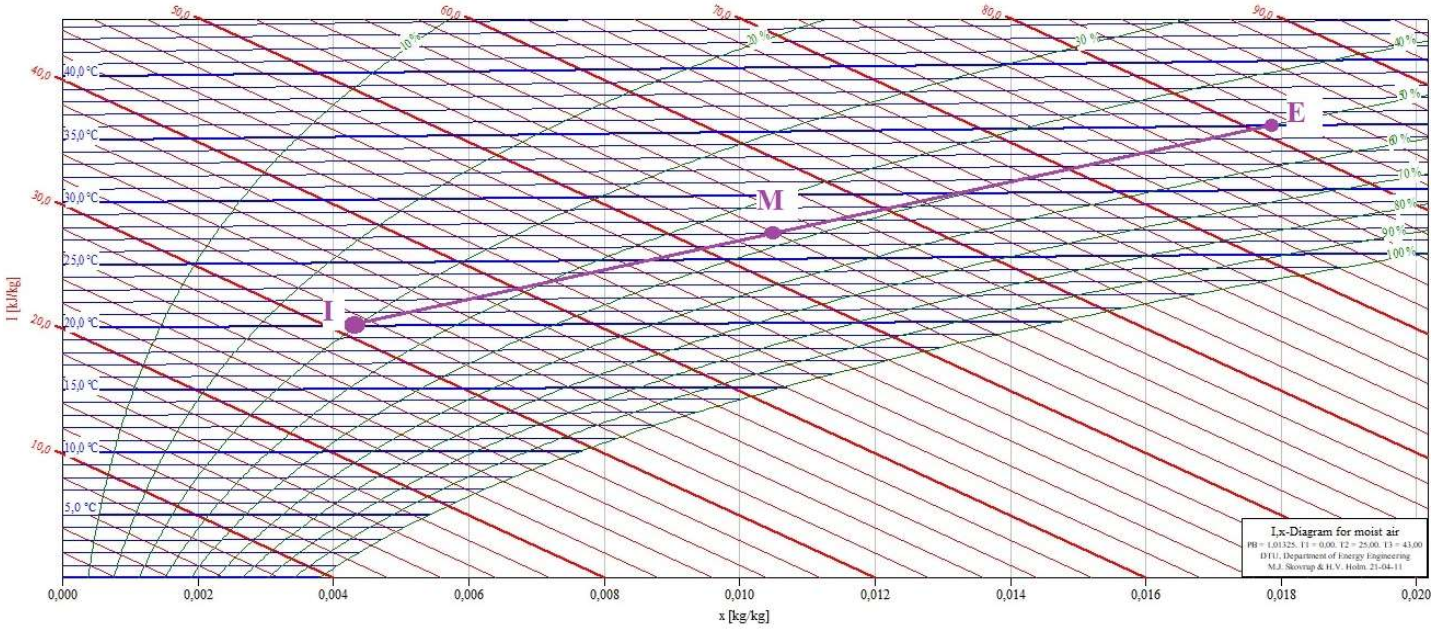


Figura 29: trasformazioni condizione 2

Condizione 3: temperatura esterna pari a 15-18 °C, pioggia, l'aria esterna è molto umida e non viene richiesto il riscaldamento.
Se l'aria esterna viene immessa in queste condizioni, si mescola con l'aria interna e la miscela si porta nel punto M, cui corrispondono temperatura e U.R. non accettabili per lungo tempo.

Soluzione 3: l'aria esterna viene immessa nel corridoio tecnico, viene raffreddata (punto 2) e deumidificata (punto 3) e poi riscaldata (da 3 a 4) fino alla temperatura interna richiesta. Il mescolamento tra l'aria interna e l'aria di rinnovo trattata, porta la miscela nel punto M', molto vicina alle condizioni interne desiderate.
Come si può notare dal diagramma riportato di seguito, quanto minore è l'umidità specifica in uscita dall'unità interna, tanto più il punto M' si avvicina alle condizioni interne volute. La condizione ottimale si ottiene quando l'umidità specifica raggiunge esattamente il valore corrispondente alle condizioni interne (punto 3').

In alternativa, per smaltire l'eccessiva umidità interna, si potrebbe evitare di immettere aria dall'esterno e ricircolare l'aria interna. Essa sarebbe fatta entrare nel corridoi tecnico, in cui sarebbe raffrescata, deumidificata e poi riscaldata come specificato precedentemente.

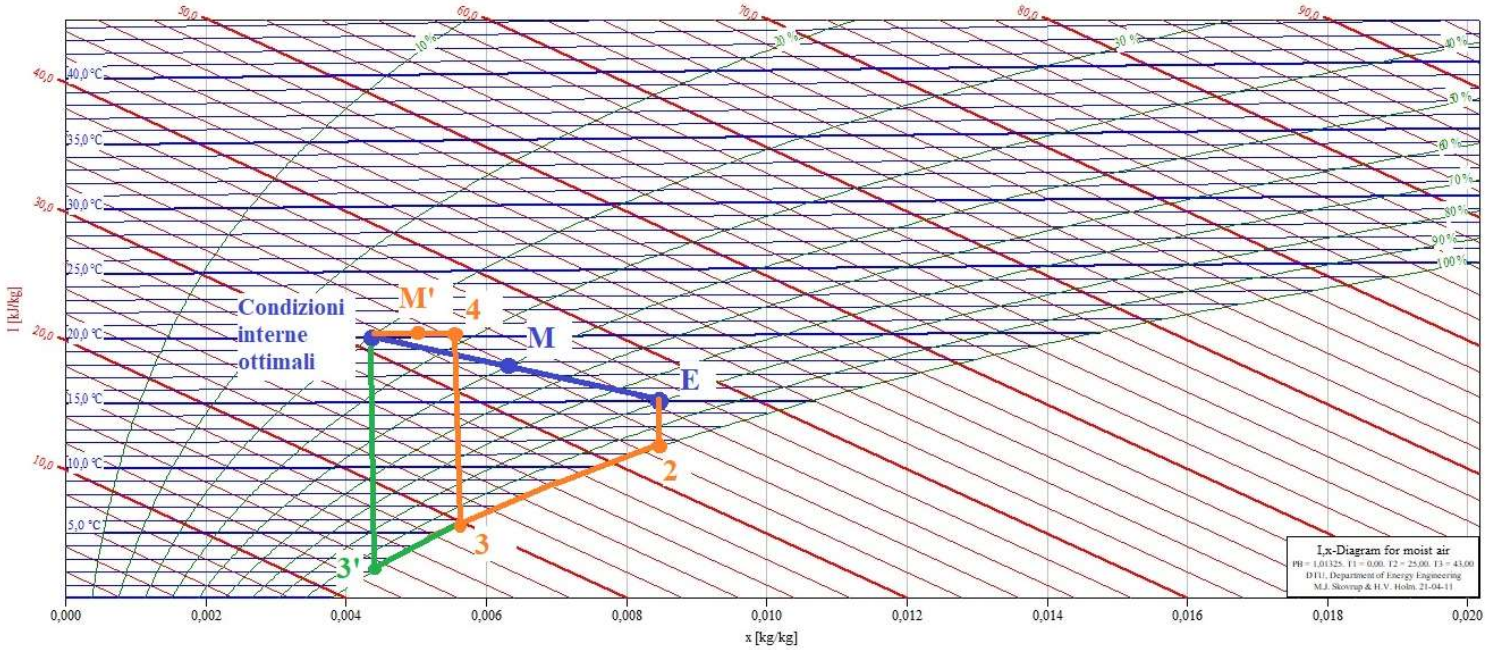


Figura 30: trasformazioni condizione 3

Condizione 4: temperatura esterna molto bassa, ad esempio intorno a 0°C e U.R. pari al 60%. Non viene immessa aria dall'esterno, mentre l'aria interna viene ricircolata e riscaldata; vi è il rischio che l'umidità si porti a valori elevati.

Soluzione 4: immettere aria esterna all'interno del corridoio tecnico, riscaldarla (con diminuzione della sua U.R.) fino ad una temperatura tale per cui, una volta mescolata con l'aria interna, le condizioni ambientali si avvicinino a quelle ottimali.

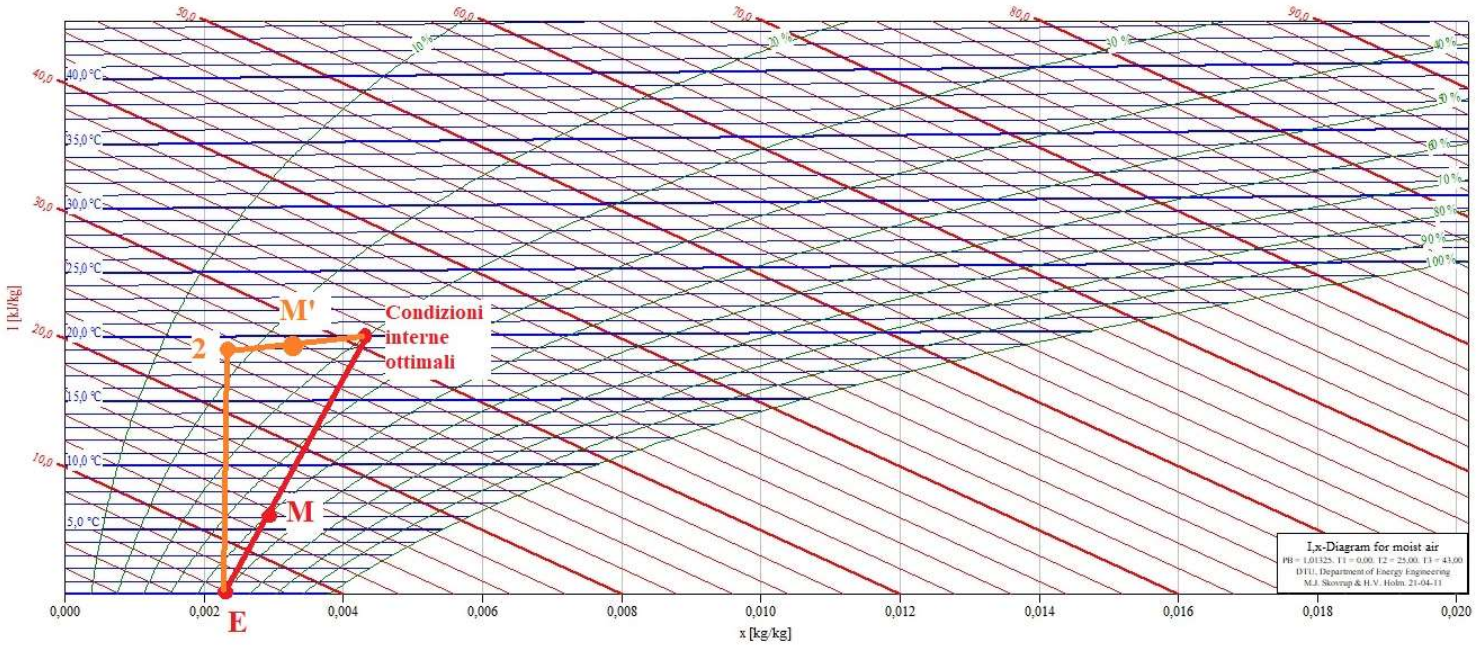


Figura 31: trasformazioni condizione 4

Precisazione su raffreddamento con deumidificazione

Rimuovendo l'ipotesi di numero infinito di ranghi, in condizioni reali, il fenomeno può essere spiegato ammettendo che solo una parte dell'aria che passa all'interno dello scambiatore, entri effettivamente in contatto con esso; ciò significa che una parte subirà la trasformazione 1-2-3, la restante parte si mescolerà (nelle condizioni 1) con l'aria trattata e la miscela si porterà nelle condizioni rappresentate dal punto 4.

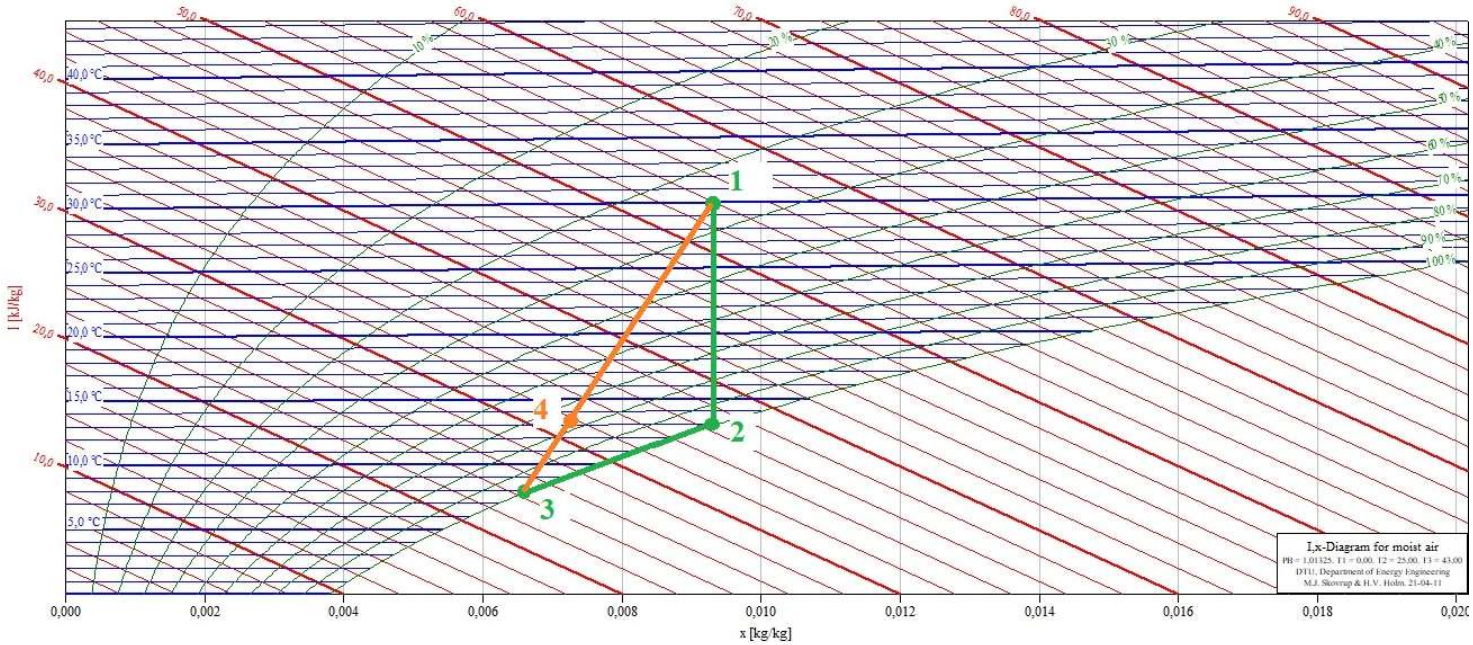


Figura 32: raffreddamento con deumidificazione

La frazione di aria che non è entrata in contatto con lo scambiatore viene detta "by-passata". Si può, inoltre, definire il fattore di by-pass (BF) come il rapporto tra il peso dell'aria by-passata e il peso totale dell'aria che attraversa la batteria di raffreddamento.

All'aumentare del numero di ranghi della batteria, il punto 4 si avvicina sempre più al punto 3 (situazione ideale). La temperatura corrispondente a questo punto prende il nome di punto di rugiada dell'apparecchio e corrisponde sia alla temperatura media della superficie della batteria, sia alle condizioni di uscita dell'aria da una batteria con BF pari a 0, così come alla temperatura del fluido di lavoro in uscita dallo scambiatore.

Il calore totale sottratto all'aria durante questo processo è la somma del calore sensibile, $\boldsymbol{q_s}$, legato alla differenza di temperatura, e del calore latente, $\boldsymbol{q_l}$, legato alla differenza di massa di vapore. Successivamente verrà illustrata la loro espressione (paragrafo 5.5.3.).

Tutti gli infiniti punti della retta congiungente i punti 1 e 3 sono in grado di neutralizzare contemporaneamente il carico latente e quello sensibile; inoltre, la portata d'aria di immissione è minima se l'aria entra in ambiente, dopo essere stata trattata, nelle condizioni corrispondenti al punto 3 **[108]**.

5.3.1. Osservazioni su gestione di climatizzazione e ventilazione

Riprendendo la condizione 1: se, dopo aver portato l'aria interna alla serra nelle condizioni del punto M, venissero fermate le ventole di immissione e l'aria interna venisse ricircolata, l'aria interna, che ora si trova nelle condizioni M (I ora coincide con M), verrebbe portata all'interno del corridoio tecnico, qui potrebbe venire riscaldata fino ad essere portata, ad esempio a 22°C. La T interna sarebbe accettabile come anche l'U.R.

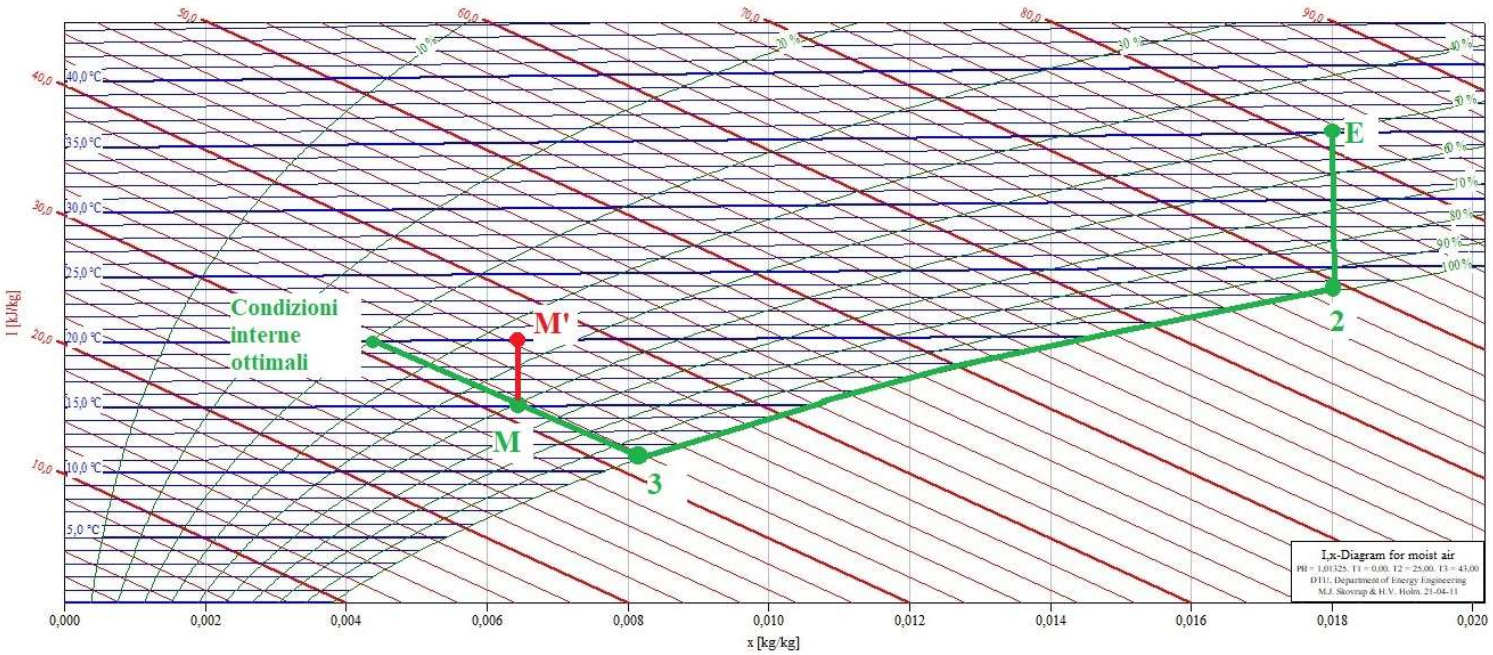


Figura 33: ricircolo aria interna e riscaldamento

Un'altra alternativa potrebbe consistere nel fermare i ventilatori di immissione, ricircolare l'aria interna (che si trova nelle condizioni del punto M), raffrescarla (2'), deumidificarla (3') e poi riscaldarla per portarla nelle condizioni ottimali richieste.

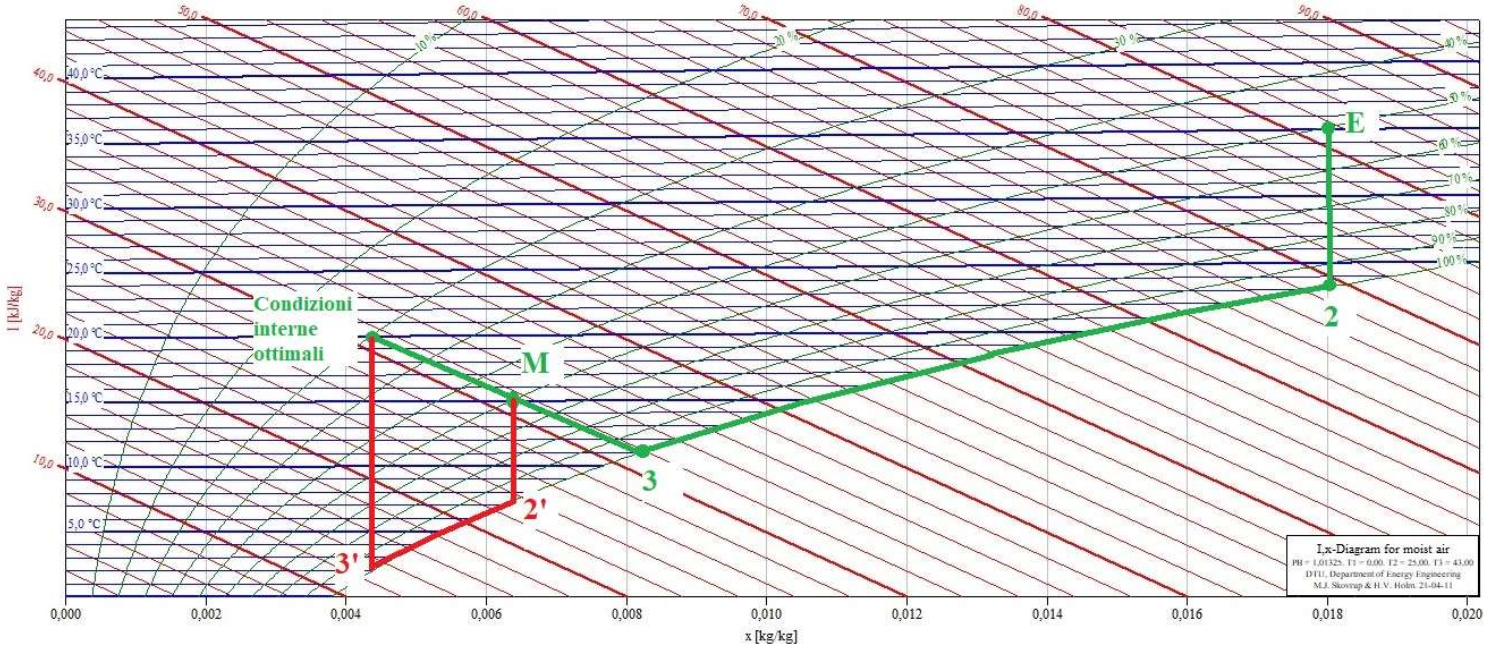


Figura 34: ricircolo aria interna, raffrescamento con deumidificazione e riscaldamento

5.4. Descrizione modello impianto di climatizzazione di riferimento

Un modo per risolvere le problematiche discusse precedentemente è realizzare un impianto che consenta di ottenere una buona omogeneità di temperatura, grazie ad una distribuzione uniforme dell'aria e in grado di ottimizzare il controllo dell'umidità.

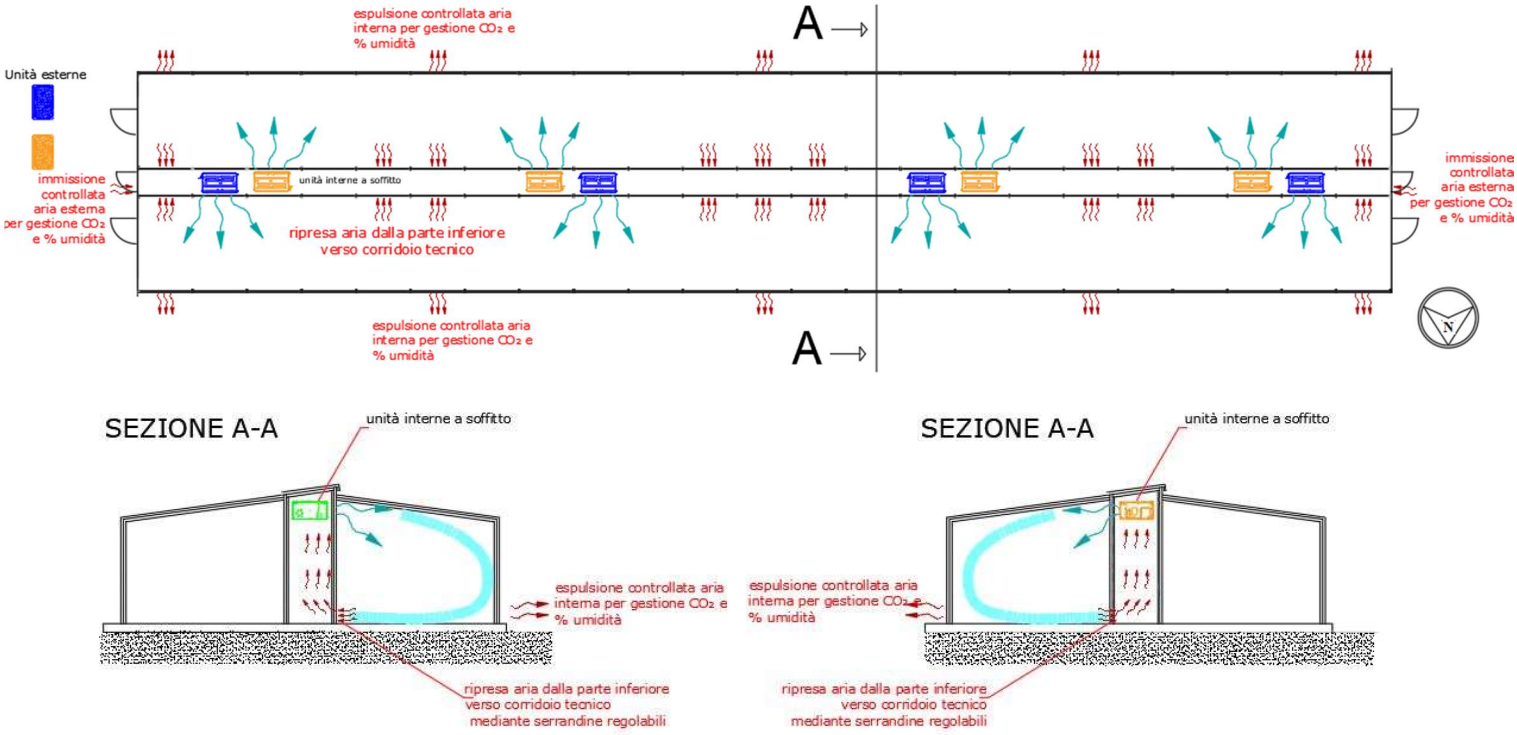


Figura 35: schema impianto di climatizzazione **[107]**

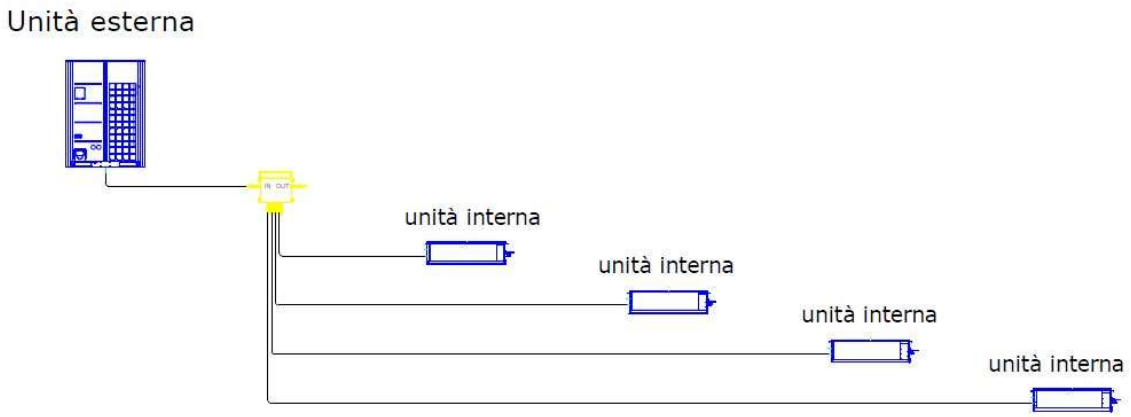


Figura 36: dettaglio collegamento unità esterna con unità interne **[107]**

L'impianto scelto è costituito da due pompe di calore di tipo Variable Refrigerant Flow (VRF), poste all'esterno della serra e collegate ciascuna, tramite un collettore, a quattro unità interne. Queste ultime sono installate a soffitto all'interno del corridoio tecnico e ognuna è provvista di un tubo di mandata e uno di ritorno, in cui fluisce il fluido frigorifero, che fanno capo al collettore della rispettiva unità esterna.
L'installazione di due pompe di calore consente di alimentare alcune unità interne in modalità riscaldamento e altre in modalità raffrescamento realizzando il processo che avviene all'interno di una vera e propria unità di trattamento aria; questo sistema presenta, inoltre, il vantaggio di assicurare una continuità di funzionamento in caso di danneggiamento di uno dei due dispositivi.

Per effettuare un attento controllo del clima interno, sono anche presenti sensori di temperatura e umidità. Sui valori da essi rilevati si basa la regolazione delle unità interne e dei ventilatori di immissione (quando impostati sulla modalità automatica).

Sono presenti ventilatori di immissione e di espulsione e serrandine regolabili le cui funzioni verranno descritte nel paragrafo 5.5.3.

Nel periodo estivo, un accorgimento essenziale è l'utilizzo di un sistema di ombreggiamento. Come detto precedentemente, i sistemi di ombreggiamento utilizzabili nelle serre aeroponiche sono gli stessi applicabili alle serre tradizionali e anche le funzioni sono analoghe, tranne quella di controllo degli insetti, infatti nelle serre aeroponiche non è prevista la possibilità di aprire la copertura.
È stato scelto un telo chiaro che trattiene/riflette il 60% di radiazione solare e si lascia attraversare dal restante 40%. È un sistema molto statico e viene montato all'incirca a partire da maggio e ri-avvolto nel mese di settembre.

5.5. Controllo del clima interno

5.5.1. Evapotraspirazione

Il dimensionamento dell'impianto di climatizzazione deve tenere in considerazione anche il calore latente prodotto dalle piante presenti all'interno della serra. Tale apporto non viene considerato in inverno, in modo da porsi nelle condizioni peggiori, esso infatti costituirebbe un

apporto positivo in grado di ridurre la richiesta di potenza per il riscaldamento.

Le piante producono vapore acqueo per traspirazione (analogamente alla respirazione umana) e ad esso si aggiunge quello prodotto per evaporazione dal terreno; l'acqua evapora da una superficie umida fin quando l'aria circostante non diventa satura e tale processo è tanto più veloce quanto è maggiore il VPD, ossia la differenza tra pressione di vapore della superficie da cui evapora l'acqua e quella dell'aria circostante.
Siccome l'acqua costituzionale della pianta è trascurabile rispetto all'evapotraspirazione, quest'ultima corrisponde al consumo idrico della coltura **[109]**.

Nel caso in esame, trattandosi di una coltura aeroponica, la componente di evaporazione non è presente, quindi, conoscendo la quantità d'acqua persa dalle piante, sarà possibile risalire al vapore da esse emesso.
Tale valore è influenzato da diversi fattori:
-specie vegetale: specie differenti, a parità di condizioni, consumano quantità diverse di acqua;
-stadio di crescita della pianta: una coltura nella fase di massimo sviluppo, consuma una maggiore quantità di acqua;
-numero di piante per metro quadrato: all'aumentare della densità di occupazione della superficie, aumenta il consumo idrico;
-dalla temperatura e umidità relativa interne alla serra: se l'umidità è troppo elevata, la pianta non riesce a traspirare, se è troppo bassa, la pianta emette troppo vapore e si affloscia.

La moltitudine di parametri da cui dipende l'evapotraspirazione rende difficoltosa la sua determinazione, tuttavia in letteratura si trovano alcune formule che permettono di calcolarla in modo approssimativo.

Innanzitutto, si calcola l'evapotraspirazione di riferimento ET_0, la sua unità di misura è, solitamente, millimetri d'acqua per unità di superficie e di tempo, ad esempio millimetri al giorno o all'anno ed è definita come la quantità d'acqua dispersa nell'atmosfera da una coltura standard in condizioni ottimali di disponibilità idrica **[110]**.

In particolare, si è scelto il metodo di Turc, che consente di calcolare la ET_0 media mensile in relazione alla temperatura media e alla radiazione solare globale **[109]**.

$$\boldsymbol{ET_0}\left(\frac{\boldsymbol{mm}}{\boldsymbol{mese}}\right) = \frac{\boldsymbol{C\,T}}{\boldsymbol{(T+15)}}\boldsymbol{(Rg+50)}$$

Dove:
-T è la temperatura media del mese considerato, ricavata dal prospetto 5 della normativa UNI 10349;
-Rg è la radiazione globale media del mese considerato espressa in cal/(cm²d), ricavata dal prospetto 6 della normativa UNI 10349 convertendo i J/(m²d) in cal/(cm²d);
-C è un coefficiente pari a 0.37 per febbraio e 0.40 per i restanti mesi.

In seguito, per tenere conto del tipo di coltivazione presente in serra, ET_0 viene moltiplicato per il coefficiente colturale K_c, i cui valori sono riportati in figura:

coltura	umidità relativa minima (%)			
	> 70		< 20	
	velocità vento (m/sec)			
	0-5	5-8	0-5	5-8
barbabietola z.	1,05-0,90	1,10-0,95	1,15-1,00	1,20-1,00
carciofo	0,95-0,90	0,95-0,90	1,00-0,95	1,05-0,10
carota	1,00-0,70	1,05-0,75	1,10-0,80	1,15-0,85
cavoli vari	0,95-0,80	1,00-0,85	1,05-0,90	1,10-0,95
cipolla	0,95-0,75	0,95-0,75	1,05-0,80	1,10-0,85
erba medica	1,05-0,50-0,85	—	1,15-0,40-0,95	1,25-0,30-1,05
fagiolo	1,05-0,30	1,10-0,30	1,15-0,25	1,20-0,25
girasole	1,05-0,40	1,10-0,40	1,15-0,35	1,20-0,35
lattuga	0,95-0,90	0,95-0,90	1,00-0,90	1,05-1,00
mais	1,05-0,55	1,10-0,55	1,15-0,60	1,20-0,60
melanzana	0,95-0,80	1,00-0,85	1,05-0,85	1,10-0,90
melone	0,95-0,65	0,95-0,65	1,00-0,75	1,05-0,75
pascolo	1,05-0,55-0,95	—	1,10-0,50-1,00	1,15-0,50-1,05
patata	1,05-0,70	1,10-0,70	1,15-0,75	1,20-0,75
peperone	0,95-0,80	1,00-0,85	1,05-0,85	1,10-0,90
pisello	1,05-0,95	1,10-1,00	1,15-1,05	1,20-1,10
pomodoro	1,00-0,45	1,05-0,45	1,10-0,45	1,15-0,45
prato di graminacee	1,05-0,60-0,80	—	1,10-0,55-0,90	1,15-0,50-1,00
prato misto	1,05-0,55-1,00	—	1,15-0,55-1,05	1,20-0,55-1,10
soia	1,00-0,45	1,05-0,45	1,10-0,45	1,15-0,45
sorgo	1,00-0,50	1,05-0,50	1,10-0,55	1,15-0,55

Due numeri: il 1° interessa il periodo che va dal ricoprimento del terreno all'inizio della maturazione; il 2° interessa la fase finale della coltura: per piante che producono organi vegetativi (es. bietola) od a produzione scalare (es. pomodoro) la seconda fase è molto più breve della prima.
Tre numeri: il 1° interessa la fase precedente lo sfalcio o il pascolamento; il 2° la fase seguente; il 3° è il K_c medio della coltura.

Figura 37: tabella dei coefficienti K_c **[111]**

Siccome la serra è chiusa e avendo previsto una ventilazione meccanica, la velocità del vento non ha influenza sulla coltura considerata, viene quindi posta pari a 0 m/s. L'umidità relativa è compresa tra i valori riportati in tabella, quindi il valore di K_c è stato determinato come valore medio di quelli tabellari riferiti alla lattuga. È stato ottenuto $K_c = 0{,}9375$.

Dalla formula $\boldsymbol{ET_{max} = K_c ET_0}$ si ottiene l'evapotraspirazione effettiva massima (minore di quella di riferimento) **[112]**.
L'ET effettiva è minore di quella massima, ma nei calcoli verrà adottato il valore ET_{max} in ottica cautelativa.

Ricordando che 1 mm di acqua è uguale a 1 L/m², considerando una estensione di 168 m² di coltivazione e che da 1 kg d'acqua si ottenga 1 kg di vapore, è stato possibile esprimere l'ET_{max} in chilogrammi di vapore al secondo.

Il risultato ottenuto corrisponde alla richiesta idrica massima di una coltura tradizionale, ma siccome la tecnica aeroponica consente un risparmio d'acqua pari al 90-95% **[1]**, la quantità effettiva d'acqua utilizzata è circa il 10% del valore calcolato.
Come affermato precedentemente, il valore risultante corrisponde anche alla portata di vapore immessa nell'ambiente interno dalle piante coltivate nella serra, espressa in kg/s, e verrà utilizzata per determinare l'umidità specifica che si vuole ottenere in uscita dallo scambiatore di ciascuna unità interna in condizioni di raffrescamento.

5.5.2. Stagione invernale

Durante la stagione invernale, quando la temperatura esterna diventa molto bassa, il calore contenuto all'interno della serra tende ad uscire. Se questa perdita di calore non venisse contrastata, internamente si raggiungerebbero temperature non accettabili per la crescita delle piante.

I modi con cui il calore si trasferisce sono conduzione, convezione e irraggiamento.

La conduzione avviene a causa dei gradienti di temperatura esistenti all'interno di un corpo solido e comporta lo spostamento dell'energia termica dalla regione più calda a quella più

fredda. La potenza trasferita è pari a:

$$\boldsymbol{Q = \frac{\lambda}{L} A\,(T_1 - T_2)} \quad [\boldsymbol{W}]$$

dove:

- $\boldsymbol{\lambda}$ è la conduttività termica del corpo $\left[\frac{W}{mK}\right]$;
- L è lo spessore del materiale [m];
- A è la sezione attraverso cui si propaga il calore [m²];
- $T_1 - T_2$ è la differenza di temperatura tra le regioni tra cui si trasferisce il calore [K].

La quantità di calore disperso per conduzione attraverso le pareti, il tetto e il pavimento, dipende essenzialmente dal materiale con cui è stato realizzato l'elemento oggetto di indagine.

Nel caso specifico del flusso di calore disperso verso il terreno, il calcolo è stato seguito seguendo il procedimento specificato dalla normativa UNI 13370.

Il fenomeno di trasferimento di calore tramite convezione consiste nello scambio termico tra un solido e un fluido in contatto con esso:

$$\boldsymbol{Q = h\,A\,(T_1 - T_2)} \quad [\boldsymbol{W}]$$

dove:

- h è il coefficiente convettivo o liminare $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$;
- A è la superficie del corpo a contatto con il fluido [m²];
- $T_1 - T_2$ è la differenza di temperatura tra il solido e il fluido [K].

Infine, il calore può essere disperso anche per irraggiamento: l'entità di questa dispersione dipende dalla capacità del materiale di copertura di trattenere all'interno della serra le radiazioni ri-emesse dalle piante.
Inoltre, dipende dal rapporto volume della serra/superficie coperta, se esso è elevato, la temperatura non subisce brusche variazioni e la caduta termica notturna resta contenuta siccome vi è una maggiore massa d'aria che fa da regolatrice della temperatura stessa **[25]**.

Ai fini del dimensionamento dell'impianto di climatizzazione, si vuole individuare la condizione peggiore in cui esso può trovarsi ad operare, di conseguenza il calore trasferito per irraggiamento non viene considerato, essendo un apporto di calore entrante nella serra; così come non vengono considerati i carichi endogeni (calore latente prodotto dai processi fisiologici delle piante).

Un termine, invece, da non trascurare è il calore necessario per riscaldare l'aria in ingresso nella serra, detto carico di ventilazione:

$$\boldsymbol{Q_{ventilazione} = \rho_{aria} \cdot G_{rinnovo} \cdot c_{p,aria} \cdot (T_i - T_e)} \quad [\boldsymbol{W}]$$

Dove:
-ρ_{aria} è la densità dell'aria 1,2 [kg/m³];
-$G_{rinnovo}$ è la portata di rinnovo espressa in [m³/s];
-$c_{p,aria}$ è il calore specifico medio dell'aria 1006 [J/(kgK)];
-T_i e T_e sono rispettivamente la temperatura interna ed esterna alla serra.

Non avendo previsto un'unità di trattamento aria, la portata di rinnovo viene riscaldata fino alla temperatura interna desiderata, ma non può essere umidificata per essere portata esattamente alla umidità relativa di progetto.

5.5.3. Stagione estiva

Il raffrescamento è l'aspetto più problematico nella gestione del clima di una serra aeroponica (vedasi paragrafo 5.3.).

Il corridoio tecnico, al cui interno si trovano le unità interne delle pompe di calore, pur non essendo una vera e propria unità di trattamento aria si comporta come se fosse una UTA che elabora la portata di aria esterna di rinnovo e la portata di aria interna ricircolata.

Si prevede che l'impianto possa lavorare in modalità diverse, ovvero:
-che il totale di aria trattata dalle unità interne sia in parte aria di rinnovo e in parte aria di ricircolo;
-che le unità interne trattino solo aria esterna di rinnovo.
Di conseguenza, per valutare la potenza richiesta per il raffrescamento ponendosi nelle condizioni peggiori, si considera che tutta l'aria elaborata sia prelevata dall'esterno; infatti, la temperatura dell'aria esterna sarà sicuramente più elevata di quella dell'aria interna alla serra.

La potenza necessaria per il raffrescamento dovrà abbattere il carico di ventilazione (in cui viene anche compreso il carico latente dovuto alla traspirazione delle piante) e il carico termico sensibile dovuto all'interazione tra il locale considerato e l'esterno, Q_S:

$$\boldsymbol{Q_{raff} = Q_{ventilazione} + Q_S \ [W]}$$

Si precisa che il carico di ventilazione sia presente solo nelle ore del giorno in cui le ventole sono attive, ovvero dalle 5:00 alle 23:00.

Il carico termico Q_S, dovuto alla radiazione solare e alla conduzione attraverso le pareti, è stato calcolato utilizzando il metodo delle funzioni di trasferimento tratto dal testo Alfano, Filippi, Sacchi "Impianti di climatizzazione per l'edilizia" ed. Masson.
Il metodo consiste nel "trasferire" la somma dei contributi degli accumuli di energia nelle ore precedenti all'ora considerata.

Il primo termine che viene determinato è la radiazione che attraversa le lastre di policarbonato:

$$\boldsymbol{Q_s = \sum_{n=1}^{n=numero\ pareti} f_s \cdot S \cdot C_{ombra} \cdot I_g \quad [W]}$$

Dove
- fs è la frazione soleggiata: posta uguale a 1 in quanto si considera che non vi siano ostacoli intorno alla serra che possano creare ombre;

- C_{ombra} è il coefficiente di ombreggiamento, detto anche fattore di riduzione solare ed è definito come:

$$C_{ombra} = \frac{I_{g,con\ ombreggiante}}{I_{g,senza\ ombreggiante}}$$

A numeratore si trova la radiazione solare incidente sulla superficie in presenza di elementi schermanti e a denominatore la radiazione solare che inciderebbe in assenza di tali elementi; quindi, ad esempio, se nel periodo estivo si prevedesse l'installazione di un telo ombreggiante che ostacola il passaggio del 60% della radiazione solare, il C_{ombra} sarebbe pari a 0,4 perché la

$I_{g,con\ ombreggiante}$sarebbe il 40% della $I_{g,senza\ ombreggiante}$;

- I_g è la radiazione solare trasmessa dalle lastre di policarbonato [W/m²]: siccome in normativa non sono presenti i valori riferiti al policarbonato, essi sono stati ottenuti partendo da quelli contenuti nella UNI 10349, relativi al vetro semplice, e sono stati trasformati per tenere conto della capacità di trasmissione della radiazione propria del policarbonato (0,78 % come dichiarato dai dati tecnici, contro 0,89 % del vetro semplice)

$$\boldsymbol{I_{g,policarbonato} = \frac{I_{g,vetro} \cdot 0,78}{0,89}}$$

Il calore non viene trasferito nell'ambiente interno solo a causa della radiazione solare, ma anche della differenza di temperatura tra interno ed esterno, il fattore correttivo f_r permette di non trascurare questo aspetto:

$$\boldsymbol{f_r = 1 - 0,248 \cdot K_m + 0,025 \cdot {K_m}^2}$$

K_m $[W/(m^2K)]$ è la trasmittanza media dell'ambiente, ovvero la media ponderata di tutte le trasmittanze delle pareti che delimitano la serra, pesate tramite le rispettive superfici.

È necessario, inoltre, determinare le funzioni di trasferimento *u* e *u'* da tabelle riportate in normativa UNI 10349.

Si può ora calcolare il carico termico trasmesso tramite le pareti:

$$\boldsymbol{Q_C = f_r \cdot \sum_{z=1}^{24} u_z \cdot Q_{s,k} \quad [W]}$$

Con k=ora-z+1 se ora-z+10 e k=24+(ora-z+1) se ora-z+1≤0.

I carichi endogeni possono essere trascurati perché le persone occupano saltuariamente la serra e i macchinari in essa contenuti non danno apporto termico rilevante.

Invece, per calcolare $Q_{ventilazione}$, innanzitutto è necessario determinare il valore di umidità specifica che si vuole ottenere in uscita dallo scambiatore dell'unità interna, x_U , in modo da controllare il carico sensibile e latente relativo all'ingresso dell'aria di rinnovo e anche il carico latente endogeno legato alla traspirazione delle piante. Esso è stato calcolato tramite la relazione:

$$\boldsymbol{x_U = x_I - \frac{G_{vapore}}{G_{aria}} \quad [\frac{kg_{vap}}{kg_{aria}}]}$$

Dove la G_{vapore} è stata ottenuta seguendo il procedimento descritto nel paragrafo 5.5.1., x_I è l'umidità specifica corrispondente alle condizioni interne richieste e G_{aria} è la portata d'aria di rinnovo.

Tracciando nel diagramma di Mollier la verticale passante per x_U, si individua, nell'intersezione con la curva di saturazione, il punto che corrisponde alle condizioni dell'aria in uscita dall'unità interna nel caso ideale in cui tutta l'aria che entra in essa, venga in contatto con i tubi in cui scorre il fluido frigorifero. Questa ipotesi viene adottata in quanto non si conosce il fattore di by-pass dello scambiatore dei terminali interni; se l'ipotesi venisse rimossa, l'entalpia dell'aria in uscita dal terminale interno sarebbe maggiore e quindi la potenza necessaria per il trattamento dell'aria sarebbe minore.

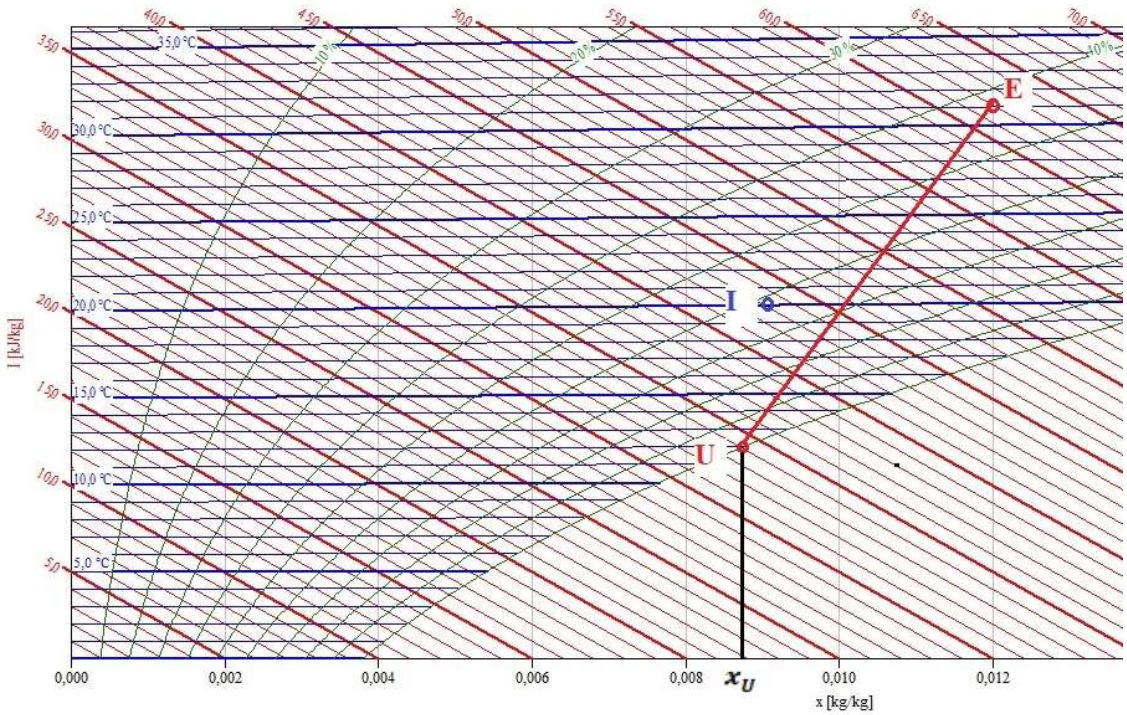


Figura 38: trasformazione di raffrescamento dell'aria di rinnovo

Dopo aver determinato l'entalpia in uscita dai terminali interni, conoscendo l'entalpia relativa alle condizioni esterne, è possibile calcolare la potenza necessaria a controllare il carico legato all'aria di rinnovo e il carico latente endogeno:

$$\boldsymbol{Q_{ventilazione} = G_{aria}(h_U - h_E)}$$

Durante il raffrescamento si ha anche deumidificazione; è, quindi, necessario distinguere il calore sensibile da quello latente. Su di essi sarà basata la scelta della taglia dell'unità interna:

$$\boldsymbol{Q_{vent,sensibile} = c_{p,aria}\, G_{aria}(T_E - T_U)\ [W]}$$

$$\boldsymbol{Q_{vent,latente} = r_0\, G_{aria}(x_E - x_U)\ [W]}$$

Dove:
-$c_{p,aria}$è il calore specifico medio dell'aria 1006 [J/(kgK)];
-G_{aria} [kg/s] è la portata di aria trattata;
-r_0 è il calore latente di evaporazione dell'acqua 2500000 [J/Kg];
-T_E *e* x_E sono temperatura e umidità specifica relative alle condizioni dell'ambiente esterno;
-T_U *e* x_U sono temperatura e umidità specifica relative alle condizioni dell'aria in uscita dall'unità interna.

La parte latente è legata alla differenza tra le masse di vapore, la parte sensibile alla differenza tra le temperature.

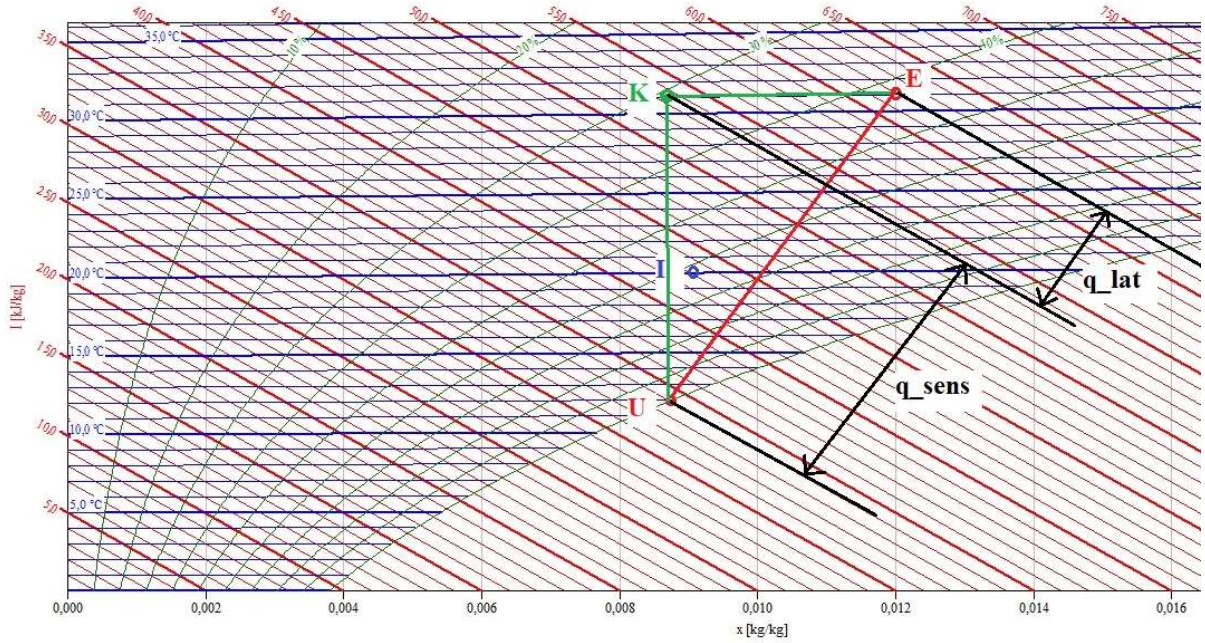


Figura 39: rappresentazione di calore sensibile e latente

Osservazione
Le pompe di calore vengono mantenute attive per tutto l'arco dell'anno, ma, sia in condizioni invernali, sia in condizioni estive, così come durante la "mezza stagione", le unità interne possono essere impostate sulla modalità automatica: da computer viene scelta una certa temperatura e i terminali interni modificano il loro funzionamento in modo da raggiungerla. Questo consente un'ottimizzazione dei consumi dell'impianto.

Inoltre, se il miscelamento tra aria in uscita dalle unità interne e aria presente in serra, non fosse sufficiente all'ottenimento del valore di umidità relativa e di temperatura volute, sarebbe possibile azionare alcune unità interne in modalità riscaldamento, come illustrato nel paragrafo 5.3.

5.5.4. Ventilazione controllata

La ventilazione di una serra può avere il duplice scopo di contribuire al controllo delle condizioni climatiche interne e di riportare la CO_2 ai livelli adeguati per il corretto sviluppo delle coltivazioni.

Le colture aeroponiche, richiedendo un preciso controllo della temperatura e dell'umidità e avendo le radici esposte all'aria, necessitano di un sistema di ventilazione controllato ed efficace. Per questo motivo la scelta è ricaduta sulla ventilazione forzata, prevedendo anche il ricircolo dell'aria interna, essenziale per mantenere la temperatura dell'aria entro certi limiti.

L'aria di rinnovo entra, tramite apposite ventole di immissione posizionate sui lati corti della serra, all'interno del corridoio tecnico (e non direttamente nella zona in cui si svolge la coltivazione). Qui può essere trattata o passare direttamente nelle zone della serra in cui si svolge la coltivazione, tramite bocchette poste nella parte alta delle pareti del corridoio tecnico. L'estrazione dell'aria "viziata" avviene, invece, tramite ventilatori di estrazione posti nella parte bassa delle pareti esterne della serra.

È prevista anche la possibilità di ricircolare l'aria interna: il corridoio tecnico, essendo in depressione (le unità interne attirano verso di sé l'aria), richiama l'aria presente nelle serra, essa transita tramite le apposite serrandine regolabili poste nella parte inferiore delle pareti del corridoio tecnico, entra al suo interno e viene raffrescata o riscaldata o, semplicemente movimentata.
Le serrandine regolabili sono poste all'incirca a metà della distanza tra due terminali interni, in modo da creare moti dell'aria che permettano di uniformare la temperatura interna.
Inoltre, essendo posizionate all'interno della "zona stagnate" in cui non giunge l'aria appena trattata, quando si effettua il ricircolo viene aspirata l'aria più calda in fase di raffrescamento e l'aria più fredda in fase di riscaldamento **[108]**.

La rappresentazione di come avviene la ventilazione meccanica è riportata nel paragrafo 5.4.

Siccome l'immissione d'aria è controllata, il vento non ha influenza sulla portata di rinnovo.

Dal momento che le normative non riportano il valore di ricambi orari consoni al mantenimento delle condizioni ottimali all'interno di una serra, essi sono stati scelti in base all'esperienza diretta: dai 10 ai 12 volumi all'ora è un valore che permette di gestire sia il riscaldamento sia il raffrescamento, rendendo uniforme la temperatura.

Tuttavia la ricerca dei valori ottimali è ancora aperta e legata intrinsecamente alla gestione dell'impianto di climatizzazione, nell'ottica, sempre, di un risparmio energetico.

5.5.5. Fotovoltaico

La scelta di pompe di calore come generatori di energia per la climatizzazione porta inevitabilmente a domandarsi se sia possibile produrre l'energia elettrica necessaria al loro funzionamento sfruttando energie rinnovabili. La prima soluzione a cui si può pensare è il fotovoltaico.
Esso risulterebbe appropriato per l'installazione sulla copertura della serra in quanto sarebbe posto in luogo fortemente irradiato dai raggi solari (necessari allo sviluppo delle colture), fornirebbe ombreggiamento e produrrebbe energia che potrebbe rendere la serra indipendente dalle altre fonti di energia.
Recenti studi hanno dimostrato come l'utilizzo di pannelli semitrasparenti abbia effetti benefici sulla crescita di lattuga, pomodori, rucola selvaggia e cipolla gallese **[76]**.

La possibilità di variare l'inclinazione e l'orientazione dei pannelli consentirebbe di sfruttare al massimo la radiazione solare disponibile, in tutti i mesi dell'anno, ma nel caso di serre aeroponiche, data l'esigenza di creare un ambiente chiuso, non è possibile rendere mobili i moduli fotovoltaici se essi sono posti in sostituzione alle lastre di copertura della serra stessa.

Si è, quindi, deciso di studiare la potenzialità di produzione di energia elettrica data dalla sostituzione di alcune lastre in policarbonato della falda esposta a sud del tetto della serra con pannelli fotovoltaici semitrasparenti che forniscano il 60% di ombreggiamento (stessa percentuale data dal telo di ombreggiamento scelto per le analisi, vedasi capitolo 5.5.3.).

Volendo ottimizzare la quantità di energia mediamente captata in un anno, sarebbe necessario adottare un orientamento sud e un'inclinazione dei pannelli fotovoltaici pari alla latitudine meno 10°; se si volesse ottimizzare l'energia captata durante i soli mesi estivi l'inclinazione dovrebbe essere pari alla latitudine meno 20°-30°; in inverno, invece, si dovrebbe utilizzare un

angolo di inclinazione pari alla latitudine più 10-15° **[25]**.
Tuttavia, installando i moduli in sostituzione alle lastre delle falde del tetto, la loro inclinazione è uguale a quella della falda stessa, ovvero 8,4°.

La progettazione di un impianto fotovoltaico necessita di un'analisi delle caratteristiche di soleggiamento del luogo dove l'impianto verrà installato; ma, in via preliminare, è possibile eseguire una progettazione basata su dati medi mensili o annuali **[113]**.

L'obiettivo, in questo caso, è la valutazione dell'energia elettrica prodotta mensilmente dal sistema fotovoltaico.
Il metodo di calcolo adottato è quello riportato nella normativa UNI TS 11300-4:

$$\boldsymbol{E_{el,pv,out} = E_{pv} \cdot W_{pv} \cdot \frac{f_{fv}}{I_{ref}}} \quad [\boldsymbol{kWh/mese}]$$

Dove:
-$E_{el,pv,out}$ è l'energia elettrica prodotta mensilmente;
-E_{pv} è l'irradiazione solare mensile incidente sull'impianto fotovoltaico [kWh/m^2]; essa è stata ricavata dai valori medi contenuti nei data base del sito PVGIS;
-f_{fv} è il fattore di efficienza del sistema che tiene conto dell'efficienza dell'impianto fotovoltaico integrato nell'edificio e dipende dall'impianto di conversione da corrente continua a corrente alternata, della temperatura operativa reale dei moduli e dall'integrazione nell'edificio dei moduli stessi. Nel caso di moduli non ventilati è pari a 0,70;
-I_{ref} è l'irradianza solare di riferimento pari a 1 kWh/m^2.

I calcoli sono stati effettuati considerando come riferimento i dati tecnici del modulo fotovoltaico VE136PVTTFL prodotto da VGS. I moduli presentano 36 celle in silicio policristallino e sono privi di cornice; i dati tecnici sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 10: caratteristiche modulo fotovoltaico

Lunghezza	1640 mm	Efficienza	9,29 %
Larghezza	985 mm	Tensione a circuito aperto	22,58 V
Potenza di picco	150 Wp	Corrente di cortocircuito	8,83 A
Numero celle	36	Tensione alla max. potenza	18,68 V
Dimensioni cella	156,75 mm x 156,75 mm	Corrente alla max. potenza	8,25 A

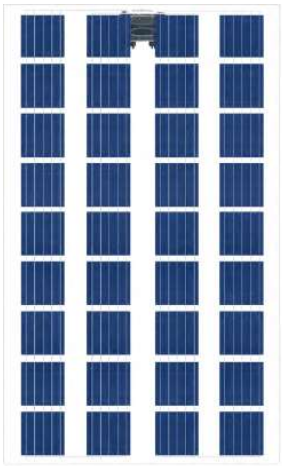


Figura 40: modulo semitrasparente VE136PVTTFL

È stato pensato di disporre 2 file di 46 moduli sulla falda Sud, per un totale di 92 pannelli fotovoltaici:

Tabella 11: caratteristiche installazione moduli fotovoltaici

Orientamento dei pannelli (azimut)	Sud (0°)
Inclinazione dei pannelli (tilt)	8,4°
Superficie di captazione	$81{,}8\ m^2$
Potenza di picco dell'impianto	13,8 kWp
Grado di ventilazione	Moduli non ventilati

Dove:

-la superficie di captazione è stata ottenuta come prodotto tra l'area di una cella e il numero totale di celle presenti sulla falda:

$$Area_{captazione} = Area_{cella} \cdot numero_{celle\ in\ 1\ modulo} \cdot numero_{moduli} = 0{,}02457 \cdot 36 \cdot 92 = 81{,}8\ m^2$$

-la potenza di picco dell'impianto rappresenta la potenza elettrica di un impianto fotovoltaico di una determinata superficie, per una irradianza di 1 kW/m² incidente sui moduli che costituiscono l'impianto (a 25°C) ed è pari al prodotto tra la potenza di picco di 1 modulo dichiarata dal produttore e il numero di moduli installati:

$$potenza_{\ picco\ impianto} = potenza_{\ picco\ 1\ modulo} \cdot numero_{moduli} = 150 \cdot 92 = 13800\ Wp = 13{,}8\ kWp$$

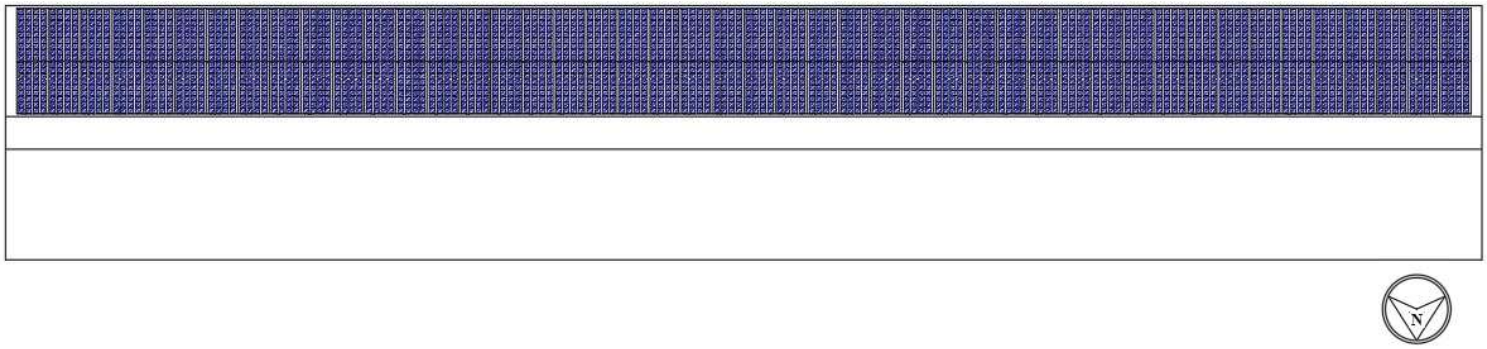


Figura 41: impianto fotovoltaico

Occorre precisare che il metodo di calcolo adottato non tiene conto dell'energia termica prodotta dall'impianto fotovoltaico, del consumo degli ausiliari elettrici e delle perdite di generazione.

Per ottenere risultati più precisi, è stato utilizzato il calcolatore disponibile nel sito PVGIS: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/it/#PVP .

I risultati ottenuti tramite tale strumento sono riportati nei paragrafi relativi a ciascun caso studio.
I dati inseriti nel software sono i seguenti:
-posizione geografica della serra;
-tipologia di cella fotovoltaica: silicio cristallino;
-potenza di picco dell'impianto: 13,8 kWp;
-perdite del sistema: 14%: valore cautelativo che comprende tutte le perdite nell'impianto che riducono l'energia resa alla rete elettrica rispetto all'energia prodotta dai moduli, come le perdite

resistive nei cavi, le perdite nell'inverter, polvere o neve, invecchiamento dei moduli (con il trascorrere del tempo la potenza prodotta dai moduli tende a diminuire, per questo motivo la resa media calcolata per tutta la vita dell'impianto è minore della resa nei primi anni).

5.6. Calcolo dei costi di esercizio

Dopo aver determinato le taglie dei dispositivi che compongono l'impianto (pompe di calore, terminali interni, ventilatori di immissione ed estrazione e moduli fotovoltaici), scelto i modelli dai cataloghi dei costruttori e calcolato il costo totale relativo al loro acquisto, si procede con la determinazione dei costi d'esercizio.

I principali costi legati alla gestione dell'impianto sono dovuti all'energia elettrica necessaria per il funzionamento delle pompe di calore, dei ventilatori dei terminali interni e delle ventole di immissione ed estrazione.

Considerando un costo medio dell'energia elettrica di 0,2 €/kWh **[114]**, comprensivo di oneri e imposte, è possibile calcolare il costo d'esercizio totale come prodotto tra l'energia consumata totale e il prezzo di ogni kWh:

$$\boldsymbol{Costo\ esercizio}\ [€] = \boldsymbol{prezzo\ energia}\left[\frac{€}{\boldsymbol{kWh}}\right] \cdot \boldsymbol{consumo\ energia}\ [\boldsymbol{kWh}]$$

Il consumo di energia si ottiene dal prodotto tra la potenza richiesta e il periodo di tempo, espresso in ore, in cui si ha quella richiesta:

$$\boldsymbol{Consumo\ energia}\ [\boldsymbol{kWh}] = \boldsymbol{potenza\ richiesta}\ [\boldsymbol{kW}] \cdot \boldsymbol{tempo}[\boldsymbol{h}]$$

L'installazione di un impianto fotovoltaico riduce la spesa annuale per l'energia elettrica. Tale riduzione può essere calcolata sottraendo all'energia elettrica consumata (per il funzionamento di pompe di calore e ventilatori) l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico e moltiplicando il valore ottenuto per il costo dell'energia elettrica.

Se questa differenza dovesse essere negativa significherebbe che parte dell'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico non sarebbe utilizzata per alimentare l'impianto di climatizzazione; potrebbe quindi essere usata per altri scopi sempre all'interno dell'azienda o immessa in rete.

Capitolo 6. Casi studio

Lo studio delle prestazioni garantite dall'impianto di climatizzazione previsto si articola nel calcolo delle potenze di riscaldamento e di raffrescamento necessarie al mantenimento delle condizioni climatiche volute all'interno della serra.
A tal fine, il modello di serra comprensivo di impianto di climatizzazione precedentemente descritto verrà posizionato a tre diverse latitudini: Torino (45°), Grosseto (42°), Messina (38°).

In tutti i casi, per quanto riguarda la climatizzazione estiva, in un primo momento si considera l'installazione di un telo di ombreggiamento che ostacola il passaggio del 60% della radiazione solare solo sul tetto della serra e, successivamente, lo svolgimento del telo sia sul tetto sia sulle pareti.
Il primo risultato verrà utilizzato per la scelta della taglia delle unità esterne ed interne, infatti l'ombreggiamento solo sul tetto rappresenta la situazione peggiore tra le due.
Il presupposto di avere ombreggiamento anche sulle pareti viene preso in considerazione perchè è anch'essa una configurazione ampiamente utilizzata e permette di valutare il risparmio energetico da essa derivante.

6.1. CASO STUDIO 1: serra posizionata in Piemonte

In questo primo caso studio, la serra viene posizionata nel comune di Torino.

6.1.1. Potenza richiesta per riscaldamento

Il calcolo della potenza di riscaldamento richiede la conoscenza di portata di rinnovo, condizioni interne da raggiungere e condizioni esterne.
La prima è stata calcolata prendendo come riferimento il valore usualmente utilizzato in relazione alle serre di 10 volumi/h, le condizioni interne sono state dettate dalle necessità della coltivazione che si intende effettuare e la temperatura esterna è stata letta da normativa UNI 10349-1.
L'umidità esterna, invece, è stata calcolata sulla base dei valori tabellari medi mensili di pressione di vapore media giornaliera contenuti nella normativa UNI 10349-1; essa è stata ottenuta come media delle umidità relative medie dei mesi che costituiscono l'inverno (dal 22 dicembre al 20 marzo), ovvero dicembre, gennaio, febbraio e marzo.
Si precisa che essi non corrispondano ai mesi in cui le pompe di calore funzionano in modalità riscaldamento, infatti la loro modalità di funzionamento dipende dalle necessità e non da periodi convenzionali di riscaldamento come avviene per gli edifici residenziali.

Tabella 12: calcolo umidità relativa esterna periodo invernale caso studio 1

Calcolo UMIDITÀ RELATIVA ESTERNA INVERNO				
TORINO	DIC	GEN	FEB	MAR
Temperatura media ambiente [°C]	2,7	1,3	3,2	8,4
Pressione d vapore [Pa]	654	558	618	888
Pressione di saturazione alla temperatura media ambiente [Pa]	745	675	770	1102
Umidità relativa φ [%]	0,88	0,83	0,80	0,81
Umidità relativa media	0,828	=	82,8	%

Tabella 13: dati riscaldamento caso studio 1

DATI		
Volumi ora	10	vol/h
Volumi al secondo	0,00278	vol/s
Temperatura esterna	-8	°C
Umidità relativa esterna	82,8	%

Tabella 14: valori temperatura e umidità relativa interne riscaldamento

OBIETTIVI		
Temperatura interna	20	°C
Umidità relativa interna	≤ 50	%

I risultati ottenuti applicando il modello descritto nel paragrafo 5.5.2., sono i seguenti:

Tabella 15: risultati per condizioni riscaldamento caso studio 1

Portata di rinnovo	2,3089	m^3/s
CARICHI TERMICI		
Carico di ventilazione	78046,0	W
Carico pareti verso esterno	1129,4	W
Carico verso soffitto	18763,1	W
Carico verso pavimento	1819,0	W
Totale	99757,4	W
Totale	99,8	kW

La potenza richiesta per riscaldare l'aria di rinnovo e per compensare la perdita di calore attraverso l'involucro della serra a fronte di un salto termico tra interno ed esterno di 28°C, è di circa 99,8 kW.

6.1.2. Potenza richiesta per raffrescamento

I dati necessari per calcolare la potenza di raffrescamento sono la portata di rinnovo, la portata di vapore emessa dalle piante coltivate nella serra, le condizioni climatiche esterne e quelle interne obiettivo.
La portata di rinnovo è stata calcolata prendendo come riferimento il valore usualmente utilizzato in relazione alle serre di 10 volumi/h, le condizioni interne sono state dettate dalle necessità della coltivazione che si intende effettuare. La temperatura e l'umidità relativa esterne sono state lette da normativa UNI 10349-2.

Tabella 16: dati raffrescamento caso studio 1

DATI		
Volumi ora	10	vol/h
Volumi al secondo	0,00278	vol/s
Portata di rinnovo	2,309	m^3/s
Latitudine	45° 7’	
Longitudine	7° 43’	
Altitudine	239	
Temperatura massima	31	°C
Variazione massima di temperatura	11	°C
Umidità relativa esterna	50	%
Mesi più caldi	luglio	
Coefficiente di ombreggiatura	0,4	

Tabella 17: valori temperatura e umidità relativa interne raffrescamento

OBIETTIVI		
Temperatura interna	25	°C
Umidità relativa interna	≤ 50	%

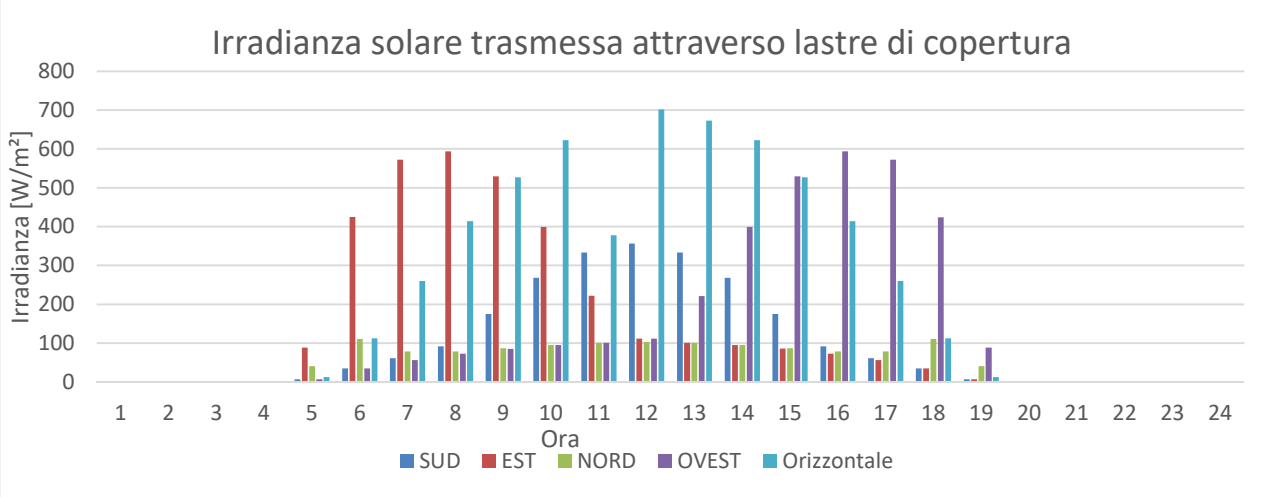


Figura 42: andamento dell’irradianza trasmessa attraverso la copertura durante l’arco della giornata latitudine 45°

Seguendo il procedimento descritto nel paragrafo 5.5.1., è stata ottenuta la portata di vapore emessa dai vegetali:

Tabella 18: calcolo della portata di vapore prodotta dalle piante nella serra caso 1

CALCOLO DELLA PORTATA DI VAPORE						
TORINO	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	
T_{media} [°C]	18,1	22,2	23,7	22,7	19,2	Da prospetto 5 UNI 10349-1
R_g [J/(m²d)]	19700000	22800000	24000000	20200000	14600000	Da prospetto 6 UNI 10349-1
R_g [cal/(cm²d)]	470,84	544,93	573,61	482,79	348,94	
C	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
ET_0 [L_{H2O}/(m² mese)]	113,924	142,016	152,761	128,322	89,588	
Estensione coltivazione [m²]	168	168	168	168	168	
ρ_{acqua} [kg/m³]	1000	1000	1000	1000	1000	
ET_0 [kg_{H2O}/mese]	19139,266	23858,736	25663,882	21558,133	15050,852	
Giorni al mese	31	30	31	31	30	
ET_0 [kg_{H2O}/s]	0,007	0,009	0,010	0,008	0,006	
Coefficiente colturale K_c	0,9375	0,9375	0,9375	0,9375	0,9375	
ET_{max} [kg_{H2O}/s]	0,00670	0,00863	0,00898	0,00755	0,00544	
$ET_{max,medio}$ [kg_{H2O}/s]	0,00746	per coltura tradizionale				
$ET_{max,medio}$ [kg_{H2O}/s]	0,000746	per coltura aeroponica				

L'entità della traspirazione delle piante nella località di Torino è pari a 0,000746 kg_{H2O}/s e corrisponde alla portata di vapore da esse emessa.

Sono stati calcolati i termini di carico di ventilazione latente e sensibile:

Tabella 19: calcolo carico sensibile e latente di ventilazione raffrescamento caso studio 1

Calcolo $Q_{vent,sens}$ e $Q_{vent,lat}$			
Portata aria rinnovo	G_{aria}	2,771	kg/s
Portata di vapore	G_{vapore}	0,000746	kg/s
Umidità specifica esterna	x_E	0,0141	kg_{vap}/kg_{aria}
Umidità specifica interna	x_I	0,00988	kg_{vap}/kg_{aria}
Temperatura uscita unità interna	T_U	13,45	°C
Umidità specifica uscita unità interna	x_U	0,00961	kg_{vap}/kg_{aria}
Carico sensibile di ventilazione	$Q_{vent,sens}$	48918	W
Carico latente di ventilazione	$Q_{vent,lat}$	31316	W

Il carico di ventilazione sensibile risulta essere pari a 48918 W e quello latente di 31316 W.

Applicando il modello di calcolo descritto nel paragrafo 5.5.3., si ottiene il seguente andamento del carico termico necessario per il raffrescamento.
Il procedimento è stato applicato due volte:

- per calcolare la richiesta di raffrescamento srotolando il telo di ombreggiamento solo sul tetto in modo da permettere alla radiazione ultravioletta di penetrare, non attenuata, tramite le pareti;
- per determinare la richiesta di raffrescamento considerando di coprire sia il tetto sia le pareti della serra con il telo ombreggiante.

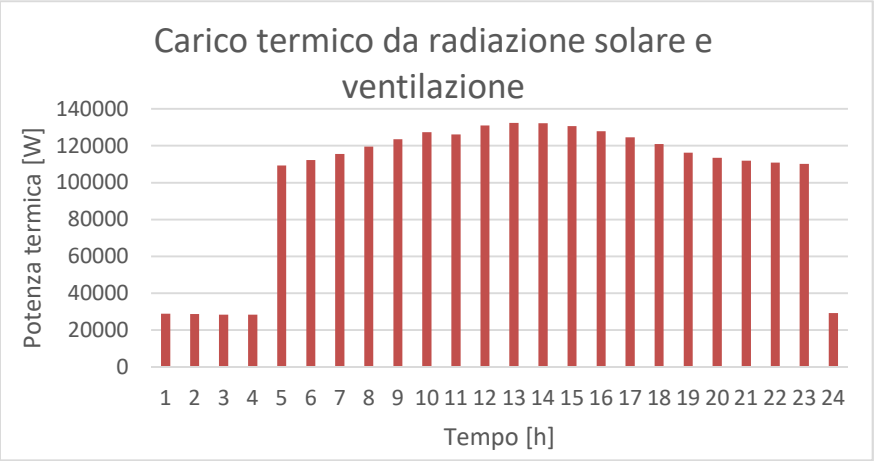


Figura 43: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 1 ombreggiamento solo su tetto

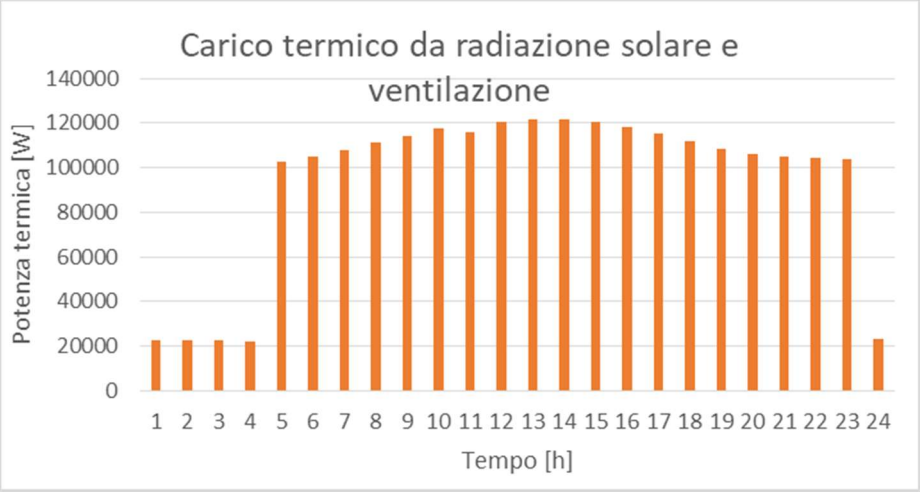


Figura 44: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 1 ombreggiamento su tetto e pareti

In entrambi i casi il valore massimo di potenza si manifesta alle ore 14 ed è pari, nel primo caso, a 132,3 kW e nel secondo caso a 121,6 kW. La differenza è, quindi, di 10,7 kW che, in termini percentuali riferita alla potenza maggiore è l'8,1%.
Il primo valore ottenuto, corrispondente al caso in cui lo schermo termico sia posto solo sul tetto, essendo la condizione peggiore in termini di richiesta di potenza, verrà preso come riferimento per la scelta della taglia della pompa di calore.
Si riconosce una netta diminuzione della potenza richiesta durante le ore notturne, durante le quali le ventole di immissione sono ferme.

6.1.3. Fotovoltaico

Seguendo il metodo riportato nel paragrafo 5.5.5., è stata calcolata l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico in ciascun mese dell'anno. I valori ottenuti sono stati sommati in moda da ricavare la producibilità annuale:

Tabella 20: producibilità impianto fotovoltaico caso studio 1

MESE	Irradiazione solare incidente [kWh/m²]	Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico [kWh]
Gennaio	62,65	605,20
Febbraio	76,51	739,09
Marzo	134,85	1302,65
Aprile	158,68	1532,85
Maggio	191,89	1853,66
Giugno	203,69	1967,65
Luglio	222,48	2149,16
Agosto	197,43	1907,17
Settembre	143,95	1390,56
Ottobre	97,37	940,59
Novembre	62,88	607,42
Dicembre	58,33	563,47
Totale	**1610,71**	**15559,46**

I dati di irradiazione solare sono stati ricavati dal sito PVGIS impostando il luogo in cui è installata la serra.

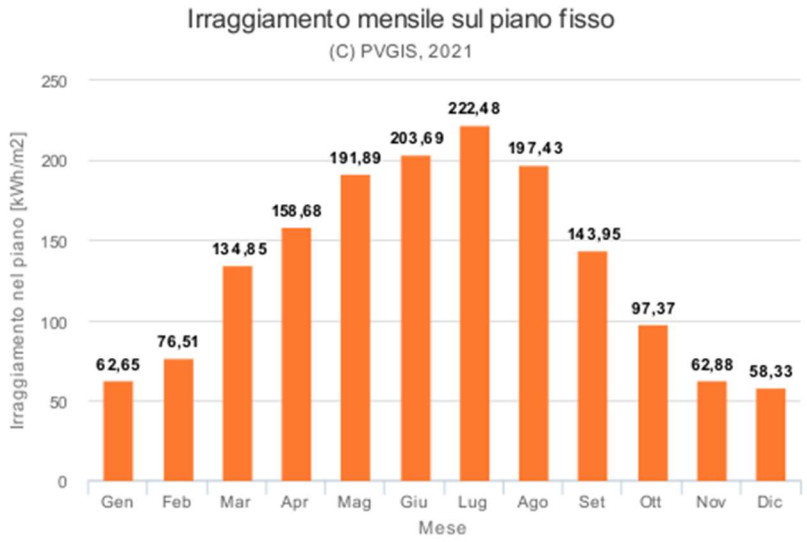


Figura 45: irraggiamento mensile tratto dal sito PVIGS caso studio 1

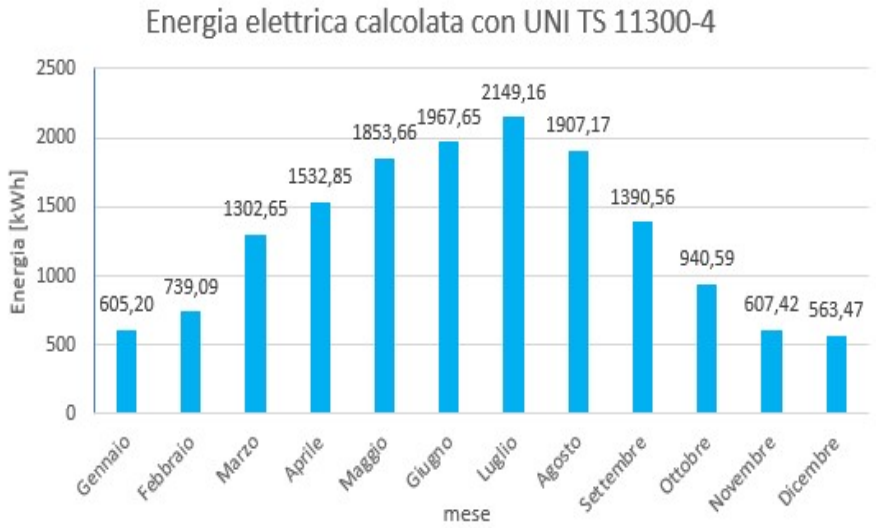


Figura 46: energia prodotta mensilmente calcolata con UNI TS 11300-4 caso studio 1

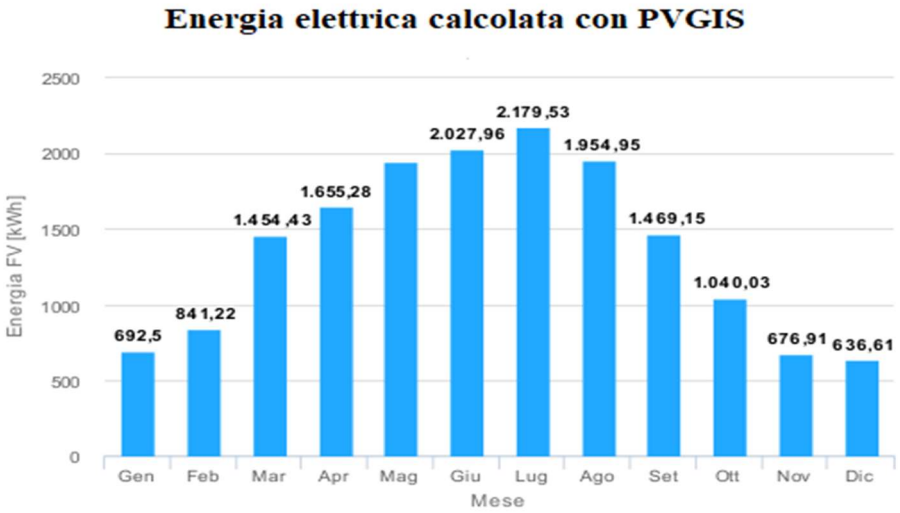


Figura 47: energia prodotta mensilmente calcolata con PVGIS caso studio 1

Con una disponibilità di irradiazione solare annuale di 1610,71 kWh/m², l'energia elettrica prodotta annualmente è pari a 15559,46 kWh.
Il risultato ottenuto tramite lo strumento di calcolo del sito PVGIS è 16578,35 kWh.
In entrambi i casi si nota come l'andamento dell'energia prodotta segua fedelmente quello della disponibilità di radiazione solare mese per mese; con un picco nel mese di luglio e una netta diminuzione nei mesi invernali (tra novembre e febbraio).

6.2. CASO STUDIO 2: serra posizionata in Toscana

Nel secondo caso studio, la serra viene posizionata nel comune di Grosseto.

6.2.1. Potenza richiesta per riscaldamento

Il calcolo della potenza di riscaldamento richiede la conoscenza di portata di rinnovo, condizioni interne da raggiungere e condizioni esterne.
Questi parametri sono ottenuti in modo analogo a quanto fatto per il primo caso studio.

Tabella 21: calcolo umidità relativa esterna periodo invernale caso studio 2

Calcolo UMIDITÀ RELATIVA ESTERNA INVERNO				
GROSSETO	DIC	GEN	FEB	MAR
Temperatura media ambiente [°C]	9,3	7,3	8,3	11,1
Pressione d vapore [Pa]	849	780	760	963
Pressione di saturazione alla temperatura media ambiente [Pa]	1430	1254	1337	1319
Umidità relativa φ [%]	0,59	0,62	0,57	0,73
Umidità relativa media	0,628	=	62,9	%

Tabella 22: dati riscaldamento caso studio 2

DATI		
Volumi ora	10	vol/h
Volumi al secondo	0,00278	vol/s
Temperatura esterna	0	°C
Umidità relativa esterna	62,9	%
Volumi ora	1,2	kg/m³
Volumi al secondo	1006	J/(kgK)

Tabella 23: valori temperatura e umidità relativa interne riscaldamento

OBIETTIVI		
Temperatura interna	20	°C
Umidità relativa interna	≤ 50	%

I risultati ottenuti applicando il modello descritto nel paragrafo 5.5.2., sono i seguenti:

Tabella 24: risultati per condizioni riscaldamento caso studio 2

Portata di rinnovo	2,3089	m³/s
CARICHI TERMICI		
Carico di ventilazione	55747,2	W
Carico pareti verso esterno	806,7	W
Carico verso soffitto	13402,2	W
Carico verso pavimento	1299,3	W
Totale	71255,3	W
Totale	71,3	kW

La potenza richiesta per riscaldare l'aria di rinnovo e per compensare la perdita di calore attraverso l'involucro della serra a fronte di un salto termico tra interno ed esterno di 20°C, è di circa 71,3 kW.

6.2.2. Potenza richiesta per raffrescamento

I dati necessari per calcolare la potenza di raffrescamento sono la portata di rinnovo, la portata di vapore emessa dalle piante coltivate nella serra, le condizioni climatiche esterne e quelle interne obiettivo.
Essi sono stati determinati in modo analogo a quanto fatto per il primo caso studio.

Tabella 25: dati raffrescamento caso studio 2

DATI		
Volumi ora	10	vol/h
Volumi al secondo	0,00278	vol/s
Portata di rinnovo	2,309	m³/s
Latitudine	42° 45'	
Longitudine	11° 6'	
Altitudine	10	
Temperatura massima	33	°C
Variazione massima di temperatura	13	°C
Umidità relativa esterna	42	%
Mesi più caldi	luglio	
Coefficiente di ombreggiatura	0,4	

Tabella 26: valori temperatura e umidità relativa interne raffrescamento

OBIETTIVI		
Temperatura interna	25	°C
Umidità relativa interna	≤ 50	%

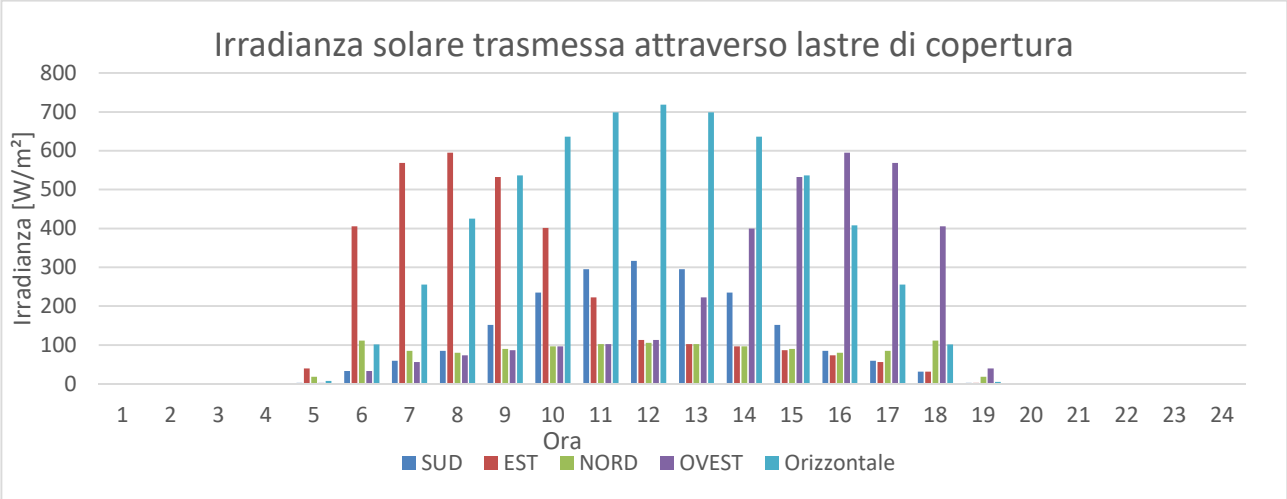


Figura 48: andamento dell'irradianza trasmessa attraverso la copertura durante l'arco della giornata latitudine 42°

Seguendo il procedimento descritto nel paragrafo 5.5.1., è stata ottenuta la portata di vapore emessa dai vegetali:

Tabella 27: calcolo della portata di vapore prodotta dalle piante nella serra caso 2

CALCOLO DELLA PORTATA DI VAPORE					
GROSSETO	MAG	GIU	LUG	AGO	SET
T_{media} [°C]	18	22,1	25	25,3	20,8
R_g [J/(m²d)]	21800000	23400000	25000000	21300000	16400000
R_g [cal/(cm²d)]	521,03	559,27	597,51	509,08	391,97
C	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
ET_0 [L_{H2O}/(m² mese)]	124,59	145,18	161,88	140,40	102,72
Estensione coltivazione [m²]	168	168	168	168	168
ρ_{acqua} [kg/m³]	1000	1000	1000	1000	1000
ET_0 [kg_{H2O}/mese]	20930,94	24389,33	27195,60	23586,33	17256,07
Giorni al mese	31	30	31	31	30
ET_0 [kg_{H2O}/s]	0,008	0,009	0,010	0,009	0,007
Coefficiente colturale K_c	0,9375	0,9375	0,9375	0,9375	0,9375
ET_{max} [kg_{H2O}/s]	0,00733	0,00882	0,00952	0,00826	0,00624
$ET_{max,medio}$ [kg_{H2O}/s]	0,00803	per coltura tradizionale			
$ET_{max,medio}$ [kg_{H2O}/s]	0,000803	per coltura aeroponica			

L'entità della traspirazione delle piante nella località di Grosseto è pari a 0,000803 kg_{H2O}/s e corrisponde alla portata di vapore da esse emessa.

Sono stati calcolati i termini di carico di ventilazione latente e sensibile:

Tabella 28: calcolo carico sensibile e latente di ventilazione raffrescamento caso studio 2

Calcolo $Q_{vent,sens}$ e $Q_{vent,lat}$			
Portata aria rinnovo	G_{aria}	2,771	kg/s
Portata di vapore	G_{vapore}	0,000803	kg/s
Umidità specifica esterna	x_E	0,01329	kg_{vap}/kg_{aria}
Umidità specifica interna	x_I	0,00988	kg_{vap}/kg_{aria}
Temperatura uscita unità interna	T_U	13,42	°C
Umidità specifica uscita unità interna	x_U	0,00959	kg_{vap}/kg_{aria}
Carico sensibile di ventilazione	$Q_{vent,sens}$	54576,5	W
Carico latente di ventilazione	$Q_{vent,lat}$	25638,9	W

Il carico di ventilazione sensibile risulta essere pari a 54576,5 W e quello latente di 25638,9 W.

Applicando il modello di calcolo descritto nel paragrafo 5.5.3., si ottiene il seguente andamento del carico termico necessario per il raffrescamento.
Il procedimento è stato applicato due volte:

- per calcolare la richiesta di raffrescamento srotolando il telo di ombreggiamento solo sul tetto in modo da permettere alla radiazione ultravioletta di penetrare, non attenuata, tramite le pareti;
- per determinare la richiesta di raffrescamento considerando di coprire sia il tetto sia le pareti della serra con il telo ombreggiante.

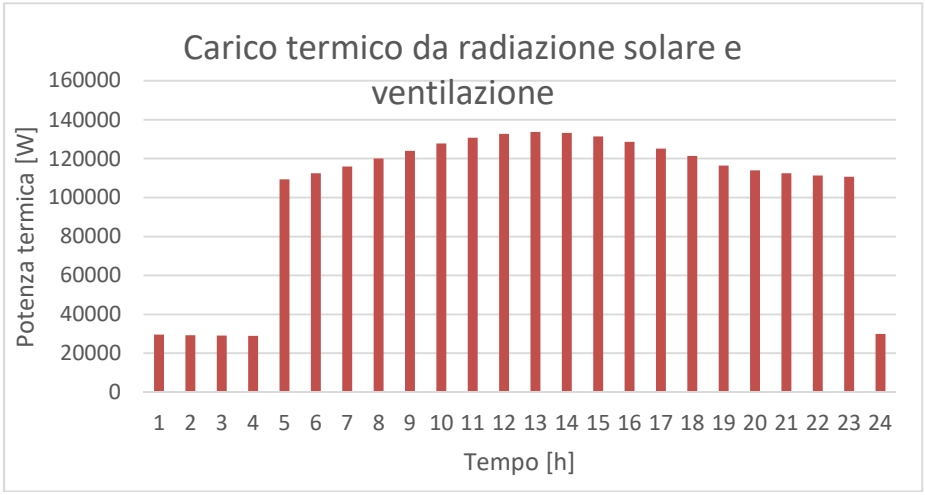


Figura 49: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 2 ombreggiamento solo su tetto

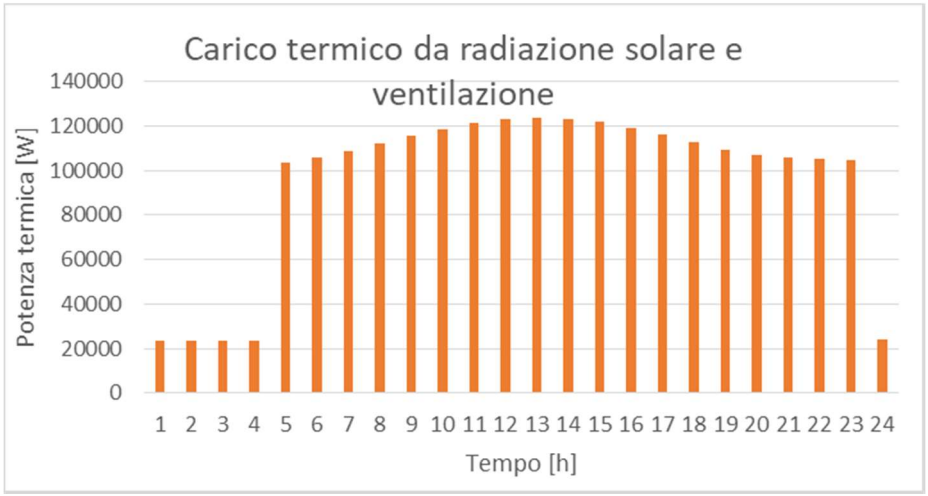


Figura 50: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 2 ombreggiamento su tetto e pareti

In entrambi i casi il valore massimo di potenza si manifesta alle ore 14 ed è pari, nel primo caso a 133,7 kW e nel secondo caso a 123,6 kW. La differenza è, quindi, di 10,1 kW che, in termini percentuali riferita alla potenza maggiore è il 7,6 %.
Il primo valore ottenuto, corrispondente al caso in cui lo schermo termico sia posto solo sul tetto, essendo la condizione peggiore in termini di richiesta di potenza, verrà preso come riferimento per la scelta della taglia della pompa di calore.
Si riconosce una netta diminuzione della potenza richiesta durante le ore notturne, durante le quali le ventole di immissione sono ferme.

6.2.3. Fotovoltaico

Seguendo il metodo riportato nel paragrafo 5.5.5., è stata calcolata l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico in ciascun mese dell'anno. I valori ottenuti sono stati sommati in

moda da ricavare la producibilità annuale:

Tabella 29: producibilità impianto fotovoltaico caso studio 2

MESE	Irradiazione solare incidente [kWh/m²]	Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico [kWh]
Gennaio	66,74	644,71
Febbraio	87,74	847,57
Marzo	131,43	1269,61
Aprile	169,3	1635,44
Maggio	204,57	1976,15
Giugno	217,8	2103,95
Luglio	238,95	2308,26
Agosto	211,53	2043,38
Settembre	157,14	1517,97
Ottobre	111,79	1079,89
Novembre	70,7	682,96
Dicembre	64,25	620,66
Totale	**1731,94**	**16730,54**

I dati di irradiazione solare sono stati ricavati dal sito PVGIS impostando il luogo in cui è installata la serra.

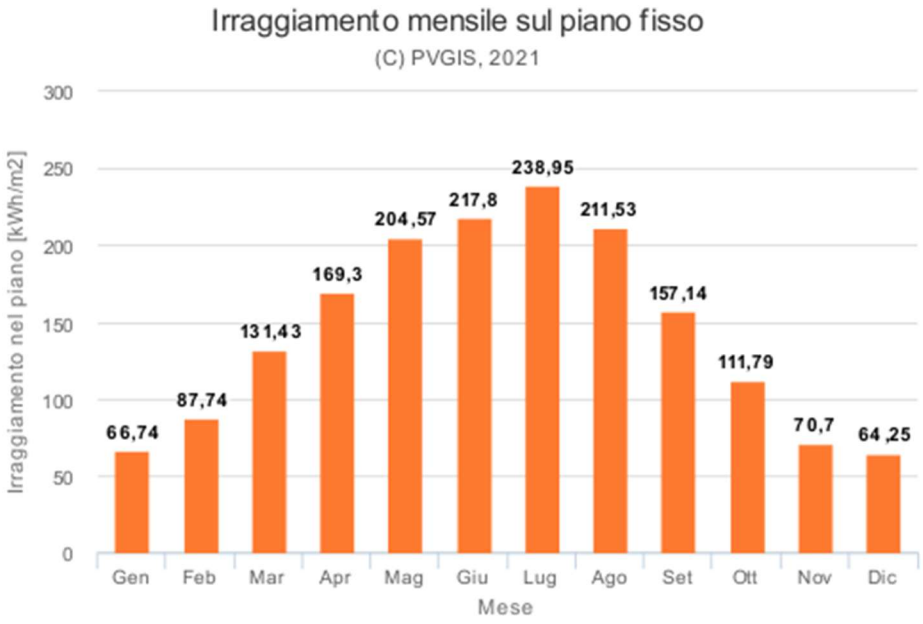


Figura 51: irraggiamento mensile tratto dal sito PVIGS caso studio 2

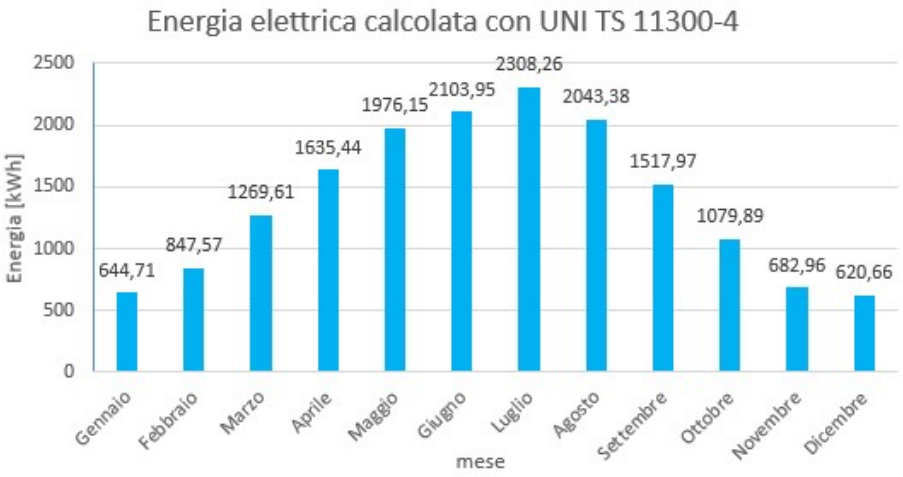


Figura 52: energia prodotta mensilmente calcolata con UNI TS 11300-4 caso studio 2

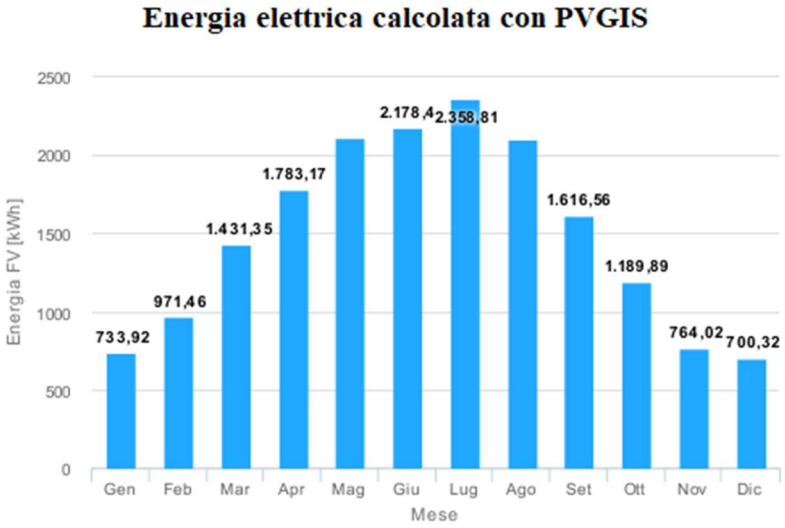


Figura 53: energia prodotta mensilmente calcolata con PVGIS caso studio 2

Con una disponibilità di irradiazione solare annuale di 1731,94 kWh/m², l'energia elettrica prodotta annualmente è pari a 16730,54 kWh.
Il risultato ottenuto tramite lo strumento di calcolo del sito PVGIS è 17944,63 kWh.
In entrambi i casi si nota come l'andamento dell'energia prodotta segua fedelmente quello della disponibilità di radiazione solare mese per mese; con un picco nel mese di luglio e una netta diminuzione nei mesi invernali (tra novembre e febbraio).

6.3. CASO STUDIO 3: serra posizionata in Sicilia

In questo primo caso studio, la serra viene posizionata nel comune di Messina.

6.3.1. Potenza richiesta per riscaldamento

Il calcolo della potenza di riscaldamento richiede la conoscenza di portata di rinnovo, condizioni interne da raggiungere e condizioni esterne.
Questi parametri sono ottenuti in modo analogo a quanto fatto per i precedenti casi studio.

Tabella 30: calcolo umidità relativa esterna periodo invernale caso studio 3

Calcolo UMIDITÀ RELATIVA ESTERNA INVERNO				
MESSINA	DIC	GEN	FEB	MAR
Temperatura media ambiente [°C]	12,3	11,6	10,7	12,4
Pressione d vapore [Pa]	1092	896	865	934
Pressione di saturazione alla temperatura media ambiente [Pa]	1430	1364	1286	1440
Umidità relativa φ [%]	0,76	0,66	0,67	0,65
Umidità relativa media	0,685	=	68,5	%

Tabella 31: dati riscaldamento caso studio 3

DATI		
Volumi ora	10	vol/h
Volumi al secondo	0,00278	vol/s
Temperatura esterna	5	°C
Umidità relativa esterna	68,5	%
Volumi ora	1,2	kg/m³
Volumi al secondo	1006	J/(kgK)

Tabella 32: valori temperatura e umidità relativa interne riscaldamento

OBIETTIVI		
Temperatura interna	20	°C
Umidità relativa interna	≤ 50	%

I risultati ottenuti applicando il modello descritto nel paragrafo 5.5.2., sono i seguenti:

Tabella 33: risultati per condizioni riscaldamento caso studio 3

Portata di rinnovo	2,3089	m³/s
CARICHI TERMICI		
Carico di ventilazione	41810,4	W
Carico pareti verso esterno	605,0	W
Carico verso soffitto	10051,6	W
Carico verso pavimento	974,5	W
Totale	53441,5	W
Totale	53,4	kW

La potenza richiesta per riscaldare l'aria di rinnovo e per compensare la perdita di calore attraverso l'involucro della serra a fronte di un salto termico tra interno ed esterno di 15°C, è di circa 53,4 kW.

6.3.2. Potenza richiesta per raffrescamento

I dati necessari per calcolare la potenza di raffrescamento sono la portata di rinnovo, la portata di vapore emessa dalle piante coltivate nella serra, le condizioni climatiche esterne e quelle interne obiettivo.
Essi sono stati determinati in modo analogo a quanto fatto per i precedenti casi studio.

Tabella 34: dati raffrescamento caso studio 3

DATI		
Volumi ora	10	vol/h
Volumi al secondo	0,00278	vol/s
Portata di rinnovo	2,309	m^3/s
Latitudine	38° 11'	
Longitudine	15° 32'	
Altitudine	3	
Temperatura massima	32,3	°C
Variazione massima di temperatura	6	°C
Umidità relativa esterna	48	%
Mesi più caldi	luglio	
Coefficiente di ombreggiatura	0,4	

Tabella 35: valori temperatura e umidità relativa interne raffrescamento

OBIETTIVI		
Temperatura interna	25	°C
Umidità relativa interna	≤ 50	%

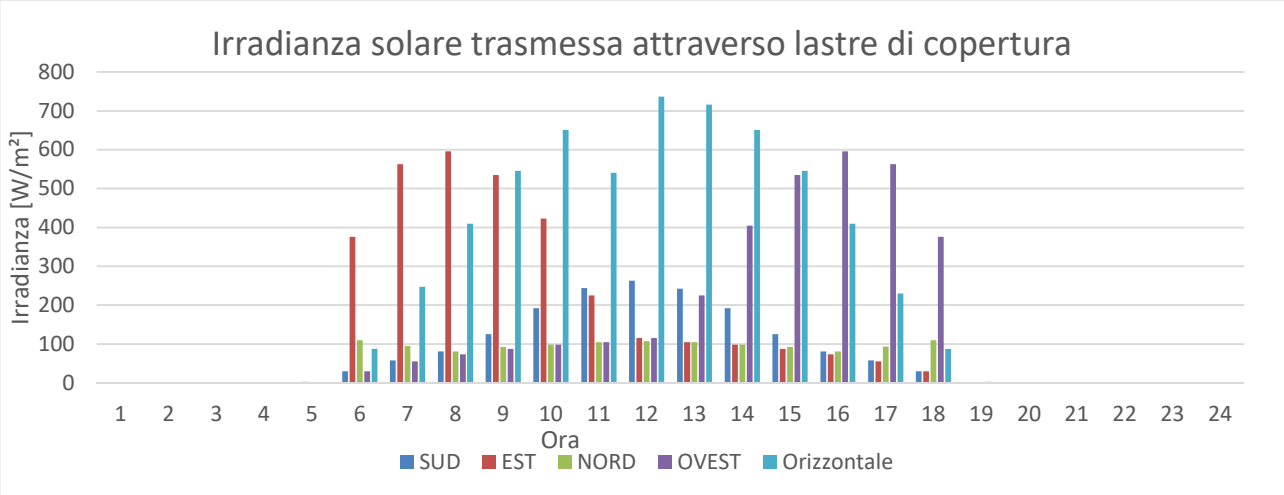


Figura 54: andamento dell'irradianza trasmessa attraverso la copertura durante l'arco della giornata latitudine 38°

Seguendo il procedimento descritto nel paragrafo 5.5.1., è stata ottenuta la portata di vapore emessa dai vegetali:

Tabella 36: calcolo della portata di vapore prodotta dalle piante nella serra caso 3

CALCOLO DELLA PORTATA DI VAPORE					
MESSINA	MAG	GIU	LUG	AGO	SET
T_{media} [°C]	19,3	23	26	25,8	23,2
R_g [J/(m²d)]	23700000	25300000	25100000	22500000	15300000
R_g [cal/(cm²d)]	566,44	604,68	599,90	537,76	365,68
C	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
ET_0 [L_{H2O}/(m² mese)]	138,74	158,50	164,85	148,67	100,98
Estensione coltivazione [m²]	168	168	168	168	168
ρ_{acqua} [kg/m³]	1000	1000	1000	1000	1000
ET_0 [kg_{H2O}/mese]	23309,12	26628,43	27695,44	24976,47	16964,92
Giorni al mese	31	30	31	31	30
ET_0 [kg_{H2O}/s]	0,009	0,010	0,010	0,009	0,007
Coefficiente colturale K_c	0,9375	0,9375	0,9375	0,9375	0,9375
ET_{max} [kg_{H2O}/s]	0,00816	0,00963	0,00969	0,00874	0,00614
$ET_{max,medio}$ [kg_{H2O}/s]	0,00847	per coltura tradizionale			
$ET_{max,medio}$ [kg_{H2O}/s]	0,000847	per coltura aeroponica			

L'entità della traspirazione delle piante nella località di Messina è pari a 0,000847 kg_{H2O}/s e corrisponde alla portata di vapore da esse emessa.

Sono stati calcolati i termini di carico di ventilazione latente e sensibile:

Tabella 37: calcolo carico sensibile e latente di ventilazione raffrescamento caso studio 3

Calcolo $Q_{vent,sens}$ e $Q_{vent,lat}$			
Portata aria rinnovo	G_{aria}	2,771	kg/s
Portata di vapore	G_{vapore}	0,000847	kg/s
Umidità specifica esterna	x_E	0,01462	kg_{vap}/kg_{aria}
Umidità specifica interna	x_I	0,00988	kg_{vap}/kg_{aria}
Temperatura uscita unità interna	T_U	13,4	°C
Umidità specifica uscita unità interna	x_U	0,00957	kg_{vap}/kg_{aria}
Carico sensibile di ventilazione	$Q_{vent,sens}$	52681,1	W
Carico latente di ventilazione	$Q_{vent,lat}$	34965,3	W

Il carico di ventilazione sensibile risulta essere pari a 52681,1 W e quello latente di 34965,3 W.

Applicando il modello di calcolo descritto nel paragrafo 5.5.3., si ottiene il seguente andamento del carico termico necessario per il raffrescamento.
Il procedimento è stato applicato due volte:

- per calcolare la richiesta di raffrescamento srotolando il telo di ombreggiamento solo sul tetto in modo da permettere alla radiazione ultravioletta di penetrare, non attenuata, tramite le pareti;
- per determinare la richiesta di raffrescamento considerando di coprire sia il tetto sia le pareti della serra con il telo ombreggiante.

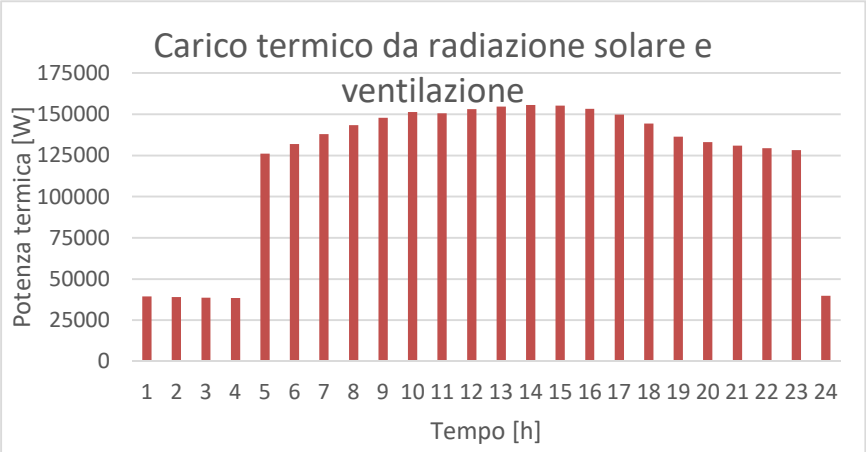


Figura 55: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 3 ombreggiamento solo su tetto

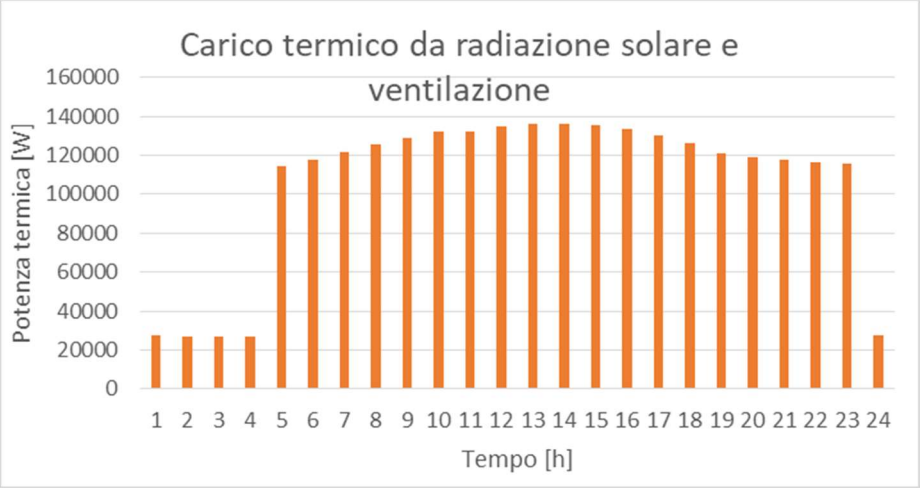


Figura 56: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 3 ombreggiamento su tetto e pareti

In entrambi i casi il valore massimo di potenza si manifesta alle ore 14 ed è pari, nel primo caso a 155,6 kW e nel secondo caso a 136,4 kW. La differenza è, quindi, di 19,2 kW che, in termini percentuali riferita alla potenza maggiore è il 12,3%.
Il primo valore ottenuto, corrispondente al caso in cui lo schermo termico sia posto solo sul tetto, essendo la condizione peggiore in termini di richiesta di potenza, verrà preso come riferimento per la scelta della taglia della pompa di calore.
Si riconosce una netta diminuzione della potenza richiesta durante le ore notturne, durante le quali le ventole di immissione sono ferme.

6.3.3. Fotovoltaico

Seguendo il metodo riportato nel paragrafo 5.5.5., è stata calcolata l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico in ciascun mese dell'anno. I valori ottenuti sono stati sommati in moda da ricavare la producibilità annuale:

Tabella 38: producibilità impianto fotovoltaico caso studio 3

MESE	Irradiazione solare incidente [kWh/m²]	Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico [kWh]
Gennaio	77,39	747,59
Febbraio	86,44	835,01
Marzo	136,5	1318,59
Aprile	170,28	1644,90
Maggio	210,73	2035,65
Giugno	222,11	2145,58
Luglio	242,68	2344,29
Agosto	221,73	2141,91
Settembre	157,3	1519,52
Ottobre	119,86	1157,85
Novembre	85,68	827,67
Dicembre	67,91	656,01
Totale	**1798,61**	**17374,57**

I dati di irradiazione solare sono stati ricavati dal sito PVGIS impostando il luogo in cui è installata la serra.

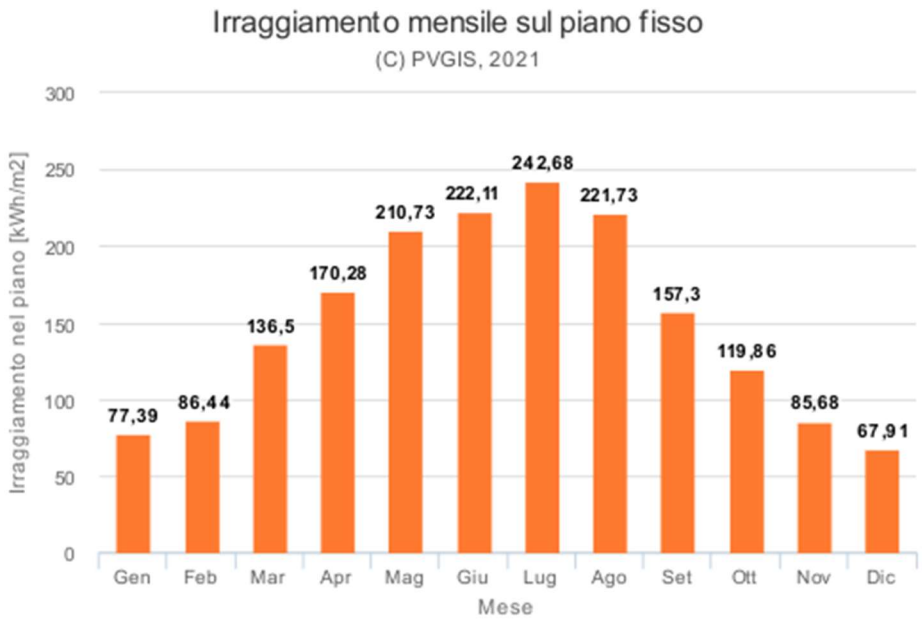


Figura 57: irraggiamento mensile tratto dal sito PVIGS caso studio 3

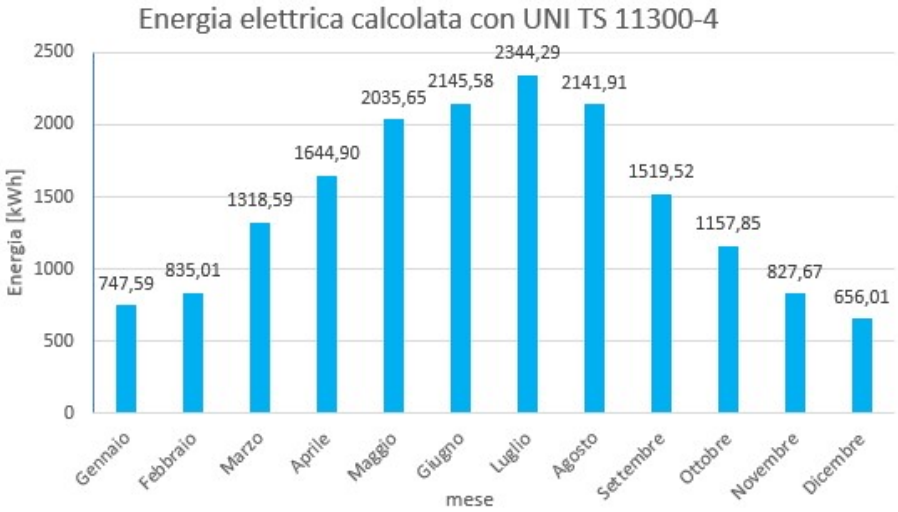


Figura 58: energia prodotta mensilmente calcolata con UNI TS 11300-4 caso studio 3

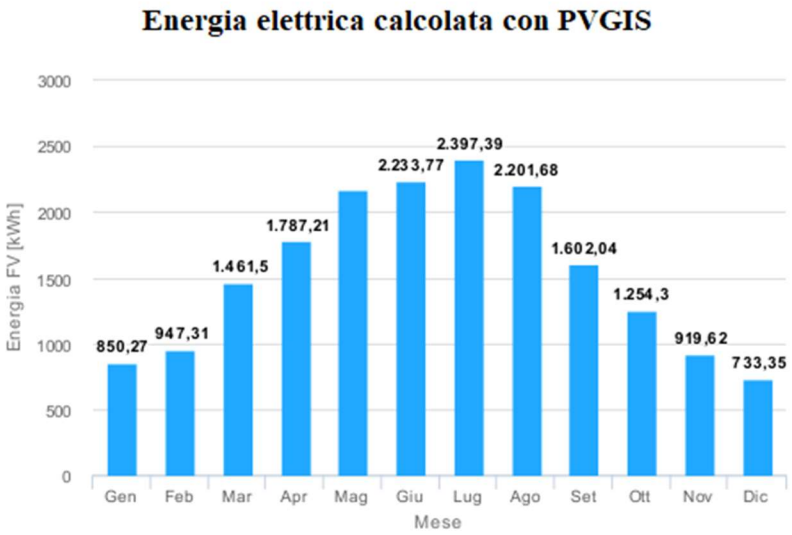


Figura 59: energia prodotta mensilmente calcolata con PVGIS caso studio 3

Con una disponibilità di irradiazione solare annuale di 1798,61 kWh/m², l'energia elettrica prodotta annualmente è pari a 17374,57 kWh.
Il risultato ottenuto tramite lo strumento di calcolo del sito PVGIS è 18562,04 kWh.
In entrambi i casi si nota come l'andamento dell'energia prodotta segua fedelmente quello della disponibilità di radiazione solare mese per mese; con un picco nel mese di luglio e una netta diminuzione nei mesi invernali (tra novembre e febbraio).

6.4. Scelta ventilatori di immissione e serrandine regolabili

La necessità di immettere ed espellere aria in modo controllato comporta la necessità di adottare una ventilazione meccanica gestita grazie ad opportuni ventilatori di immissione ed estrazione.
Volendo prevedere la possibilità di ricircolare l'aria interna, dovranno anche essere installate serrandine regolabili, ad altezza pavimento, attraverso cui avverrà il passaggio dell'aria ricircolata dalle zone di coltivazione verso il corridoio tecnico.
L'aria trattata, invece, fluirà dal corridoio tecnico verso gli ambienti in cui si trovano le piante attraverso bocchette di immissione poste nella parte superiore delle pareti del corridoio tecnico.
Di seguito è riportata la posizione dei dispositivi citati:

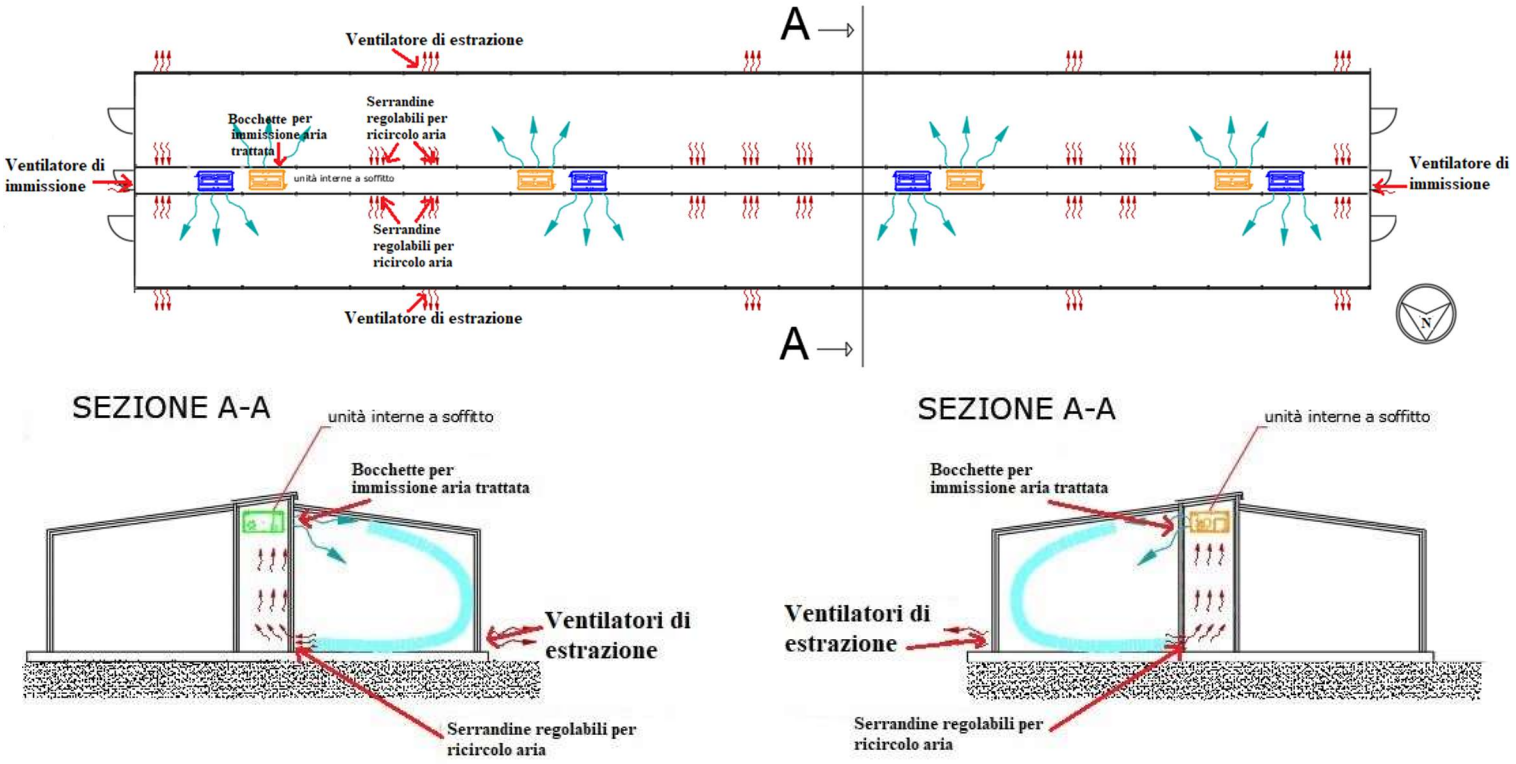


Figura 60: schema impianto e posizione serrandine e ventilatori

6.4.1. Ventilatori di immissione

I ventilatori di immissione sono macchine operatrici, ovvero che sfruttano il lavoro meccanico in ingresso all'albero della macchina stessa per trasferire energia al fluido elaborato, utilizzate per immettere aria fresca, prelevata dall'esterno, all'interno di un ambiente.

Sono costituiti da un motore che mette in rotazione una girante, la quale trasferisce energia al fluido.

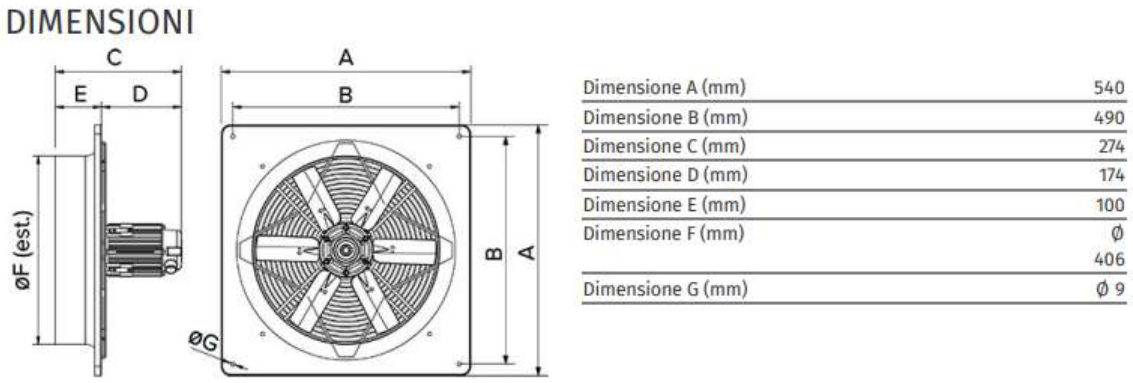
Le grandezze che descrivono le prestazioni di un ventilatore sono:
-la portata: quantità di fluido che il ventilatore è in grado di spostare nell'unità di tempo;
-la prevalenza: pressione generata dal ventilatore tra monte e valle per mettere in movimento il fluido elaborato;
-il numero di giri: numero di rotazioni complete intorno al proprio asse;
-il livello di pressione sonora, misurato in dB(A) generato dalle vibrazioni meccaniche durante il funzionamento;
-la potenza assorbita: potenza elettrica che il ventilatore assorbe durante il funzionamento;
-il rendimento: rapporto tra potenza fornita e potenza assorbita.

La "curva caratteristica" del ventilatore fornisce la portata in funzione della prevalenza e viene utilizzata per la scelta del ventilatore.

Nel caso in esame, siccome i ventilatori sono posti a parete e non all'interno di condotti che presentano perdite di carico, la scelta è stata effettuata unicamente in base alla portata elaborata. Sono stati previsti due ventilatori di immissione posti alle estremità opposte del corridoio tecnico.

La portata elaborata è di 8312 m³/h, suddivisa su due ventilatori.

È stato quindi scelto il modello 404 M della serie VORTICEL EHP ES dell'azienda Vortice: si tratta di aspiratori elicoidali a risparmio energetico per installazione a parete, in grado di gestire una portata massima di 5038 m³/h, che assorbono al massimo 207,9 W di potenza e ruotano ad una velocità di 1500 rpm. Il rendimento è 32,1%.



Dimensione A (mm)	540
Dimensione B (mm)	490
Dimensione C (mm)	274
Dimensione D (mm)	174
Dimensione E (mm)	100
Dimensione F (mm)	Ø 406
Dimensione G (mm)	Ø 9

Figura 61: caratteristiche geometriche ventilatore di aspirazione EHP ES 404M

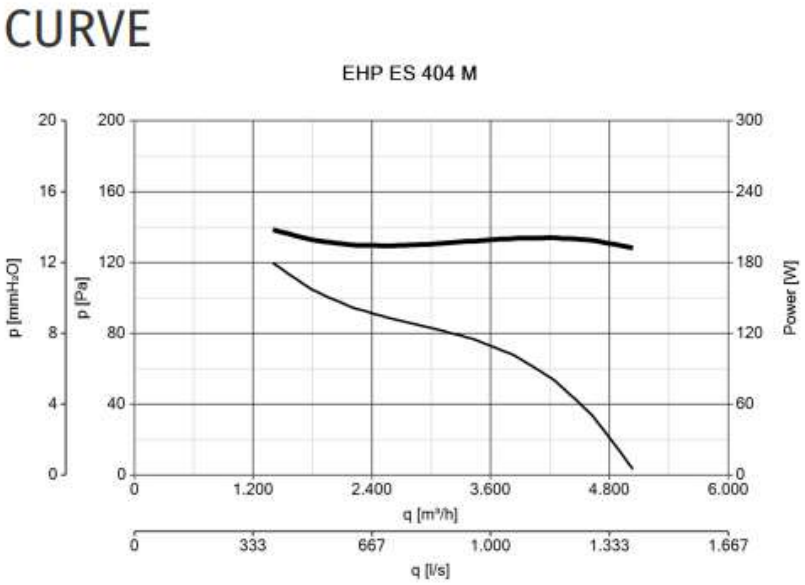


Figura 62: curva caratteristica del ventilatore EHP ES 404 M (linea spessa potenza, linea sottile pressione statica)

I ventilatori di immissione saranno dotati di appositi filtri per evitare che agenti contaminanti entrino all'interno della serra.

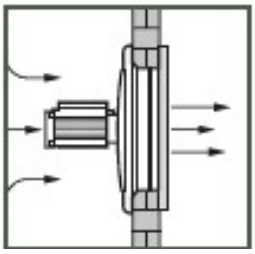
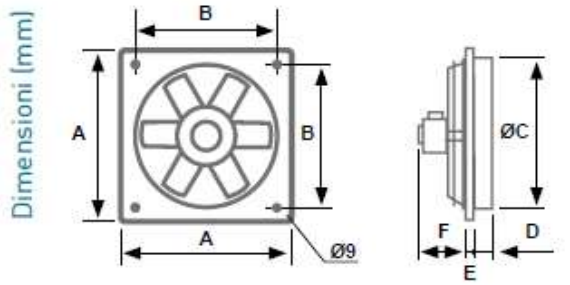


Figura 63: posizione installazione a parete ventilatori di aspirazione

6.4.2. Ventilatori di estrazione

Sono macchine operatrici utilizzate per rimuovere l'aria viziata dall'interno di un ambiente.
Le caratteristiche sono analoghe a quelle dei ventilatori di immissione.

Nel caso studiato sono presenti 10 ventilatori di estrazione posti nella parte bassa delle pareti esterne della serra.
Ammettendo di voler espellere tutta l'aria presente nella serra, la portata elaborata sarebbe di 8312 m³/h; di conseguenza, ciascun ventilatore dovrebbe essere in grado di gestire una portata di almeno 831 m³/h, la scelta è, quindi, ricaduta sul modello 250/4 MF della serie AFM della ditta ASPIRA. Essi sono aspiratori elicoidali monofase per espulsione diretta all'esterno progettati per essere installati a muro o a pannello; vi è la possibilità di utilizzo di un regolatore di velocità per variare il numero di giri del motore. La portata massima elaborata è di 850 m³/h, la potenza assorbita 80 W e la velocità di rotazione nominale di 1400 rpm.



MODELLO	A	B	ØC	D	E	F
AFM 250	350	300	265	45	15	210

Figura 64: caratteristiche geometriche ventilatore di estrazione AFM 250/4 MF

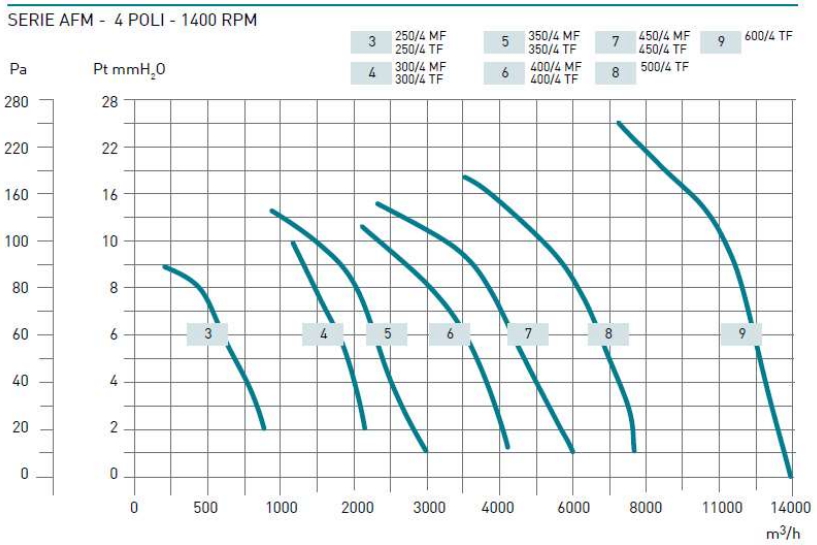


Figura 65: curva caratteristica del ventilatore AFM 250/4 MF

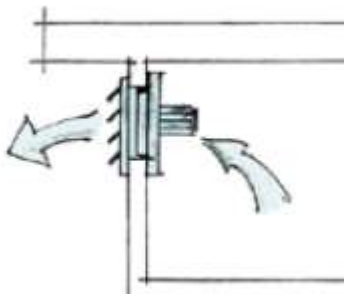


Figura 66: posizione installazione a parete ventilatori di estrazione

6.4.3. Bocchette di mandata e serrandine regolabili

Al fine di consentire il ricircolo dell'aria, nella parte bassa delle pareti del corridoio tecnico sono posizionate 18 serrande regolabili, 9 su ciascuna parete: permettono all'aria, presente nelle porzioni di serra dove si trovano le coltivazioni, di entrare nel corridoio tecnico per essere trattata dalle unità interne.
Ammettendo di voler ricircolare tutta l'aria presente nelle porzioni di serra in cui si trovano le coltivazioni, considerando 10 volumi/ora moltiplicati per il volume delle zone di coltivazione (703,8 m³), si ottiene una portata di ricircolo di 7038 m³/h. Essa, suddivisa su 18 serrande corrisponde a 391 m³/h per ciascuna serranda; è stato quindi scelto il modello TCZN 50 della ditta FCR Spa di dimensioni 360x360 mm.

Di conseguenza la velocità dell'aria attraverso le serrande sarà pari a $\boldsymbol{v = \frac{Q\,[\frac{m^3}{s}]}{A\,[m^2]} = \frac{0{,}1086}{(0{,}36 \cdot 0{,}36)} = 0{,}83\ m/s}$.

Dimensioni realizzabili

BASE: da 110 a 810 mm con incrementi di 50 mm
ALTEZZA: da 110 a 710 mm con incrementi di 50 mm

Dimensioni

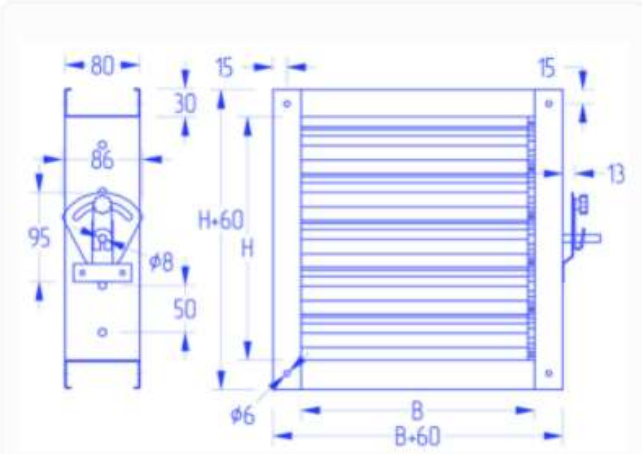


Figura 67: dimensioni serrande regolabili

Tali serrande possono essere automatizzate grazie all'accoppiamento con un motore.

Invece, nella parte superiore delle pareti del corridoio tecnico sono posizionate 8 bocchette di mandata, 4 per parete, in corrispondenza delle unità interne. Esse permettono all'aria trattata di

uscire dal corridoio tecnico ed entrare negli ambienti da climatizzare.
Ciascuna bocchetta dovrebbe essere attraversata al massimo da una portata di 1039 m³/h, è stato quindi scelto il modello BPA20 della ditta FCR Spa con dimensioni 1000x300 mm in modo tale che la sezione della bocchetta sia pari a quella di uscita dell'unità interna.

La velocità attraverso la bocchetta risulta di $\boldsymbol{v = \frac{Q\ [\frac{m^3}{s}]}{A\ [m^2]} = \frac{0{,}287}{(1 \cdot 0{,}30)} = 0{,}96\ m/s}$.

Di conseguenza la gittata della bocchetta, ovvero la distanza tra il suo centro e il punto in cui la velocità dell'aria diminuisce a 0,2 m/s, sarà sicuramente inferiore a 23,5 (gittata che corrisponde ad una bocchetta 600x300 mm) e la distanza alla quale la velocità diminuisce a 0,4 m/s sarà inferiore a 11,5 m. Velocità dell'aria superiori a 0,2 m/s non dovrebbero creare situazioni di discomfort in quanto il personale che cura la crescita delle piante occupa solo saltuariamente l'ambiente.

6.4.4. Filtri

Per evitare che agenti esterni entrino all'interno della serra con rischio di contaminazioni, sui ventilatori di immissione devono essere installati filtri in grado di trattenere particelle più o meno grandi a seconda della loro classe di efficienza.
I materiali filtranti più comunemente usati sono cotone, fibra di vetro, polimeri (poliestere, polipropilene, nylon) e griglie metalliche.
L'elemento filtrante vero e proprio è racchiuso in un telaio che presenta guarnizioni di tenuta, particolarmente importanti per evitare che l'aria possa infiltrarsi e non passare attraverso il materiale filtrante.
Siccome le prestazioni dei filtri possono essere determinate solo per via sperimentale, ognuno deve essere provvisto di un'etichetta che rimandi ad un rapporto di prova.

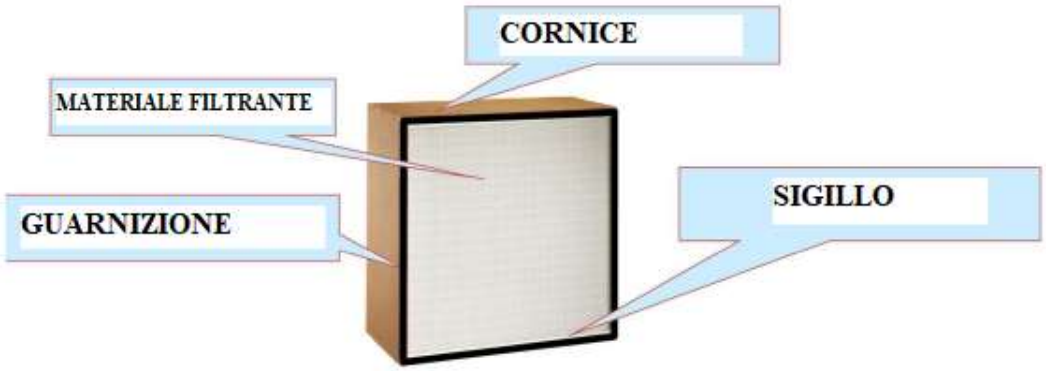


Figura 68: componenti filtro

I filtri in materiale fibroso sono suddivisi in tre gruppi:
-filtri grossolani;
-filtri medi-fini;
-filtri "assoluti".

Condividono tutti la stessa struttura, ma l'efficienza di filtrazione aumenta passando dai grossolani agli assoluti.

I meccanismi di filtrazione sono molteplici: alla semplice cattura per impatto delle particelle inquinanti contro il materiale filtrante, si aggiunge l'azione di attrazione elettrostatica e quella

dovuta ai meccanismi di diffusione molecolare.
L'efficienza di cattura presenta un minimo in corrispondenza di un certo valore di diametro di particelle, che, quindi, non possono essere trattenute dal filtro.
L'efficienza di rimozione è il parametro fondamentale per la scelta del filtro e viene definita come:

$$\boldsymbol{E = \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right) \cdot 100}$$

Dove:
-n_i è il numero di particelle a valle del filtro nell'intervallo dimensionale i;
-N_i è il numero di particelle a monte del filtro nell'intervallo dimensionale i.

La classificazione dei filtri in base alla loro efficienza è contenuta nella normativa UNI EN ISO 16890, dalla quale sono esclusi i filtri assoluti **[115]**.

6.5. Scelta modello pompa di calore

Unità esterne

La scelta delle unità esterne è stata effettuata sulla base della potenza di raffreddamento nel caso "peggiore", ovvero ombreggiando solo il tetto della serra.
Siccome il riscaldamento presenta una minore richiesta di potenza, dal punto di vista del riscaldamento il sistema risulterà sovradimensionato, ma la possibilità di regolazione permetterà alla pompa di calore di fornire solo la potenza necessaria.

Le potenze in gioco sono circa le stesse per i primi due casi studio, quindi sia nella località di Torino sia di Grosseto può essere installato lo stesso modello di unità esterna di pompa di calore.

La potenza richiesta totale è suddivisa sulle due unità esterne, quindi si è scelto il modello MULTI V5 ARUM260LTE5 della azienda LG che fornisce una potenza nominale di raffrescamento di 72,8 kW e una potenza nominale di riscaldamento di 67,2 kW.

Figura 69: unità esterna pompa di calore MULTI V5 ARUM260LTE5

Si tratta di pompe di calore VRF con fluido frigorifero R410a e scambio termico Aria-Refrigerante da collegare, mediante tubazioni frigorifere, con unità interne per la climatizzazione dell'aria che possono funzionare sia in raffreddamento sia in riscaldamento. Esse sono controllate da inverter, per cui il loro funzionamento può essere modulato; inoltre, sono adattate per essere installate all'esterno grazie al trattamento superficiale della loro struttura autoportante che conferisce resistenza agli agenti atmosferici.

Tabella 39: dati tecnici unità esterna ARUM260LTE5

▪ Dati tecnici			
▪ Modello			ARUM260LTE5
▪ Capacità Raffreddamento nota 1,5	Nom	kW	72,8
▪ Capacità Riscaldamento nota 1,5	Max	kW	74,3
▪ Capacità Riscaldamento nota 1,5	Nom	kW	67,2
▪ Capacità Riscaldamento	Max -7°C	kW	74,3
▪ Potenza assorbita Raffreddamento nota 1,5	Nom	kW	20,22
▪ Potenza assorbita Riscaldamento nota 1,5	Nom	kW	15,89
▪ E.E.R			3,6
▪ COP			4,23
▪ SEER			7,55
▪ SCOP			4,34

Nella località di Messina, è necessario adottare un modello più potente di unità esterna, in quanto la richiesta di raffrescamento non può essere soddisfatta dai dispositivi scelti per le altre due aree geografiche. La scelta è, quindi, ricaduta su due pompe di calore del modello ARUM280LTE5: ciascuna fornisce una potenza nominale di raffrescamento di 78,4 kW e una potenza nominale di riscaldamento di 78,4 kW.

Figura 70: unità esterna pompa di calore MULTI V5 ARUM280LTE5

Si tratta di pompe di calore VRF con fluido frigorifero R410a e scambio termico Aria-Refrigerante da collegare, mediante tubazioni frigorifere, con unità interne per la climatizzazione dell'aria che possono funzionare sia in raffreddamento sia in riscaldamento. Ciascuna unità è in realtà composta dall'accoppiamento di due macchine: ARUM160LTE5 e ARUM120LTE5.
Esse sono controllate da inverter, per cui il loro funzionamento può essere modulato; inoltre, sono adattate per essere installate all'esterno grazie al trattamento superficiale della loro struttura autoportante che conferisce resistenza agli agenti atmosferici.

Tabella 40: dati tecnici unità esterna ARUM160LTE5

- Dati tecnici

▪ Modello				ARUM160LTE5
▪ Capacità Raffreddamento	nota 1.5	Nom	kW	44.8
▪ Capacità Riscaldamento	nota 1.5	Max	kW	50.4
▪ Capacità Riscaldamento	nota 1.5	Nom	kW	44.8
▪ Capacità Riscaldamento		Max -7°C	kW	50.4
▪ Potenza assorbita Raffreddamento	nota 1.5	Nom	kW	17.23
▪ Potenza assorbita Riscaldamento	nota 1.5	Nom	kW	10.59
▪ E.E.R				2.60
▪ COP				4.23
▪ SEER				7.74
▪ SCOP				5.30

Tabella 41: dati tecnici unità esterna ARUM120LTE5

- Dati tecnici

▪ Modello				ARUM120LTE5
▪ Capacità Raffreddamento	nota 1.5	Nom	kW	33.6
▪ Capacità Riscaldamento	nota 1.5	Max	kW	37.8
▪ Capacità Riscaldamento	nota 1.5	Nom	kW	33.6
▪ Capacità Riscaldamento		Max -7°C	kW	37.8
▪ Potenza assorbita Raffreddamento	nota 1.5	Nom	kW	12.00
▪ Potenza assorbita Riscaldamento	nota 1.5	Nom	kW	8.00
▪ E.E.R				2.80
▪ COP				4.20
▪ SEER				7.71
▪ SCOP				4.84

Unità interne

La decisione di adottare 8 unità interne dello stesso modello ha fatto ricadere la scelta su dispositivi che fornissero poco più di un ottavo della potenza di raffrescamento totale richiesta.

Il modello di unità interna scelto è ARNU76GB8A4 per tutti i tre casi studio, in quanto esse riescono a soddisfare anche la maggiore richiesta di potenza di raffrescamento, ovvero 155 kW (Messina); all'interno del catalogo della azienda LG non sono presenti modelli meno potenti in grado di rispondere alle esigenze di raffrescamento dei casi di Torino e di Grosseto.

Sono dispositivi di tipo canalizzabile a media/alta prevalenza per sistemi a Volume di Refrigerante Variabile e vengono montati a soffitto all'interno del corridoio tecnico. Ciascuno fornisce un massimo di 22,4 kW in raffrescamento e un massimo di 25,2 kW in riscaldamento. L'impianto risulta sovradimensionato, ma la possibilità di regolazione e le strategie di utilizzo permettono di ottenere il funzionamento desiderato.

Figura 71: unità interna pompa di calore ARNU76GB8A4

Tabella 42: dati tecnici unità interna ARNU76GB8A4

- Caratteristiche tecniche

Modello Unità interna	Canalizzabile Med/Alta Prevalenza	**ARNU76GB8A4**
Alimentazione elettrica	Ø,V;Hz	1,220~240,50
Capacità Raffreddamento Nom	kW	22,4
Capacità Riscaldamento Nom	kW	25,2
Dimensioni (LxAxP) unità interna	mm	1562x460x688
Peso	kg	87
Ventilatore	Tipo	Sirocco Fan
	Potenza W	Nom.747 Max.800
	Portata m³/min	60 / 50 / 50
	Accoppiamen.	Diretto
	Prevalenza Minima (Pa)	59
	Prevalenza Massima (Pa)	245

Il condotto di espulsione di ciascun terminale interno è collegato alla relativa bocchetta di immissione installata nella parete del corridoio tecnico.

6.6. Calcolo dei costi

Il calcolo dei costi verrà eseguito valutando separatamente ciascun caso studio, in quanto:
- il costo delle pompe di calore è lo stesso nei primi due casi, ma differisce dal terzo;
- il costo delle unità interne è lo stesso;
- i costi di esercizio differiscono per ciascuna località, infatti a seconda dell'area geografica, la potenza richiesta per raffrescamento e riscaldamento è diversa.

Mediamente il costo di una unità esterna di pompa di calore VRF da circa 73 kW di potenza si aggira intorno ai 16000 €, mentre da 50 kW intorno ai 10000 € e da 40 kW intorno ai 9000 € **[116]**.

Il prezzo di unità interne con una potenza di raffrescamento di circa 22 kW e una di riscaldamento di circa 25 kW è circa 3500 € **[117]**.

Un ventilatore di immissione elicoidale monofase che assorbe una potenza di 200 W di potenza può costare 570 €, mentre un ventilatore di estrazione elicoidale monofase da circa 80 W può costare intorno ai 380 € **[118]**.

Invece, una serranda regolabile di dimensioni 360x360 mm richiede una spesa di 119 € e una bocchetta di immissione di dimensioni 1000x300 mm richiede 203 €.

Tabella 43: costi per acquisto componenti impianto di climatizzazione casi studio 1 e 2

CASI STUDIO 1 E 2			
Dispositivo	Prezzo unitario [€]	Quantità	Totale [€]
Unità esterne da circa 73 kW	16000	2	32000
Unità interne	3500	8	28000
Ventilatori immissione	570	2	1140
Ventilatori estrazione	380	10	3800
Serrande regolabili	119	18	2142
Bocchette di mandata	203	8	1624
TOTALE [€]			**68706**

Tabella 44: costi per acquisto componenti impianto di climatizzazione caso studio 3

CASO STUDIO 3			
Dispositivo	Prezzo unitario [€]	Quantità	Totale [€]
Unità esterna da circa 50 kW	10000	2	20000
Unità esterna da circa 40 kW	9000	2	18000
Unità interne	3500	8	28000
Ventilatori immissione	570	2	1140
Ventilatori estrazione	380	10	3800
Serrande regolabili	119	18	2142
Bocchette di mandata	203	8	1624
TOTALE [€]			**74706**

Il costo totale per l'acquisto di macchine, ventilatori, serrande e bocchette è circa 68706 € per le serre installate in Torino e Grosseto e di 74706 € per la serra installata a Messina.

Il prezzo di un impianto fotovoltaico potrebbe essere di circa 2000 € per 1 kWp per i moduli più performanti e tenendo anche conto del costo dell'inverter, delle staffe, dei cavi e dei contatori **[119]**.
Quindi l'impianto progettato richiederebbe una spesa di 27600 €, escludendo la manodopera per l'installazione.

Il calcolo dei costi d'esercizio è stato eseguito seguendo il procedimento spiegato nel paragrafo 5.6.
Si deve, però precisare come sia stato calcolato il termine "consumo energia" per ciascuna voce di costo:

- funzionamento delle pompe di calore in riscaldamento: la potenza termica fornita dalla macchina viene convertita in potenza elettrica assorbita dividendo la potenza di riscaldamento per lo SCOP (essendo un valore stagionale si ritiene più rappresentativo della vera prestazione della macchina). Il valore così ottenuto viene moltiplicato per le ore corrispondenti al periodo in cui si effettua il riscaldamento (circa 7 mesi da ottobre ad aprile);

- funzionamento delle pompe di calore in raffrescamento: la potenza frigorifera fornita dalla macchina viene convertita in potenza elettrica assorbita dividendo la potenza di raffrescamento per il SEER (essendo un valore stagionale si ritiene più rappresentativo della vera prestazione della macchina). Il valore così ottenuto viene moltiplicato per le ore corrispondenti al periodo in cui si effettua il raffrescamento (circa 5 mesi da maggio a settembre);

- ventilatori delle unità interne: conoscendo la potenza elettrica assorbita da ciascun ventilatore e moltiplicandola per il numero di unità interne si ottiene la potenza elettrica totale richiesta dai ventilatori delle unità interne. Essa viene moltiplicata per il periodo di funzionamento delle unità interne (tutto l'anno: 7 mesi in riscaldamento e 5 mesi in raffrescamento);

- ventilatori di immissione e di estrazione: conoscendo la potenza elettrica assorbita da ciascun ventilatore e moltiplicandola per il numero di ventilatori rispettivamente di immissione e di estrazione si ottiene la potenza elettrica totale richiesta dai ventilatori di immissione ed estrazione. Essa viene moltiplicata per il loro periodo di funzionamento (un anno).

I valori ottenuti vengono moltiplicati per il costo dell'energia elettrica e poi sommati, ottenendo il costo di esercizio per la climatizzazione della serra.
È stato valutato sia il costo nelle condizioni in cui le pompe di calore lavorassero alla potenza nominale e le ventole ruotassero alla massima velocità, sia il costo nel caso in cui le pompe di calore fornissero la massima potenza richiesta (in riscaldamento e in raffrescamento) e le ventole ruotassero alla massima velocità. Quest'ultimo corrisponde al costo di esercizio nel caso in cui i dispositivi lavorassero continuativamente alla potenza massima richiesta.
In realtà, i calcoli eseguiti sovrastimano il consumo effettivo dell'impianto, infatti il suo funzionamento può essere modulato a seconda dell'esigenza e quindi esso è in grado di fornire di volta in volta solo le potenze strettamente necessarie per conseguire gli obiettivi termo-igrometrici imposti.

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 45: riepilogo costi d'esercizio casi studio 1 e 2

	Caso potenze nominali - casi studio 1 e 2	TORINO	GROSSETO	Caso potenze nominali - caso studio 3	MESSINA
Ore riscaldamento [h]	5040	5040	5040	5040	5040
Ore raffrescamento [h]	3600	3600	3600	3600	3600
Consumo riscaldamento [kWh]	156 077	115 665	82 754	155 872	53 124
Consumo raffrescamento [kWh]	69 425	63 083	63 751	73 072	72 513
Consumo riscaldamento + raffrescamento [kWh]	**225 503**	**178 748**	**146 505**	**228 944**	**125 636**
Ore ventilatori/ventole [h]	8640	8640	8640	8640	8640
Consumo ventilatori e ventole [kWh]	62 000,64	62 000,64	62 000,64	62 000,64	62 000,64
Consumo totale [kWh]	**287 503**	**240 749**	**208 505**	**290 945**	**187 637**
Costo totale anno [€/anno]	**57 500,64**	**48 149,72**	**41 701,04**	**58 188,93**	**37 527,41**

Come si può notare da questo calcolo approssimativo, fornendo la massima potenza richiesta, che è inferiore rispetto a quella nominale erogabile dalle macchine, la spesa si riduce.
La riduzione è maggiore nel terzo caso studio.

Considerando di installare un impianto fotovoltaico come quello descritto nel paragrafo 5.5.5.,la spesa per l'energia elettrica si ridurrebbe, in particolare:

Tabella 46: riepilogo costi d'esercizio considerando risparmio dato dal fotovoltaico

	TORINO	GROSSETO	MESSINA
Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico [kWh/anno]	15559,0	16730,5	17374,57
Consumo totale di energia elettrica per la climatizzazione [kWh/anno]	240748,6	208505,2	187637,0
Differenza tra energia elettrica consumata per la climatizzazione ed energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico [kWh/anno]	225189,6	191774,6	170262,5
Costi d'esercizio per climatizzazione con fotovoltaico [€/anno]	45037,9	38354,9	34052,5
Costi d'esercizio per climatizzazione senza fotovoltaico [€/anno]	48149,7	41701,0	37527,4
Risparmio [€/anno]	3112	3346	3475
Risparmio [%]	6,5	8,0	9,3

Lo sfruttamento dell'energia elettrica prodotta dai moduli fotovoltaici comporta un risparmio che arriva anche al 9,3% (nel caso di Messina) del consumo di energia elettrica totale per la climatizzazione.
L'adozione di moduli fotovoltaici sembrerebbe più conveniente nella località di Messina, ma le percentuali di risparmio conseguibile risultano in tutti i casi limitate; volendo aumentarle, si potrebbe ricorrere all'installazione di un impianto più potente. Essa permetterebbe di conseguire una maggiore riduzione dei costi di esercizio a fronte, però, di un maggior investimento inziale. Questa soluzione verrà valutata nel paragrafo 7.5.

Infine, per ciascuna località è stato calcolato il Pay Back Period (PBP), ovvero il tempo che deve trascorrere affinché le risorse investite (in questo caso la spesa per l'acquisto dell'impianto fotovoltaico) siano interamente recuperate con i flussi di cassa prodotti dall'investimento stesso (in questo caso il prodotto tra il costo dell'energia elettrica, 0,2 €/kWh e la producibilità dell'impianto espressa in kWh/anno).

Tabella 47: Pay Back Period

	TORINO	GROSSETO	MESSINA
Pay Back Period [anni]	8,86	8,25	7,94

Come si può notare, il tempo di rientro dei costi sostenuti per l'installazione dell'impianto fotovoltaico è minore nella località di Messina, grazie alla maggiore producibilità dell'impianto stesso dovuta alla maggiore disponibilità di irradiazione solare annuale (l'investimento iniziale è uguale nelle tre località oggetto di studio).

6.7. Confronto

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva contenente le principali informazioni dedotte tramite i calcoli effettuati:

Tabella 48: riassunto risultati

CASI STUDIO	TORINO	GROSSETO	MESSINA
RISCALDAMENTO			
Temperatura media esterna [°C]	-8	0	5
Umidità relativa media esterna [%]	82,8	62,9	68,5
Carico di ventilazione [kW]	78,05	55,75	41,81
Potenza dispersa attraverso l'involucro [kW]	21,71	15,51	11,63
Potenza totale di riscaldamento [kW]	**99,76**	**71,26**	**53,44**
Costo per il riscaldamento [€/anno]	**23 132,90**	**16 550,71**	**10 624,76**
RAFFRESCAMENTO			
Temperatura media esterna [°C]	31	33	32,3
Umidità relativa media esterna [%]	50	42	48
Umidità specifica media esterna [kg_{vapore}/kg_{aria}]	0,01413	0,01329	0,01462
Portata di vapore [kg/s]	0,000746	0,000803	0,000847
Carico sensibile di ventilazione [kW]	48,92	54,58	52,68
Carico latente di ventilazione [kW]	31,32	25,64	34,97
Potenza massima di raffrescamento [kW]	132,3	133,7	155,6
Differenza di potenza tra caso con ombreggiamento solo su tetto e su tetto e pareti [kW]	10,7	10,1	19,2
Differenza di potenza tra caso con ombreggiamento solo su tetto e su tetto e pareti [%]	8,1	7,6	12,3
Costo massimo per il raffrescamento [€/anno]	12 616,69	12 750,20	14 502,52
Costo totale per climatizzazione [€/anno]	35 749,59	29 300,91	25 127,28
FOTOVOLTAICO			
Irradiazione solare annuale [kWh/m²]	1610	1732	1799
Energia elettrica prodotta all'anno [kWh/anno]	15 559	16 731	17 375
Costi d'esercizio senza fotovoltaico [€/anno]	48 149,7	41 701,0	37 527,4
Risparmio [€/anno]	3112	3346	3475
Risparmio [%]	6,5	8,0	9,3
Pay Back Period [anni]	8,86	8,25	7,94

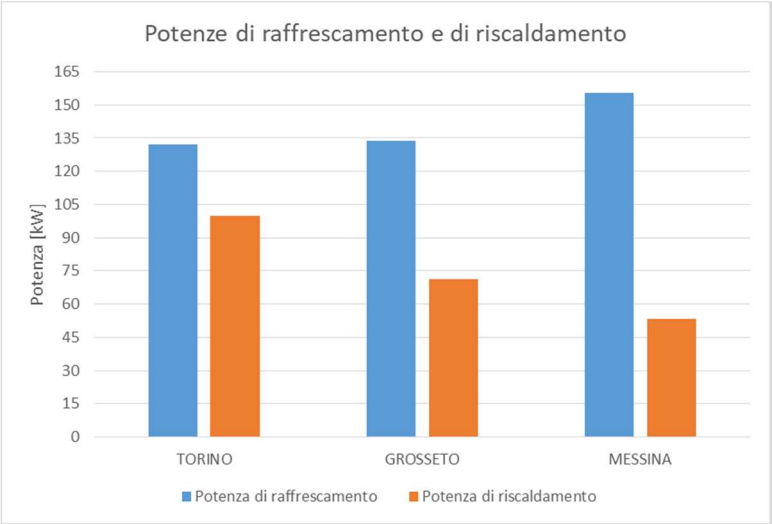


Figura 72: confronto potenze richieste per raffrescamento e per riscaldamento

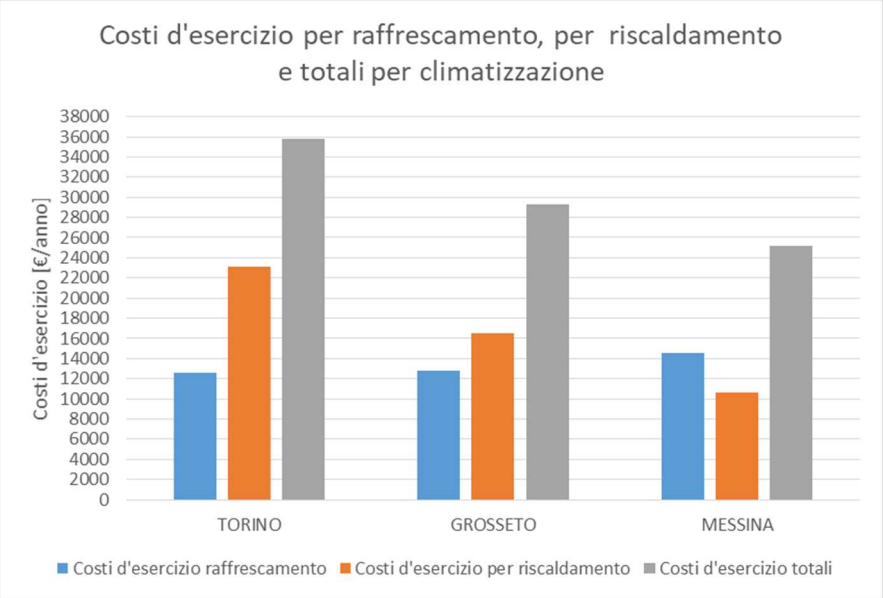


Figura 73: confronto costi d'esercizio per raffrescamento e per riscaldamento e totali

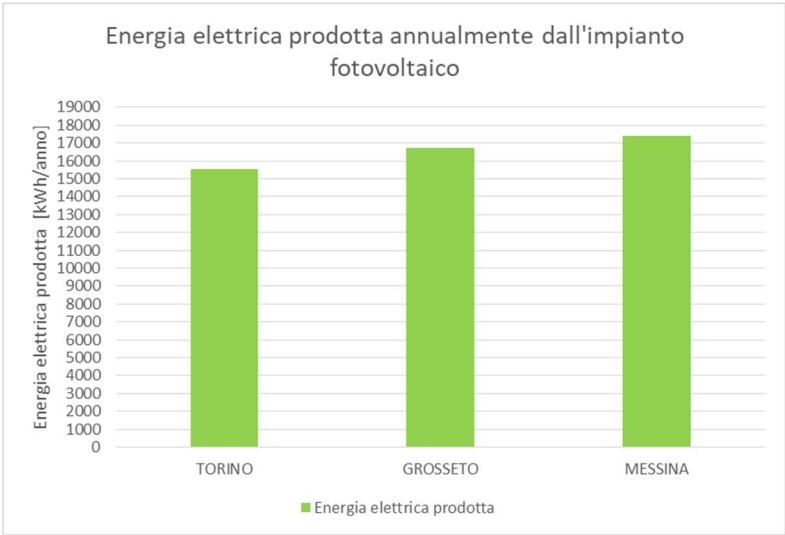


Figura 74: confronto energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico

Nei mesi invernali la principale responsabile dell'aumento o della diminuzione dell'energia necessaria per il riscaldamento è la differenza di temperatura tra esterno ed interno: più essa è elevata, maggiore sono il carico di ventilazione e la potenza dispersa attraverso l'involucro.

Nei mesi estivi l'effetto combinato di temperatura e umidità relativa esterne e dell'irradiazione solare media giornaliera comporta diverse conseguenze.

La temperatura media giornaliera esterna e l'irradiazione solare media giornaliera sono i parametri che maggiormente influiscono sull'evapotraspirazione delle piante e, quindi, sul consumo idrico, il quale si trasforma in portata di vapore immessa nell'ambiente interno alla serra. Un aumento di temperatura e di irradiazione solare si traduce in una maggiore portata di vapore acqueo: questo spiega i 0,000847 kg/s di vapore ottenuti nella località di Messina, contro i 0,000746 kg/s che caratterizzano la coltivazione in Torino e i 0,000803 kg/s in Grosseto.

Il carico di ventilazione è condizionato dalla variazione delle condizioni termo-igrometriche esterne e di quelle interne poste come obiettivo e dall'entità dalla portata di rinnovo.
Siccome le condizioni interne obiettivo, così come anche la portata d'aria immessa in serra, sono le stesse per ogni località, questi due fattori non comportano differenze nei tre casi studio; tali diversità sono dovute alle differenti temperatura e umidità relativa esterne.
Come si può notare, la componente sensibile del carico di ventilazione risulta sempre maggiore di quella latente: ciò significa che la differenza di temperature tra interno ed esterno gioca un ruolo più determinante rispetto alla differenza tra le umidità specifiche (quest'ultima tiene conto non solo delle condizioni interne ed esterne, ma anche del vapore prodotto dalle piante). Questo fatto è probabilmente anche legato alla scelta arbitraria delle condizioni interne obiettivo.
Un'analisi più approfondita che metta in luce anche l'influenza delle condizioni interne è proposta nel paragrafo 7.3.

Un ulteriore aspetto che accompagna la climatizzazione estiva è l'adozione di un sistema di ombreggiamento solo sul tetto della serra o contemporaneamente su tetto e pareti; alle due possibilità di montaggio sono legate potenze di raffrescamento differenti.
Come si può intuire, la seconda soluzione comporta una minore richiesta di energia e anche minori costi d'esercizio in quanto è in grado di bloccare una maggiore quantità di radiazione solare che altrimenti penetrerebbe all'interno della serra, scaldandola.
La differenza maggiore si riscontra nella località di Messina, 12,3% del carico di raffrescamento totale con ombreggiamento solo su tetto, contro l'8,1% per Torino e il 7,6% per Grosseto.

Osservando ora i costi d'esercizio si può affermare che nei casi di Torino e Grosseto, anche se la potenza richiesta per il riscaldamento è inferiore rispetto quella per il raffrescamento, i costi relativi al riscaldamento siano maggiori a causa del valore del coefficiente SCOP (circa pari a 4) inferiore al valore di SEER (circa pari a 7,5) e della maggiore durata del periodo di riscaldamento, 7 mesi, contro i 5 mesi del "periodo estivo".
Nella località di Messina, in cui le potenze in gioco hanno portato alla scelta di dispositivi più potenti rispetto quelli installati nelle precedenti aree, invece, la netta superiorità della richiesta di raffrescamento rispetto quella di riscaldamento e uno SCOP leggermente maggiore (circa pari a 5) fanno in modo che i costi d'esercizio per la climatizzazione estiva siano superiori di quelli per il riscaldamento.

Il "costo totale per climatizzazione" comprende, oltre ai costi legati alle potenze di riscaldamento e raffrescamento anche l'energia elettrica necessaria per alimentare i ventilatori

delle unità interne e i ventilatori di immissione ed estrazione. Essi, però, risultano uguali nei tre casi studio.

In conclusione, a parità di condizioni interne obiettivo e di portata di ventilazione si può notare il ruolo fondamentale che le condizioni climatiche esterne giocano sulla richiesta di potenza per la climatizzazione: dove l'inverno è più freddo, la potenza termica che deve essere fornita è di gran lunga maggiore rispetto quella relativa ad una località con inverni più miti (99,76 kW per Torino contro i 53,44 kW per Messina); allo stesso tempo, dove le estati sono più fresche, la potenza di raffrescamento richiesta è minore (132,3 kW a Torino rispetto i 155,6 kW a Messina).
Dal punto di vista dei costi associati a queste potenze si può affermare che la gestione dello stesso modello di serra, con installato lo stesso impianto, sarà più onerosa laddove gli inverni sono più rigidi, infatti i costi d'esercizio collegati al raffrescamento sono simili per i diversi casi studio, ma i costi relativi al riscaldamento differiscono notevolmente.
La spesa maggiore si riscontra nel caso di Torino a causa dell'inverno particolarmente freddo.

Per quanto riguarda l'impianto fotovoltaico, laddove sia presente una maggiore quantità di irradiazione solare, anche la produzione di energia elettrica sarà maggiore.
Essa, infatti, raggiunge i circa 17375 kWh/anno a Messina, che dispone di 1799 kWh/m² all'anno, contro i 15559 kWh/anno prodotti a Torino e i 16731 kWh/anno prodotti a Grosseto.

L'energia prodotta può essere utilizzata per alimentare le pompe di calore, conseguendo un risparmio energetico del 6,5% rispetto al consumo di energia elettrica totale per la climatizzazione a Torino, del 8% a Grosseto e del 9,3% a Messina.
In tutti i tre casi il risparmio è modico, si tratta di poche migliaia di euro su una spesa annuale per la climatizzazione di qualche decina di migliaia di euro.
In ogni caso, l'adozione di un impianto fotovoltaico risulta più vantaggiosa nella località di Messina, sia dal punto di vista della maggiore producibilità annuale sia dal minore Pay Back Period.

6.8. Variazione inclinazione moduli fotovoltaici

Montare i moduli fotovoltaici con un'inclinazione pari a 8,4°, scelta necessaria in quanto essi sono posti in sostituzione delle lastre di policarbonato della falda sud del tetto, comporta una resa annuale inferiore rispetto quella ottenibile nel caso in cui l'inclinazione fosse quella che massimizza la produzione annuale, ovvero un'inclinazione pari alla latitudine meno 10°:

Tabella 49: confronto producibilità impianto fotovoltaico con inclinazione reale ed ottimale

Località	Tilt vero	$E_{el,pv,out}$ vero [kWh]	Tilt ottimo	$E_{el,pv,out}$ ottimo [kWh]	$\Delta E_{el,pv,out}$ [kWh]
Torino	8.4°	15559,46	35°	17380,85	-1821,39
Grosseto	8.4°	16730,54	32°	18323,38	-1592,84
Messina	8.4°	17374,57	28°	18471,47	-1096,89

Si nota che nella località di Torino la mancata produzione di energia elettrica dovuta all'inclinazione non ottimale dei pannelli è maggiore rispetto gli altri casi, probabilmente a causa della maggiore differenza tra l'inclinazione ottimale e quella reale.

Potrebbe essere utile in fase di progettazione della struttura della serra, conoscendo il luogo in cui essa verrà installata, conferire alle falde del tetto una inclinazione pari a quella che permette di ottimizzare la produzione di energia da parte di un eventuale impianto fotovoltaico, compatibilmente con le esigenze delle colture.
Questa soluzione si scontra inevitabilmente con la necessità di creare una standardizzazione nella costruzione delle serre (la quale renderebbe molto più semplice e rapida sia la loro produzione sia il loro montaggio e manutenzione), ma garantirebbe una maggiore flessibilità e un migliore sfruttamento delle potenzialità del luogo in cui la serra viene installata.

Ad esempio, nel caso di Torino, considerando la tipologia di serra studiata, se l'inclinazione delle falde del tetto fosse di 35°, ammettendo di mantenere la stessa altezza delle pareti laterali delle due parti serra, l'altezza del corridoio tecnico dovrebbe essere di 4,4 m.
Questo valore è al limite della pratica comune per le serre aeroponiche di non superare i 4 m di altezza, in modo da facilitare la climatizzazione dell'ambiente e non creare una eccessiva stratificazione dell'aria.
Per ottenere al massimo un'altezza del corridoio tecnico di 3 m, l'inclinazione delle falde del tetto non dovrebbe superare i 16°, valore che consentirebbe comunque di aumentare la produzione annuale di energia elettrica, avvicinandosi al valore di tilt ottimale.

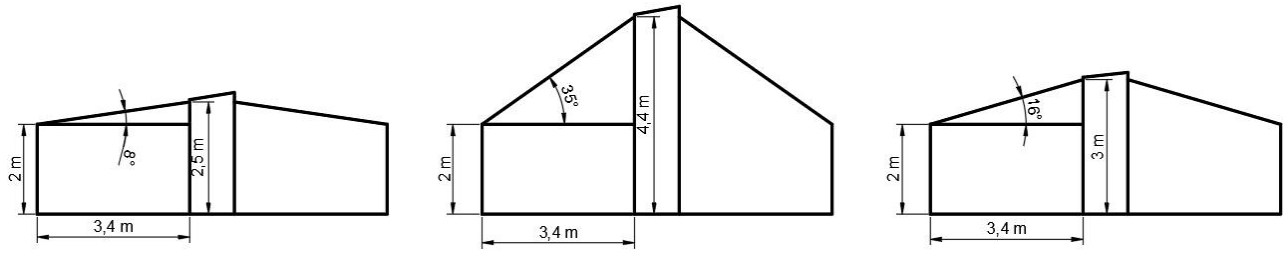


Figura 75: confronto tra diverse inclinazioni delle falde del tetto della serra

Valori circa pari a 16°, inoltre, si avvicinano al valore di inclinazione dei moduli che massimizzerebbe la produzione di energia nei mesi estivi, ovvero 20° per Torino, 17° per Grosseto e 13° per Messina (ottenuti sottraendo 25° alla latitudine).
Gli angoli che consentirebbero la massima produzione nei mesi invernali sono troppo elevati per poter essere realizzati nella struttura: 58° per Torino, 55° per Grosseto e 51° per Messina (ottenuti sommando 13° alla latitudine).

Tabella 50: confronto producibilità energia elettrica in funzione dell'inclinazione

Località	Tilt ottimo estate	$E_{el,pv,out}$ ottimo estate [kWh]	Tilt ottimo inverno	$E_{el,pv,out}$ ottimo inverno[kWh]	$E_{el,pv,out}$ vero [kWh]
Torino	20°	16677,80	58°	16653,45	15559,46
Grosseto	17°	17626,31	55°	17666,40	16730,54
Messina	13°	17733,73	51°	17566,23	17374,57

Capitolo 7. Variazione delle potenze richieste in relazione a modifiche di alcuni parametri

In relazione al caso studio 1, ovvero scegliendo di installare la serra aeroponica sul territorio di Torino, si osserva come si modifichino le potenze in gioco al variare di alcuni parametri: percentuale di ombreggiamento, orientazione spaziale della serra, condizioni interne obiettivo e materiale di copertura.

La variazione di questi parametri permette, inoltre, di individuare le variabili su cui sia più conveniente agire per ottenere una economica riduzione dei consumi.

7.1. Variazione ombreggiamento

Risulta interessante valutare la richiesta di potenza di raffrescamento al variare della percentuale di radiazione solare intercettata dal sistema di ombreggiamento, i risultati sono riportati in tabella:

Tabella 51: potenza di raffrescamento al variare dell'ombreggiamento

		Percentuale di ombreggiamento [%]							
		0	30	40	50	60	70	80	85
		Coefficiente di ombreggiamento [%]							
		100	70	60	50	40	30	20	15
Ombreggiamento solo su tetto	Q_raff_tot [kW]	183,6	158	149,4	140,9	132,3	123,8	115,3	111
Ombreggiamento su tetto e pareti	Q_raff_tot [kW]		152,6	142,2	131,9	121,6	111,2	100,9	95,7
Differenza	ΔQ_raff_tot [kW]	-	5,4	7,2	9	10,7	12,6	14,4	15,3

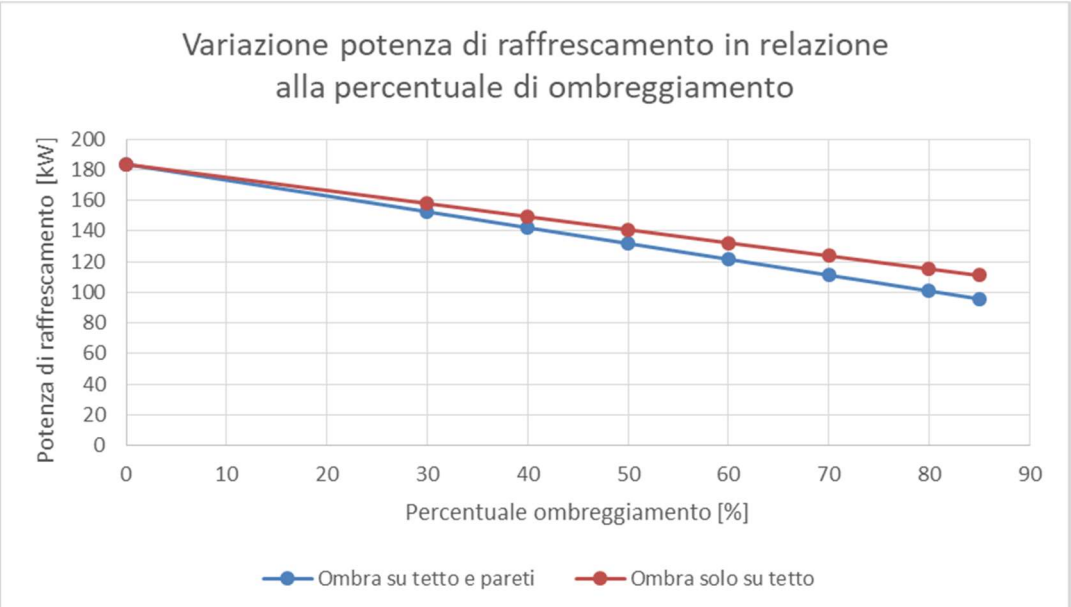


Figura 76: andamento potenza per il raffrescamento al variare del grado di ombreggiamento

La percentuale di ombreggiamento corrisponde alla quota di radiazione solare riflessa/assorbita dal telo di copertura, mentre il coefficiente di ombreggiamento indica la quantità di radiazione solare che penetra all'interno della serra. Quest'ultimo è il parametro che rientra nel calcolo del Q_s come indicato nel paragrafo 5.5.3.

Siccome si ipotizza di utilizzare un ombreggiamento solo durante la stagione estiva, la potenza di riscaldamento non viene modificata dalla variazione del coefficiente di ombreggiamento.
In realtà il dispiegamento dei teli durante le ore serali e la notte potrebbe dare un contributo alla coibentazione della serra, riducendo, così, la potenza necessaria per il riscaldamento notturno.

La variazione della percentuale di ombreggiamento condiziona l'entità del carico dovuto alla radiazione solare. Vi è anche un'influenza sulla traspirazione delle piante e, quindi, indirettamente, sul carico di ventilazione; però, non potendo quantificare l'entità della diminuzione o dell'aumento della traspirazione delle piante in relazione alla modificazione dell'ombreggiamento, la variazione del termine di ventilazione non può essere quantificata.

I calcoli sono stati effettuati prendendo come riferimento i valori di ombreggiatura accettabili per diversi tipi di colture, dalle solanaceae (30%) alle baby leaf (fino all'85%).
È stato anche riportato il caso in cui non si utilizzi un sistema di ombreggiamento, ovvero il caso in cui il coefficiente di ombreggiamento sia posto pari a 1: la potenza di raffrescamento richiesta, come ci si poteva aspettare, è massima. Rispetto ad essa, anche solo una percentuale di ombreggiamento del 30% comporta un notevole risparmio (circa 25 kW).

I risultati mostrano come un aumento di potere ombreggiante dal 30% all'85% comporti una riduzione di potenza richiesta di circa 47 kW nel caso in cui lo schermo sia posto solo sul tetto o di 57 kW se si coprissero anche le pareti.

La scelta di installare il sistema di ombreggiamento sia sul tetto sia sulle pareti laterali comporta un risparmio fino a 15 kW che, però, si scontra con la necessità di promuovere l'ingresso della radiazione fotosensibile PAR durante la mattina e il pomeriggio **[54]**.

Sono stati anche valutati i costi d'esercizio che una variazione di ombreggiamento potrebbe comportare:

Tabella 52: costi d'esercizio per il raffrescamento al variare del grado di ombreggiamento

		Percentuale di ombreggiatura [%]							
		0	30	40	50	60	70	80	85
		Coefficiente di ombreggiamento [%]							
		100	**70**	**60**	**50**	**40**	**30**	**20**	**15**
Ombreggiamento solo su tetto	**Costo d'esercizio per il raffrescamento [€/anno]**	17509	15068	14247	13437	12617	11806	10995	10585
Ombreggiamento su tetto e pareti	**Costo d'esercizio per il raffrescamento [€/anno]**		14553	13561	12579	11596	10605	9622	9126
Differenza	**Δ Costo d'esercizio per il raffrescamento [€/anno]**	-	515	687	858	1020	1202	1373	1459

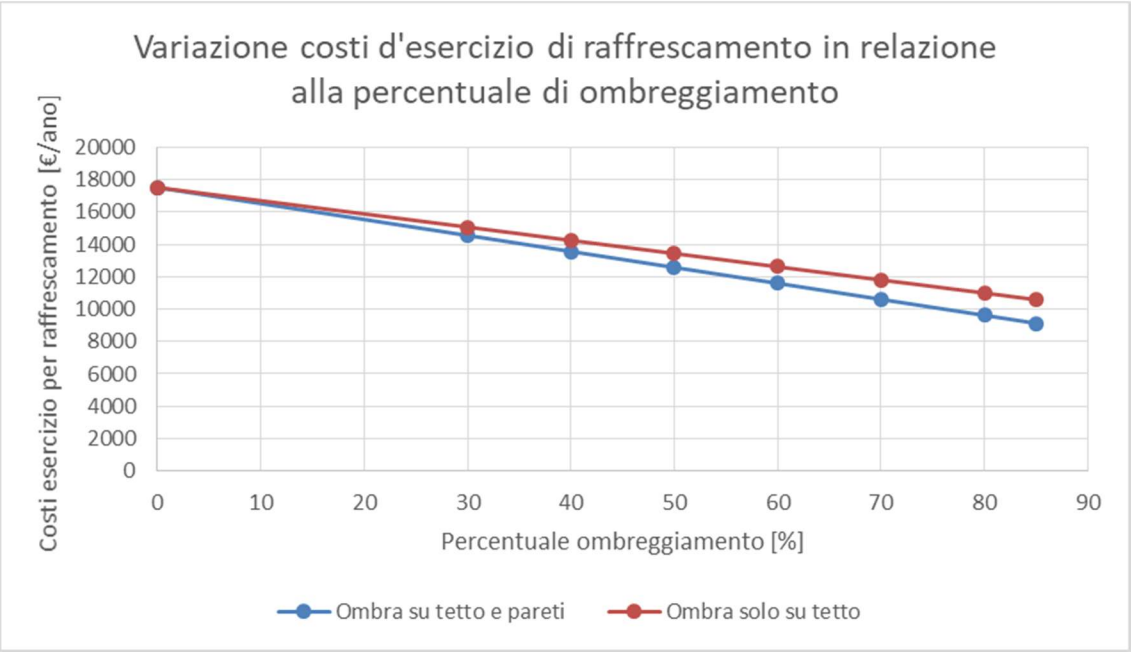


Figura 77: andamento costi d'esercizio per il raffrescamento al variare del grado di ombreggiamento

Come previsto, il maggiore costo d'esercizio è associato all'assenza di sistemi di ombreggiamento (17509 €/anno).
La riduzione ottenibile varia da un minimo di 2441 €/anno ad un massimo di 6924 €/anno, all'aumentare della percentuale di ombreggiamento (ovvero al diminuire del coefficiente di ombreggiamento) nel caso in cui la schermatura sia montata solo sul tetto e da un minimo di 2956 €/anno ad un massimo di 8383 €/anno in caso di ombreggiamento sia su tetto sia su pareti.
Inoltre, si nota come l'installazione del telo sia su tetto sia su pareti comporti, a parità di coefficiente di ombreggiamento, una maggiore riduzione della spesa annuale per il raffrescamento.
In conclusione, come precedentemente osservato in relazione alla variazione della potenza, la scelta economicamente più conveniente sarebbe installare un sistema ombreggiante sia su pareti sia su tetto in grado di bloccare l'ingresso della maggior parte della radiazione solare (ad esempio, in grado di bloccare l'85% della radiazione).
Questo fatto, però, si scontra con la richiesta di luce necessaria per il corretto sviluppo di alcuni tipi di coltivazioni.

7.2. Variazione orientazione serra

Le analisi contenute nel capitolo 6 sono state effettuate posizionando la serra con orientazione est-ovest, ora essa viene ruotata di 90° così da essere posta con il lato lungo sulla direttrice nord-sud.

Variando l'orientazione spaziale della serra la parete che prima era esposta a sud, ora si trova ad ovest e quella che prima era esposta a nord ora si trova in direzione est, questo fa sì che si modifichi la potenza termica solare che penetra attraverso ciascuna parete.
Anche la produzione di energia elettrica dell'impianto solare risente del cambiamento di orientazione.

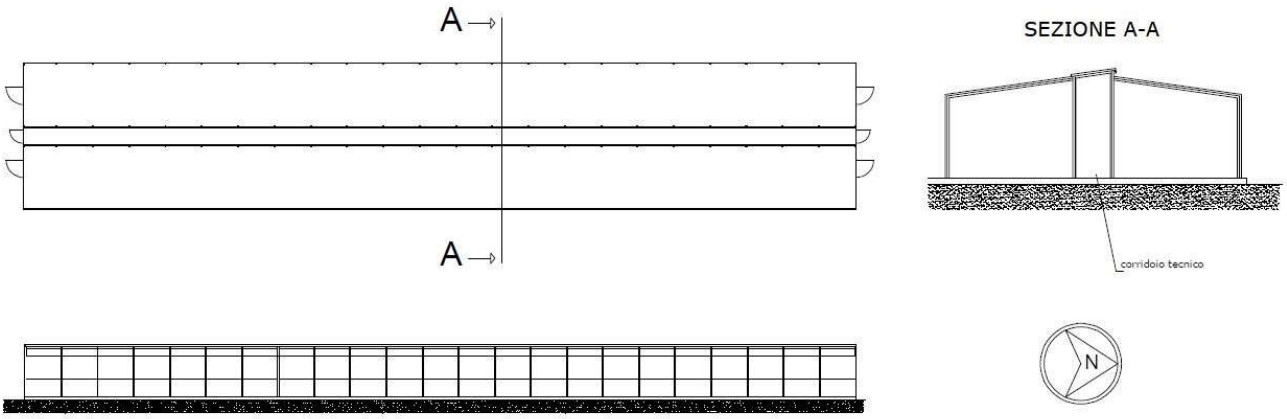


Figura 78: serra orientata con il lato lungo in direzione Nord-Sud

Potenza richiesta per riscaldamento

I dati relativi alle condizioni climatiche esterne, alla ventilazione e alle condizioni interne obiettivo non cambiano:

Tabella 53: calcolo umidità relativa esterna periodo invernale caso studio 1

Calcolo UMIDITÀ RELATIVA ESTERNA INVERNO				
TORINO	DIC	GEN	FEB	MAR
Temperatura media ambiente [°C]	2,7	1,3	3,2	8,4
Pressione d vapore [Pa]	654	558	618	888
Pressione di saturazione alla temperatura media ambiente [Pa]	745	675	770	1102
Umidità relativa φ [%]	0,88	0,83	0,80	0,81
Umidità relativa media	0,828	=	82,8	%

Tabella 54: dati riscaldamento caso studio 1

DATI		
Volumi ora	10	Vol/h
Volumi al secondo	0,00278	Vol/s
Temperatura esterna	-8	°C
Umidità relativa esterna	82,8	%

Tabella 55: valori temperatura e umidità relativa interne riscaldamento caso studio 1

OBIETTIVI		
Temperatura interna	20	°C
Umidità relativa interna	≤ 50	%

I risultati ottenuti applicando il modello descritto nel paragrafo 5.5.2., sono i seguenti:

Tabella 56: risultati per condizioni riscaldamento

Portata di rinnovo	2,3089	m³/s
CARICHI TERMICI		
Carico di ventilazione	78046,0	W
Carico pareti verso esterno	1311,5	W
Carico verso soffitto	18763,1	W
Carico verso pavimento	1819,0	W
Totale orientazione sud-nord	99939,6	W
Totale orientazione est-ovest	99757,4	W
Variazione	+182.6	W
Costi d'esercizio orientazione sud-nord	23211,8	€/anno
Costi d'esercizio orientazione est-ovest	23169,5	€/anno
Variazione	+42,3	€/anno

L'aumento di potenza richiesta è di 182,6 W ed è da imputare al fattore correttivo che tiene conto dell'esposizione di ciascuna parete disperdente: ora le pareti più estese sono rivolte ad est e ad ovest, cui corrispondono i fattori 0,15 e 0,1, contro lo 0,15 per il nord e il 0,05 per il sud. Questi fattori sono riportati nella normativa UNI 7357:74.

I relativi costi d'esercizio aumentano di soli 42,3 € all'anno.

Potenza richiesta per raffrescamento

I dati iniziali relativi alle condizioni climatiche esterne, alla ventilazione e alle condizioni interne obiettivo non cambiano.
Ciò che varia è l'irradianza solare che attraversa ciascuna parete.

Tabella 57: dati raffrescamento caso studio 1

DATI		
Volumi ora	10	vol/h
Volumi al secondo	0,00278	vol/s
Portata di rinnovo	2,309	m³/s
Latitudine	45° 7'	
Longitudine	7° 43'	
Altitudine	239	
Temperatura massima	31	°C
Variazione massima di temperatura	11	°C
Umidità relativa esterna	50	%
Mesi più caldi	luglio	
Coefficiente di ombreggiatura	40	%

Tabella 58: valori temperatura e umidità relativa interne raffrescamento caso studio 1

OBIETTIVI		
Temperatura interna	25	°C
Umidità relativa interna	≤ 50	%

Tabella 59: calcolo carico sensibile e latente di ventilazione raffrescamento

Calcolo $Q_{vent,sens}$ e $Q_{vent,lat}$			
Portata aria rinnovo	G_{aria}	2,771	kg/s
Portata di vapore	G_{vapore}	0,000746	kg/s
Umidità specifica esterna	x_E	0,0141	kg_{vap}/kg_{aria}
Umidità specifica interna	x_I	0,00988	kg_{vap}/kg_{aria}
Temperatura uscita unità interna	T_U	13,45	°C
Umidità specifica uscita unità interna	x_U	0,00961	kg_{vap}/kg_{aria}
Carico sensibile di ventilazione	$Q_{vent,sens}$	48918	W
Carico latente di ventilazione	$Q_{vent,lat}$	31316	W

Applicando il modello di calcolo descritto nel paragrafo 5.5.3., si ottiene il seguente andamento del carico termico necessario per il raffrescamento.
Il procedimento è stato applicato due volte:
- per calcolare la richiesta di raffrescamento srotolando il telo di ombreggiamento solo sul tetto in modo da permettere alla radiazione ultravioletta di penetrare, non attenuata, tramite le pareti;
- per determinare la richiesta di raffrescamento considerando di coprire sia il tetto sia le pareti della serra con il telo ombreggiante.

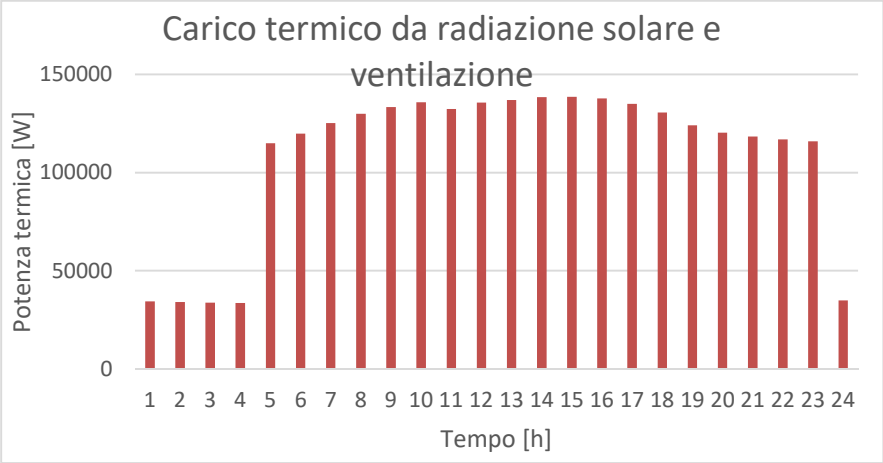


Figura 79: andamento nel tempo del carico termico estivo ombreggiamento solo su tetto

Tabella 60: variazione potenze e costi d'esercizio per il raffrescamento con ombreggiamento solo su tetto

Totale orientazione sud-nord	138 600	W
Totale orientazione est-ovest	132 300	W
Variazione	6300	W
Costi d'esercizio orientazione sud-nord	13217,5	€/anno
Costi d'esercizio orientazione est-ovest	12616,7	€/anno
Variazione	+601	€/anno

Il valore massimo si manifesta alle ore 14 ed è pari a 138,6 kW, contro i 132,3 kW richiesti nel caso di orientazione est-ovest della serra. L'aumento di potenza è di 6,3 kW: i carichi di ventilazione sensibile e latente non cambiano, è il carico termico dovuto alla radiazione solare che si modifica a causa della diversa orientazione della serra.

L'aumento dei costi d'esercizio legati al raffrescamento è di 601 € all'anno.

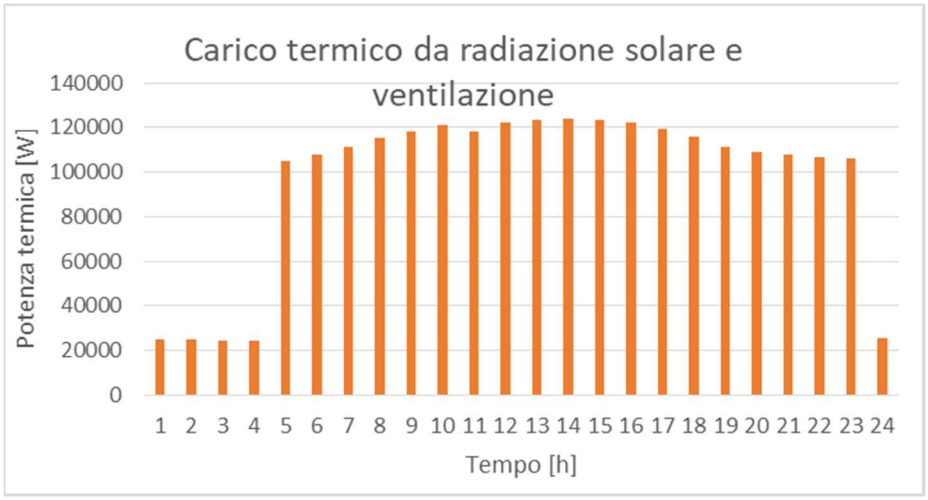


Figura 80: andamento nel tempo del carico termico estivo ombreggiamento su tetto e pareti

Tabella 61: variazione potenze e costi d'esercizio per il raffrescamento con ombreggiamento su tetto e pareti

Totale orientazione sud-nord	124 000	W
Totale orientazione est-ovest	121 600	W
Variazione	2400	W
Costi d'esercizio orientazione sud-nord	11825,2	€/anno
Costi d'esercizio orientazione est-ovest	11596,3	€/anno
Variazione	+229	€/anno

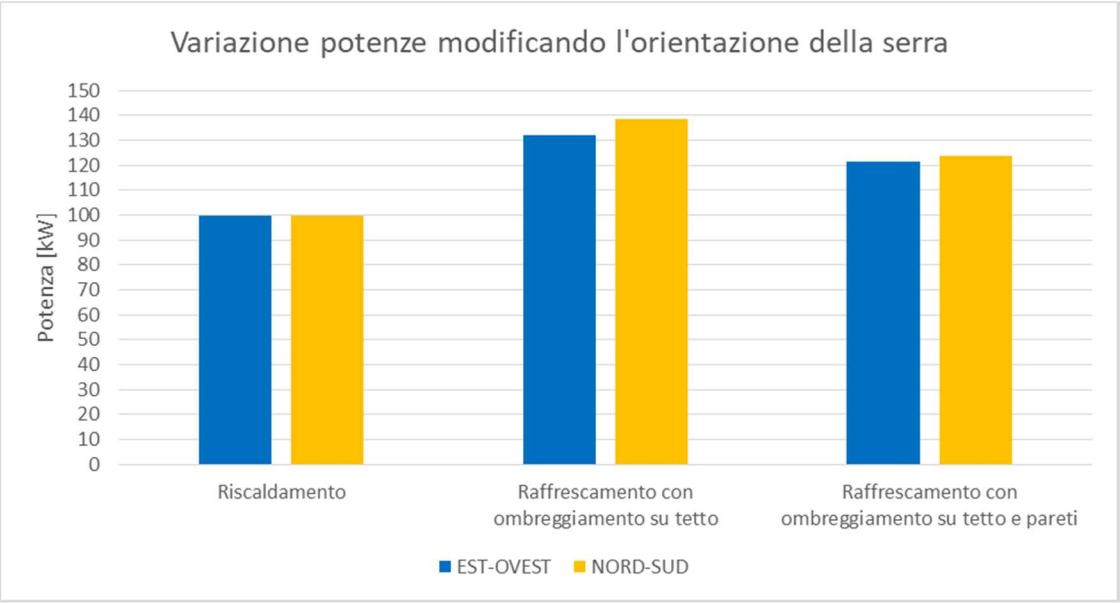


Figura 81: variazione potenze in gioco al variare dell'orientazione della serra

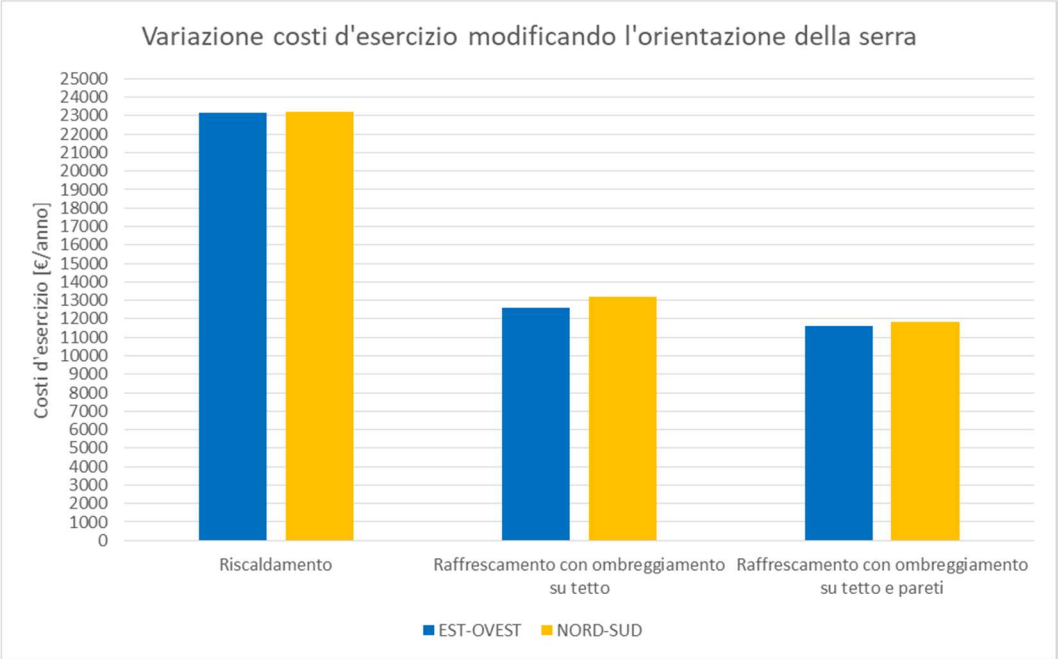


Figura 82: variazione costi d'esercizio al variare dell'orientazione della serra

Il valore massimo si manifesta alle ore 14 ed è pari a 124 kW, contro i 121,6 kW richiesti nel caso di orientazione est-ovest della serra. L'aumento di potenza è di 2,4 kW: i carichi di ventilazione sensibile e latente non cambiano, è il carico termico dovuto alla radiazione solare che si modifica a causa della diversa orientazione della serra.

L'aumento dei costi d'esercizio legati al raffrescamento è di 229 € all'anno.

Queste variazioni si spiegano ricordando che le pareti che prima erano attraversate dalla radiazione in direzione sud, ora sono attraversate da quella in direzione ovest che, in questo caso, è mediamente maggiore alla precedente ed ora si trova ad interessare una superficie maggiore.

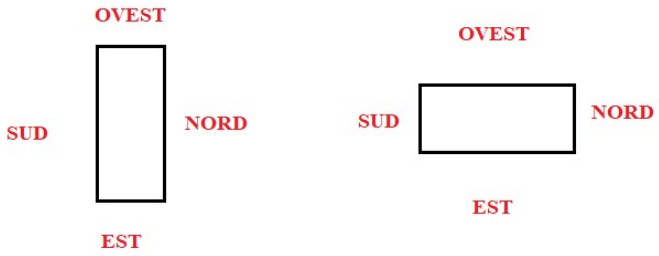


Figura 83: variazione orientazione serra

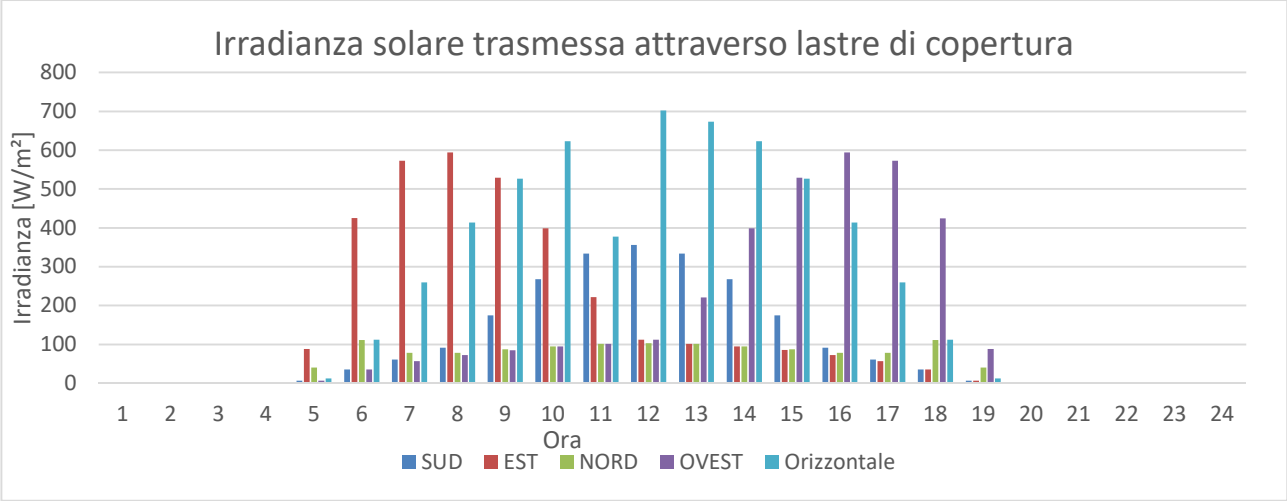


Figura 84: andamento dell'irradianza trasmessa attraverso la copertura durante l'arco della giornata

È possibile confrontare anche le conseguenze che discendono dalla scelta di porre il telo ombreggiante solo su tetto o su tetto e pareti:

Tabella 62: risparmio dato dallo srotolamento del telo ombreggiante sia su tetto sia su pareti

		Ombreggiamento solo su tetto	Ombreggiamento su tetto e pareti	Variazione	Variazione percentuale
EST-OVEST	Potenza di raffrescamento [kW]	132,3	121,6	**10,7**	**8,1 %**
	Costi d'esercizio [€/anno]	12616,7	11596,3	**1020,4**	
NORD-SUD	Potenza di raffrescamento [kW]	138,6	124	**14,6**	**10,5 %**
	Costi d'esercizio [€/anno]	13217,5	11825,2	**1392,3**	

Se la conformazione del territorio, la presenza di ostacoli o di altre strutture dovesse costringere ad adottare una orientazione della serra in direzione nord-sud, lo srotolamento del telo ombreggiante sia su tetto sia su pareti consentirebbe una riduzione di potenza di 14,6 kW (10,5 % della richiesta di potenza maggiore), cui corrisponde un risparmio di 1392,3 €/anno rispetto al suo utilizzo solo sul tetto.

Si può, inoltre, notare che nel caso di orientazione nord-sud, il risparmio derivante dalla completa ombreggiatura della struttura della serra sarebbe leggermente maggiore rispetto quello ottenibile in caso di orientazione est-ovest: 10,5% contro l'8,1%.

In conclusione, l'orientazione est-ovest della serra risulta essere la più vantaggiosa; ma, qualora non fosse possibile adottarla, può essere utile ricordare che la convenienza di ombreggiare contemporaneamente tetto e pareti sarebbe maggiore rispetto quella che si avrebbe nel caso di orientazione est-ovest.
I risultati ottenuti sono in linea con le osservazioni dello studioso Sethi **[120]**, il quale afferma che l'orientazione est-ovest sia più conveniente a diverse latitudini, infatti comporta una minore spesa per il riscaldamento e per il raffrescamento.

Variazione della producibilità di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico

Modificando l'orientazione spaziale della serra, la falda del tetto su cui sono montati i moduli fotovoltaici non sarà più esposta a sud.
Di conseguenza i raggi solari incideranno sulla loro superficie in modo diverso, con conseguente modifica dei valori di irraggiamento sul piano dei moduli.

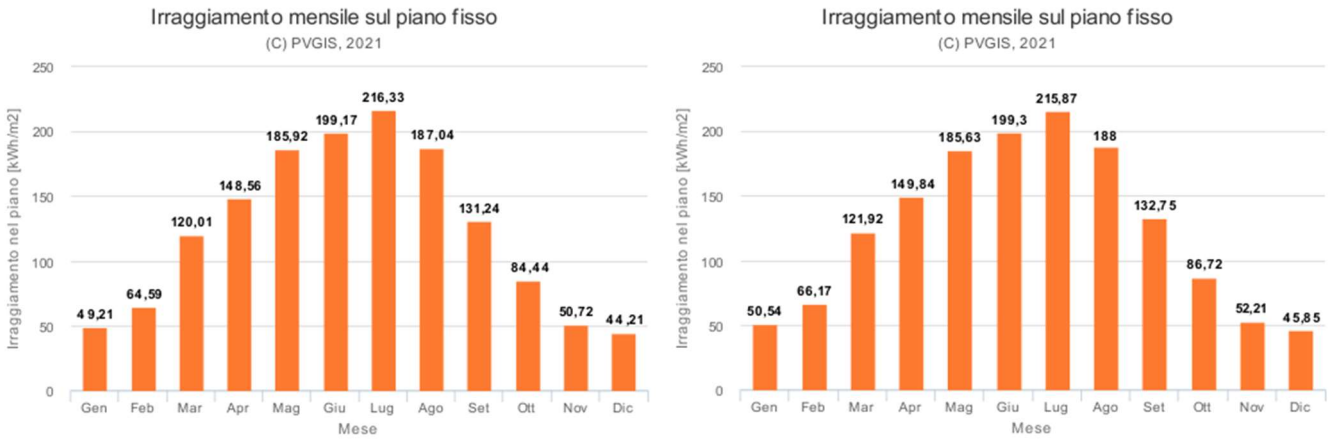


Figura 85: irraggiamento su moduli esposti ad est (sinistra) e ad ovest (destra)

Si propone un confronto tra la quantità di energia prodotta nei casi in cui i pannelli siano esposti ad est o ad ovest.

Tabella 63: energia elettrica prodotta variando orientazione falda con moduli fotovoltaici

	Azimut [°]	0 (SUD)	-90 (EST)	90 (OVEST)
Energia elettrica prodotta	$\boldsymbol{E_{el,pv,out}}$ [kWh]	15559,46	14310,71	14439,77
Differenza di energia elettrica prodotta rispetto esposizione Sud	$\boldsymbol{\Delta E_{el,pv,out}}$ [kWh]	0	-1248,75	-1119,69

Si conclude che rispetto alla condizione ottimale di esposizione sud, cui corrisponde la maggior produzione di energia elettrica, la producibilità dell'impianto fotovoltaico peggiora, sia che esso sia esposto ad est sia che sia esposto ad ovest.
Il peggioramento è minore del caso di esposizione ovest grazie ai valori di irraggiamento mensili leggermente superiori, in particolare nei mesi invernali.

7.3. Variazione condizioni interne richieste

La spesa per il riscaldamento e per il raffrescamento della serra si modificano in relazione alle temperatura e umidità interne poste come obiettivo; in questo paragrafo si intende studiare l'entità di questa variazione.

Riscaldamento

A parità di portata di ventilazione e di condizioni climatiche esterne, all'aumentare della temperatura interna da ottenere, la potenza necessaria per il raggiungimento di tale temperatura aumenta come mostrato nella seguente tabella:

Tabella 64: confronto tra potenze richieste per riscaldamento per diverse condizioni interne

		T interna [°C]				
		16	17	18	19	20
Potenza per riscaldamento	Q_{tot} [kW]	85,5	89,1	92,6	96,2	99,8

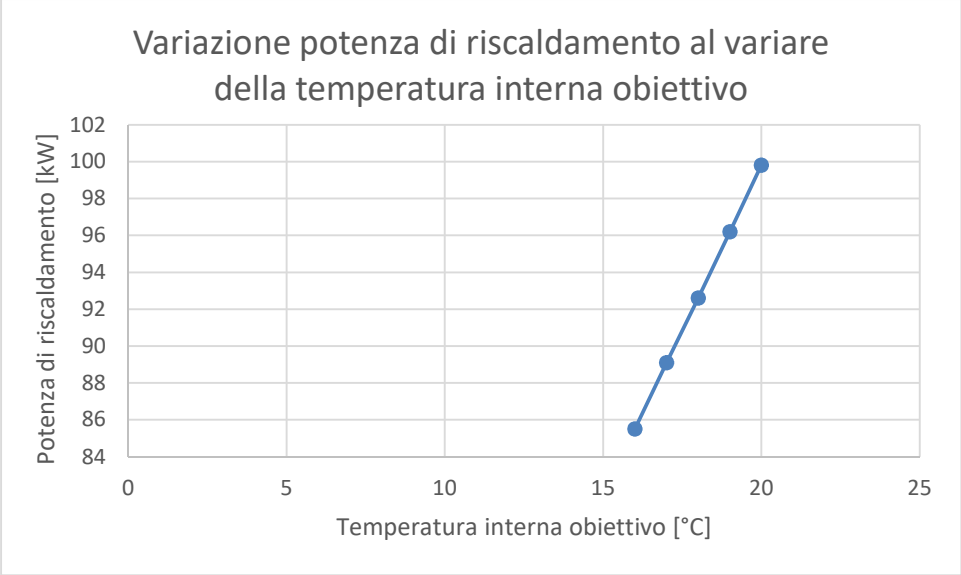


Figura 86: andamento potenza richiesta per riscaldamento per diverse condizioni interne

Come previsto, nel caso in cui si accettassero all'interno della serra temperature inferiori a quella ottimale (20°C), la potenza che l'impianto di climatizzazione dovrebbe fornire subirebbe una riduzione.
In particolare, se si ritenesse sufficiente avere all'interno della serra la minima temperatura che consente una normale crescita delle coltivazioni, ovvero 16°C, la potenza richiesta diminuirebbe di circa 14,3 kW.
Si deve tenere presente, inoltre, che scegliendo materiali di copertura con una trasmittanza termica minore il carico termico risulterebbe ancora inferiore. Esso deve però avere un'adeguata trasparenza per non compromettere la crescita delle piante.

I relativi costi d'esercizio variano come mostrato nella tabella seguente:

Tabella 65: confronto tra costi d'esercizio per riscaldamento per diverse condizioni interne

	T interna [°C]				
	16	17	18	19	20
Costi d'esercizio per riscaldamento [€/anno]	19858	20694	21507	22343	23179

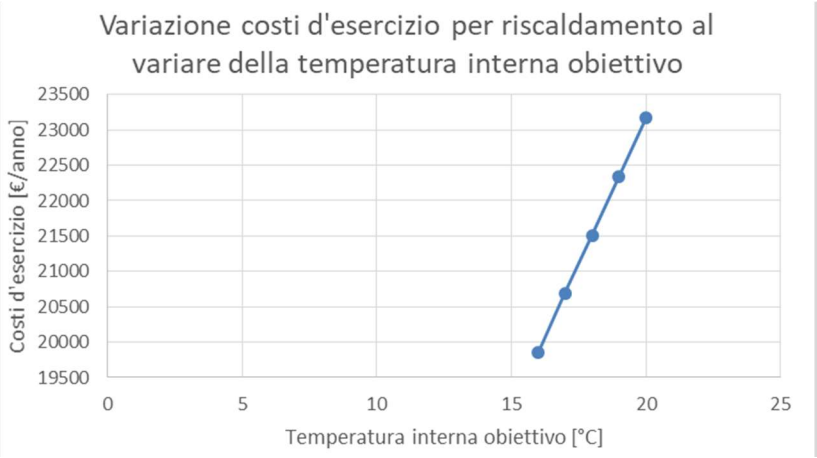


Figura 87: andamento costi d'esercizio per riscaldamento per diverse condizioni interne

La spesa annuale per l'ottenimento della minima temperatura compatibile con la crescita dei vegetali corrisponde a 19858 €/anno; volendo ottenere un incremento di 4°C, la spesa aggiuntiva ammonterebbe a 3321 €/anno, per un totale di 23179 €/anno.
La maggiore spesa da fronteggiare viene giustificata dalla migliore resa in termini di qualità e quantità dei prodotti ortofrutticoli coltivati nella serra.

Analizzando la variazione della potenza di riscaldamento e dei relativi costi d'esercizio, non vengono posti obiettivi sulla umidità relativa interna, infatti il riscaldamento è sempre accompagnato da una deumidificazione e questo è positivo nell'ottica di contenere il più possibile l'umidità interna (perlomeno sotto il 60%).
Ciò significa che dovendo riscaldare aria esterna, che si trova alla temperatura di -8°C e umidità relativa dell'83%, e volendo ottenere una temperatura interna di minimo 16°C, l'umidità relativa sicuramente scenderà sotto al 60%.
Aumentare la temperatura di una massa d'aria ne diminuisce inevitabilmente l'umidità relativa:

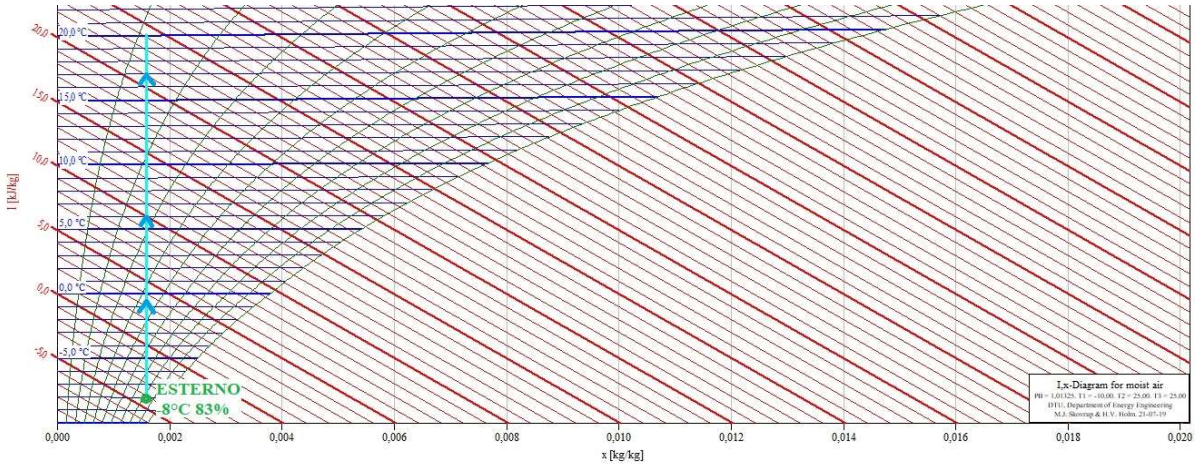


Figura 88: riscaldamento con conseguente deumidificazione

Si deve precisare che l'umidità relativa letta nel grafico soprastante non tiene conto dell'apporto di vapore acqueo dato dalla traspirazione delle piante coltivate nella serra.

Raffrescamento

Ombreggiamento su tetto e pareti

A parità di portata d'aria di rinnovo, di portata di vapore, di condizioni climatiche esterne e considerando di coprire sia tetto sia pareti con il telo ombreggiante, la potenza richiesta per il raffrescamento si modifica come riportato in tabella:

Tabella 66: confronto tra potenze richieste per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento su tetto e pareti

			T interna [°C]		
			20	25	30
ϕ interna [%]	45	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00652	0,00888	0,01198
		T_U [°C]	0,00625	0,00861	0,01171
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	7,1	11,8	16,4
		Q_{tot} [kW]	**162,6**	**133,1**	**98,8**
	50	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00728	0,00993	0,01332
		T_U [°C]	0,00701	0,00966	0,01305
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	8,8	13,6	18,1
		Q_{tot} [kW]	**152,6**	**120,8**	**84,8**
	52	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00756	0,01027	0,01388
		T_U [°C]	0,00729	0,01	0,01361
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	9,3	14	18,8
		Q_{tot} [kW]	**149,2**	**117,3**	**78,9**
	54	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00785	0,01067	0,01439
		T_U [°C]	0,00758	0,0104	0,01412
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	9,94	14,6	19,4
		Q_{tot} [kW]	**145,4**	**112,9**	**73,7**
	56	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00816	0,01107	0,01495
		T_U [°C]	0,00789	0,0108	0,01468
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	10,5	15,2	20
		Q_{tot} [kW]	**141,7**	**108,2**	**68,2**
	58	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00845	0,0115	0,0155
		T_U [°C]	0,00818	0,01123	0,01523
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	11	15,8	20,5
		Q_{tot} [kW]	**138,3**	**103,8**	**63,0**

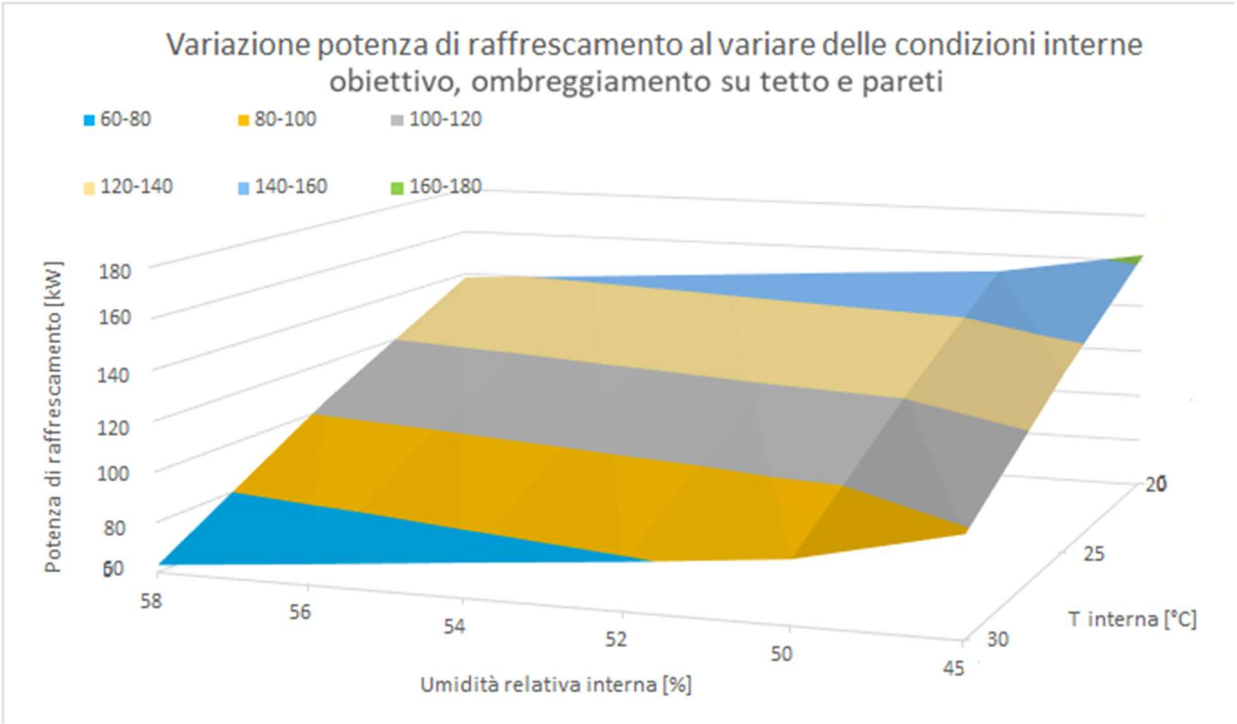


Figura 89: andamento potenze richieste per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento su tetto e pareti

Un variazione delle condizioni climatiche interne obiettivo non modifica in modo apprezzabile il carico termico entrante nella serra a causa della radiazione solare; il maggiore contributo proviene dal carico di ventilazione, il quale è particolarmente influenzato sia dalla temperatura sia dall'umidità relativa che si vogliono raggiungere all'interno della serra.

Come si può evincere dalla tabella soprastante, a parità di U.R., una variazione di temperatura interna da 20 a 30°C, comporta una riduzione di potenza richiesta fino a 75,3 kW, mentre, a parità di temperatura interna, un aumento di circa 10 punti percentuali dell'umidità relativa (da 45% al 54%) comporta una diminuzione di potenza richiesta al massimo di 25,1 kW.

Si evidenzia, inoltre, che la riduzione di domanda energetica:
-a parità di variazione di U.R., aumenti all'aumentare della temperatura: ad esempio, considerando la massima variazione di U.R. analizzata (da 45% a 58%), il risparmio ammonta a 24,3 kW per temperatura pari a 20°C, arrivando a 35,8 kW in corrispondenza di una temperatura pari a 30°C;
-a parità di variazione di temperatura interna, aumenti all'aumentare della U.R.: ad esempio, considerando la massima variazione di temperatura analizzata (da 20°C a 30°C), il risparmio raggiunge i 63,8 kW per U.R. pari al 45%, arrivando a 75,3 kW in corrispondenza di una U.R. pari al 58%.

Per quanto riguarda i costi d'esercizio relativi al raffrescamento, i risultati sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 67: confronto costi d'esercizio per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento su tetto e pareti

COSTI D'ESERCIZIO [€/anno]				
		T interna [°C]		
		20	25	30
ϕ interna [%]	45	**15506**	12693	9422
	50	14553	11520	8087
	52	14228	11186	7524
	54	13866	10767	7028
	56	13513	10318	6504
	58	13189	9899	**6008**

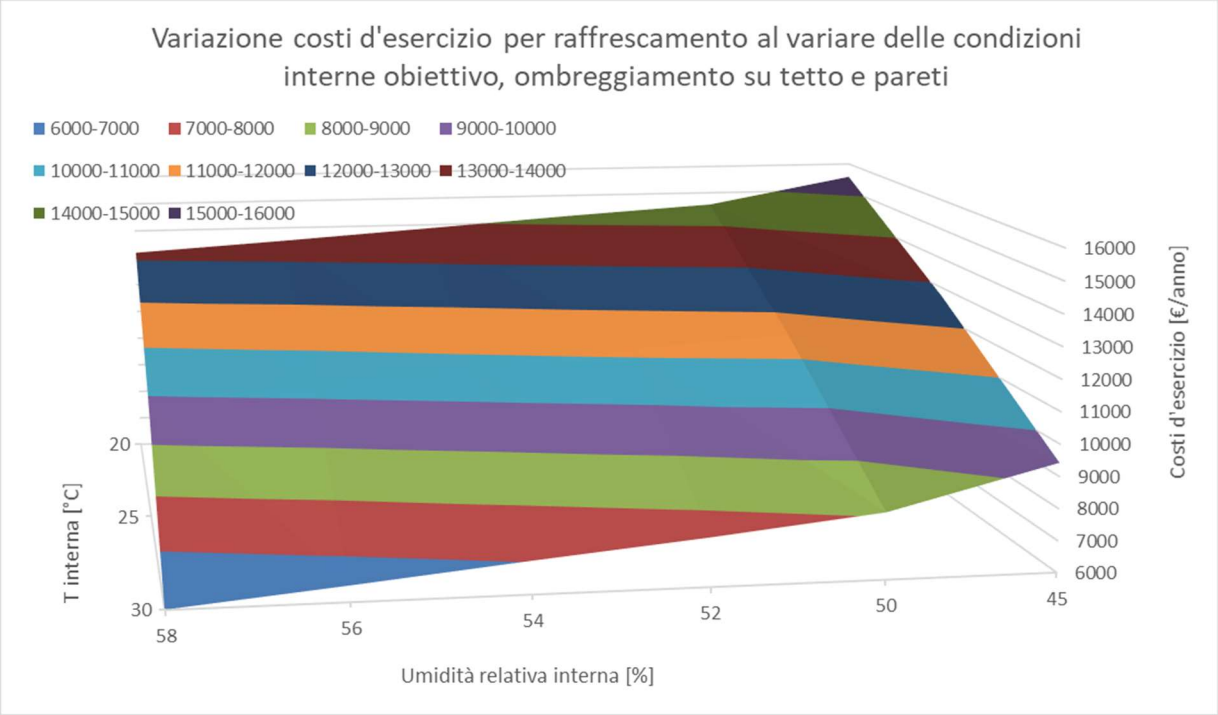


Figura 90: andamento costi d'esercizio per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento su tetto e pareti

Analogamente all'andamento assunto dalla potenza di raffrescamento, i costi d'esercizio aumentano al diminuire della temperatura e della umidità relativa poste come obiettivo all'interno della serra, con un massimo di 15506 €/anno.
Il costo d'esercizio minimo, 6008 €/anno si ottiene in corrispondenza di una temperatura di 30°C e di un'umidità relativa pari al 58%, ma si tratta di valori molto vicini ai limiti che garantiscono una buona crescita delle colture.

Individuando come valore "ottimale" di temperatura 20°C, ammettere una temperatura di 10°C superiore, comporta una riduzione di spesa di 6084 €/anno in corrispondenza di una umidità relativa del 45% e una riduzione di 7181 €/anno in corrispondenza di una umidità relativa del 58%.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, considerando 45% come valore "ottimale", un aumento di 13 punti percentuali comporta una riduzione dei costi d'esercizio di 2317 €/anno in

corrispondenza di una temperatura di 20°C e una riduzione di 3414 €/anno in corrispondenza di una temperatura di 30°C.

Una condizione intermedia tra quelle ottimali (20°C e 45%) e quelle vicine al limite (30°C 58%), ad esempio 25°C e 50% permetterebbe di mantenere in serra condizioni adeguate alla crescita delle colture e, allo stesso tempo, comporterebbe una spesa annuale di circa 11520 €/anno, sufficientemente minore rispetto alla spesa massima e giustificabile dalla migliore qualità della produzione ottenibile.

Ombreggiamento solo su tetto

A parità di portata d'aria di rinnovo, di portata di vapore, di condizioni climatiche esterne e considerando di coprire solo il tetto con il telo ombreggiante, la potenza richiesta per il raffrescamento si modifica come riportato in tabella:

Tabella 68: confronto tra potenze richieste per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento solo sul tetto

			T interna [°C]		
			20	25	30
ϕ interna [%]	45	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00652	0,00888	0,01198
		T_U [°C]	0,00625	0,00861	0,01171
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	7,1	11,8	16,4
		Q_{tot} [kW]	**173,3**	**143,9**	**109,6**
	50	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00728	0,00993	0,01332
		T_U [°C]	0,00701	0,00966	0,01305
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	8,8	13,6	18,1
		Q_{tot} [kW]	**163,3**	**131,6**	**95,5**
	52	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00756	0,01027	0,01388
		T_U [°C]	0,00729	0,01	0,01361
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	9,3	14	18,8
		Q_{tot} [kW]	**160,0**	**128,1**	**89,7**
	54	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00785	0,01067	0,01439
		T_U [°C]	0,00758	0,0104	0,01412
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	9,94	14,6	19,4
		Q_{tot} [kW]	**156,2**	**123,7**	**84,5**
	56	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00816	0,01107	0,01495
		T_U [°C]	0,00789	0,0108	0,01468
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	10,5	15,2	20
		Q_{tot} [kW]	**152,5**	**119,2**	**79**
	58	$x_I[kg_{vap}/kg_{aria}]$	0,00845	0,0115	0,0155
		T_U [°C]	0,00818	0,01123	0,01523
		$x_U[kg_{vap}/kg_{aria}]$	11	15,8	20,5
		Q_{tot} [kW]	**149,1**	**114,6**	**73,7**

Come si può notare dai valori contenuti nella tabella soprastante, a parità di U.R., una variazione di temperatura interna da 20 a 30°C, comporta una riduzione di potenza richiesta

fino a 75,4 kW, mentre, a parità di temperatura interna, un aumento di circa 10 punti percentuali dell'umidità relativa (da 45% al 54%) comporta una diminuzione di potenza richiesta al massimo di 25,1 kW.

Si evidenzia, inoltre, che la riduzione di domanda energetica:
-a parità di variazione di U.R., aumenti all'aumentare della temperatura: ad esempio, considerando la massima variazione di U.R. analizzata (da 45% a 58%), il risparmio ammonta a 24,2 kW per temperatura pari a 20°C, arrivando a 35,9 kW in corrispondenza di una temperatura pari a 30°C;
-a parità di variazione di temperatura interna, aumenti all'aumentare della U.R.: ad esempio, considerando la massima variazione di temperatura analizzata (da 20°C a 30°C), il risparmio raggiunge i 63,7 kW per U.R. pari al 45%, arrivando a 75,4 kW in corrispondenza di una U.R. pari al 58%.

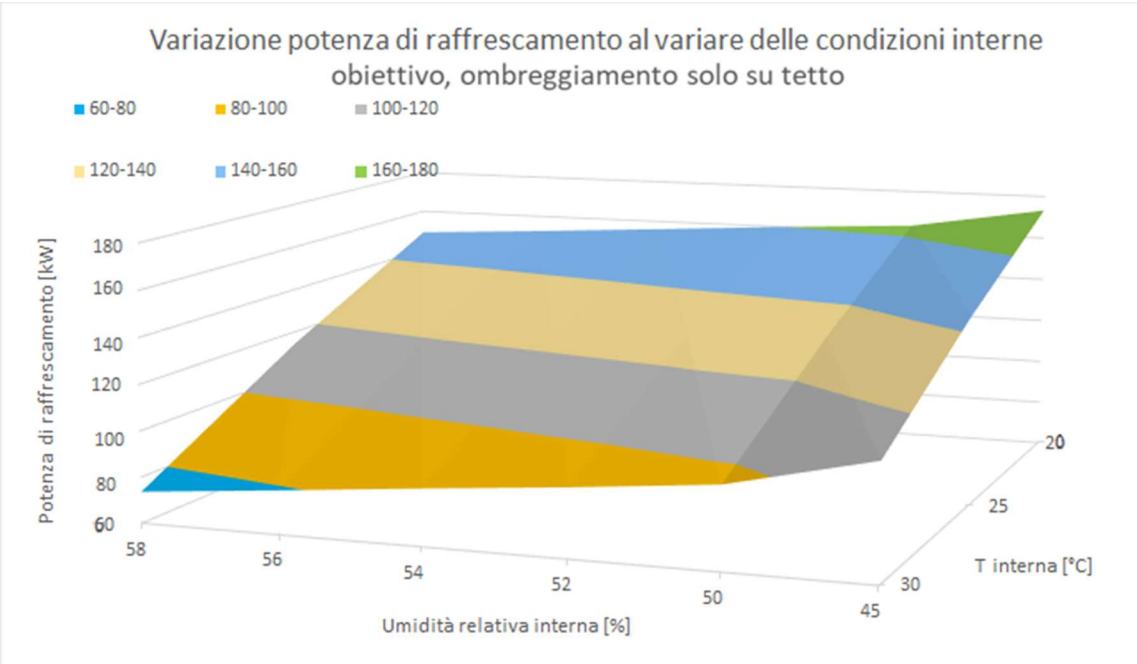


Figura 91: andamento potenze richieste per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento solo sul tetto

Per quanto riguarda i costi d'esercizio relativi al raffrescamento, i risultati sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 69: confronto tra costi d'esercizio per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento solo sul tetto

COSTI D'ESERCIZIO [€/anno]				
		T interna [°C]		
		20	25	30
ϕ interna [%]	45	**16527**	13723	10452
	50	15573	12550	9107
	52	15258	12216	8554
	54	14896	11797	8058
	56	14543	11367	7534
	58	14219	10929	**7028**

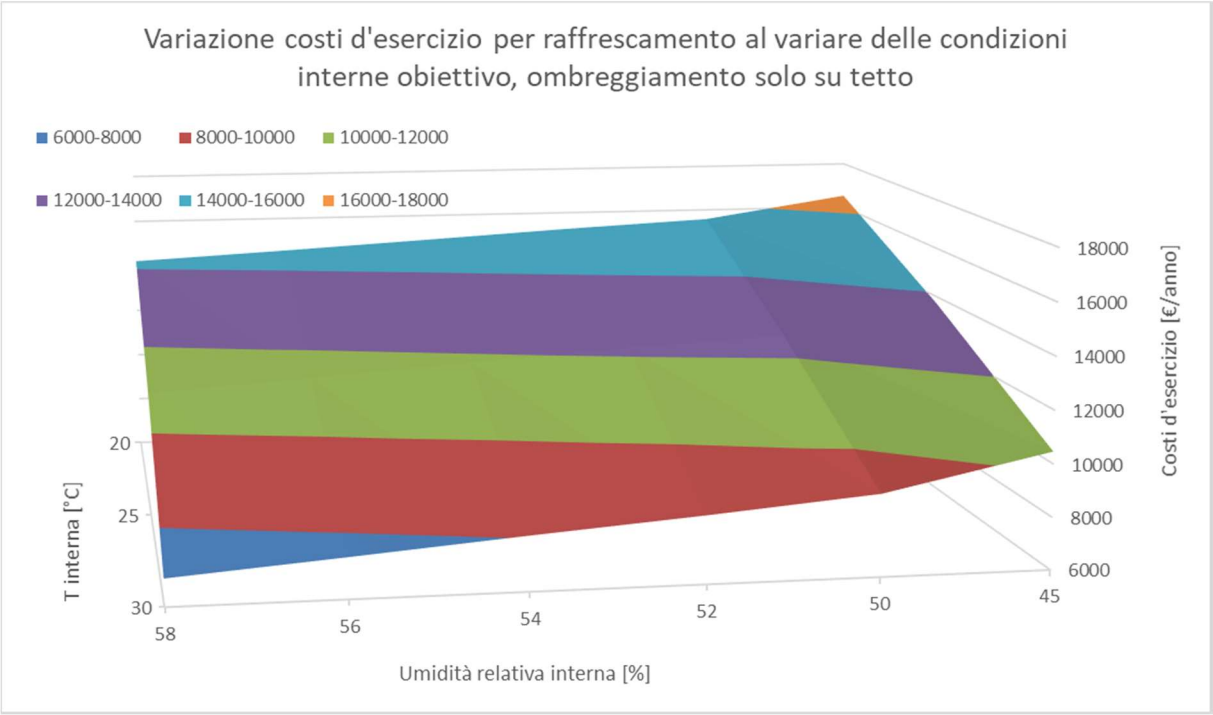


Figura 92: andamento costi d'esercizio per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento solo sul tetto

Le osservazioni che emergono dall'analisi dei risultati sono analoghe a quelle relative al caso con ombreggiamento sia su tetto sia su pareti, ma le potenze in gioco e i rispettivi costi d'esercizio sono, naturalmente, maggiori.

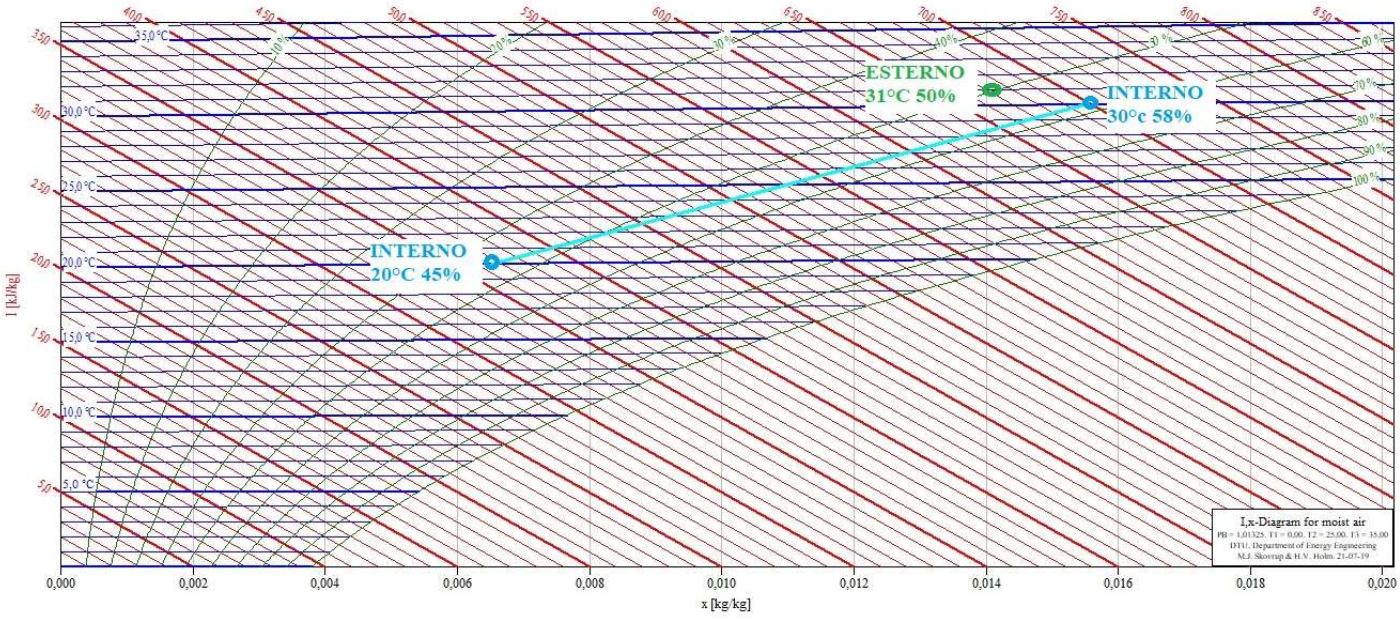


Figura 93: massima variazione delle condizioni interne obiettivo su diagramma di Mollier

In conclusione, compatibilmente ad un'adeguata crescita delle piante, accettare la permanenza di una temperatura interna di qualche grado superiore a quella ottimale, può essere una notevole fonte di risparmio.

Mentre ricercare una umidità relativa interna intorno al 45%, rispetto al 58% sembrerebbe non

aumentare eccessivamente i costi per la climatizzazione, soprattutto se la temperatura interna obiettivo fosse intorno ai 20°C, e comporterebbe un gran beneficio alle culture.

A causa delle varie condizioni descritte nel paragrafo 5.3., l'umidità relativa è il parametro più critico e deve essere severamente controllata.
La criticità del controllo dell'umidità relativa non è tanto legata all'esborso necessario per mantenere umidità relative interne contenute (i risultati ottenuti sembrano ottimistici, in quanto una piccola spesa aggiuntiva permetterebbe di ottenere umidità relative minori), ma alla capacità dell'impianto di rispondere in modo adeguato e tempestivo di fronte a fenomeni che ne potrebbero causare un aumento rapido ed improvviso.

I risultati ottenuti sono frutto di un metodo di calcolo, di conseguenza, lo svolgimento di verifiche sperimentali sarebbe un valido modo per conferire maggiore validità alle conclusioni tratte e al metodo utilizzato.

7.4. Variazione materiale di copertura

Il materiale che costituisce la copertura della serra gioca un ruolo fondamentale sia dal punto di vista della radiazione solare che riesce a penetrare all'interno della serra sia della quantità di calore trattenuto al suo interno.
Di conseguenza la scelta di materiali diversi influenza le potenze di riscaldamento e di raffrescamento richieste.
Di seguito sono riportati i risultati ottenuti adottando come materiali di copertura:
-vetro semplice dello spessore di 4 mm con trasmittanza di 5,8 W/m²K, fattore di trasmissione pari a circa 89% e prezzo di 8,66 €/m²;
-vetro camera dello spessore di 24 mm con trasmittanza di 1 W/m²K, fattore di trasmissione pari a circa 90% e prezzo di 35 €/m²;
-lastre ondulate di policarbonato dello spessore di 1 mm, con trasmittanza di 5,7 W/m²K, fattore di trasmissione pari a circa 89%, prezzo di 9,38 €/m².

Viene fatto il confronto con il materiale scelto per il modello di serra adottato nei tre casi studio (policarbonato alveolare dello spessore di 20 mm con trasmittanza di 1,6 W/m²K, fattore di trasmissione pari a circa 78% e prezzo di 25 €/m²) sia in termini di potenze sia di costi. Questi ultimi vengono determinati moltiplicando il costo per metro quadrato di ciascun materiale per la superficie di copertura della serra, ovvero 583 m².

Tabella 70: confronto potenze in gioco e costi d'esercizio in relazione al tipo di materiale di copertura

	Policarbonato alveolare scelto	Vetro semplice	Vetro camera	Policarbonato ondulato
Trasmittanza [W/m²K]	1,6	5,8	1	5,7
Fattore di trasmissione [%]	78	89	90	89
Spessore [mm]	20	4	24	1
Costo unitario [€/m²]	25	8,66	35	9,38
Costo totale della copertura [€]	**14 575**	**5 048,8**	**20 405**	**5 468,5**
Potenza riscaldamento [kW]	**99,8**	**148,7**	**91,7**	**147,6**
Costi d'esercizio per riscaldamento [€/anno]	**23 170**	**34 537**	**21 298**	**34 281**
CASO TELO OMBREGGIAMENTO SU TETTO E PARETI				
Carico termico legato alla radiazione solare [kW]	107,3	122,4	124	122,4
Potenza raffrescamento [kW]	**121,6**	**107,1**	**132,6**	**107,3**
Costi d'esercizio per raffrescamento [€/anno]	**11 596**	**10 214**	**12 645**	**10 233**
Costi d'esercizio totali [€/anno]	**34 766**	**44 750**	**33 943**	**44 514**
CASO TELO OMBREGGIAMENTO SOLO SU TETTO				
Carico termico legato alla radiazione solare [kW]	132,7	151,4	153,0	151,3
Potenza raffrescamento [kW]	**132,3**	**114,1**	**146,3**	**114,4**
Costi d'esercizio per raffrescamento [€/anno]	**12 617**	**10 881**	**13 952**	**10 910**
Costi d'esercizio totali [€/anno]	**35 787**	**45 418**	**35 250**	**45 191**
Risparmio percentuale derivante dall'ombreggiamento sia di tetto sia di pareti [%]	8,1	6,1	9,4	6,2

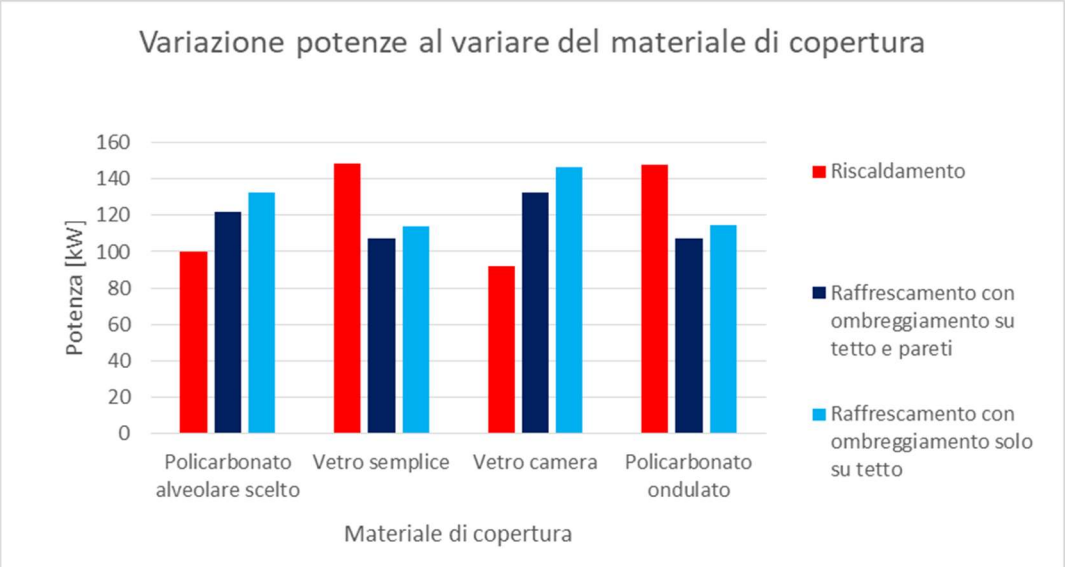


Figura 94: confronto potenze in gioco in relazione al tipo di materiale di copertura

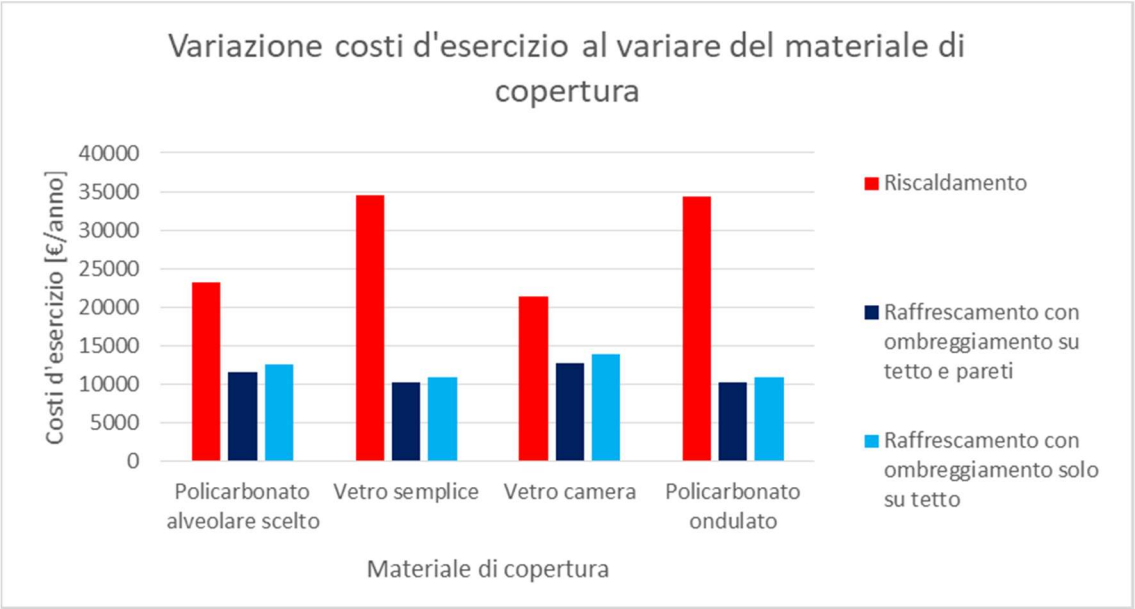


Figura 95: confronto costi d'esercizio in relazione al tipo di materiale di copertura

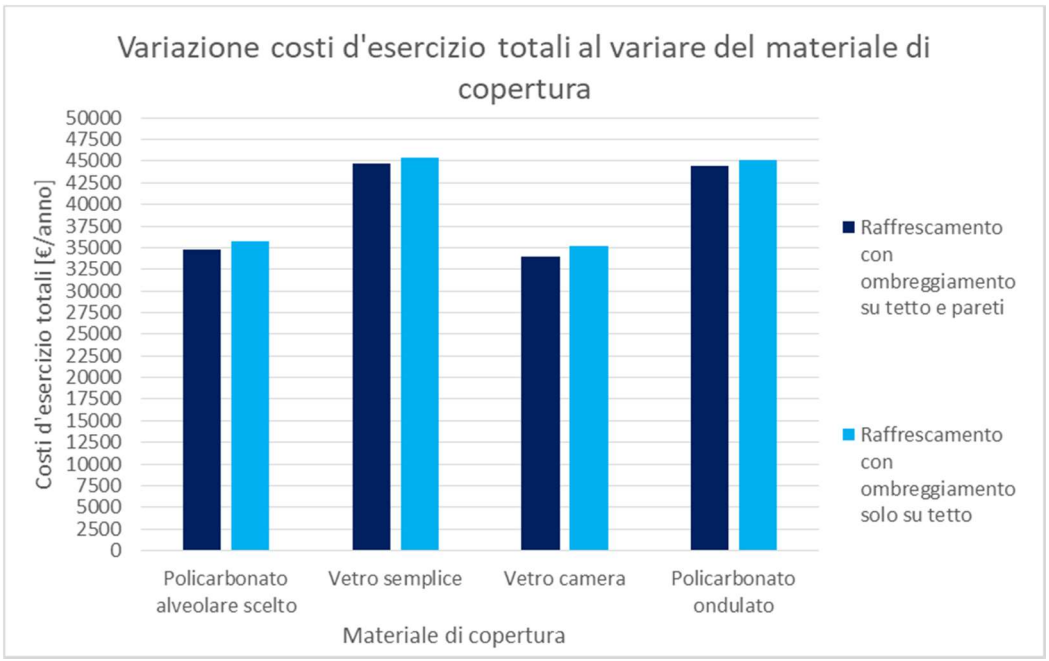


Figura 96: confronto costi d'esercizio totali in relazione al tipo di materiale di copertura

I risultati mettono in luce come la diversa trasmittanza termica dei materiali di copertura si traduca in una notevole differenza delle potenze in gioco. Una trasmittanza maggiore, indice di un minore potere isolante, comporta una maggiore richiesta per il riscaldamento. Mentre, utilizzando il metodo proposto da Alfanto et al. per il calcolo del carico termico estivo, l'incremento della trasmittanza produce una diminuzione del fattore $\boldsymbol{f_r}$, il quale tiene conto dell'accumulo termico all'interno delle pareti della serra; di conseguenza la quantità di calore accumulato all'interno delle pareti si riduce e questo spiega la diminuzione della potenza di raffrescamento all'aumentare della trasmittanza.
All'utilizzo del vetro semplice, che presenta la trasmittanza maggiore tra quelle dei materiali in esame, sono, infatti, legate la maggiore potenza di riscaldamento (148,7 kW) e la minore potenza di raffrescamento (107,1 kW con ombreggiamento su tetto e pareti e 114,1 kW con ombreggiamento solo su tetto).

Anche il fattore di trasmissione cambia da un materiale all'altro: più esso è elevato, maggiore è il carico termico legato alla radiazione solare, Q_S, relativo a ciascuna ora del giorno.
Nella tabella è stato riportato il valore ottenuto alle ore 14:00, orario in cui si riscontra la massima potenza richiesta per il raffrescamento.
Il vetro camera, con un fattore di trasmissione del 90% genera il maggiore carico legato alla radiazione solare (124 kW con ombreggiamento su tetto e pareti e 153 kW con ombreggiamento solo su tetto). Il lato positivo dell'elevata trasmissibilità della luce solare risiede nella quantità di luce che le piante hanno a disposizione per la loro crescita e per le loro funzioni vitali.
Secondo il modello di calcolo utilizzato, la spesa energetica nel periodo invernale non risente del fattore di trasmissione.

Un'ulteriore informazione emersa consiste nel fatto che la tipologia di materiale di copertura non influisca sul carico di ventilazione.

Come precedentemente osservato nel paragrafo 6.7., i costi d'esercizio legati al riscaldamento sono maggiori rispetto quelli legati al raffrescamento anche se le potenze di riscaldamento sono inferiori a quelle richieste nel periodo estivo.
La spiegazione risiede sempre nei valori assunti dai coefficienti SCOP e SEER e dalla maggiore durata del periodo di riscaldamento rispetto quello di raffrescamento.
Il materiale che consente di conseguire i minori costi d'esercizio è il vetro camera con un ammontare totale massimo di 35250 €/anno, mentre quello che genera i maggiori costi è il vetro semplice con una spesa massima di 45418 €/anno.

Ombreggiare sia pareti sia tetto comporta un risparmio quantificato nel 8,1% del costo per il raffrescamento con ombreggiamento solo su tetto nel caso del policarbonato alveolare, del 6,1% per il vetro semplice, del 9,4% per il vetro camera e del 6,2% per il policarbonato ondulato.
Si evince, quindi, che ombreggiare una superficie maggiore sia particolarmente conveniente quando la copertura della serra è realizzata in vetro camera, con un elevato fattore di trasmissione della luce.

I risultati evidenziano che il policarbonato alveolare sia il migliore compromesso tra costi del materiale, prestazioni ottenute e conseguenti costi d'esercizio; il vetro semplice e le lastre ondulate di policarbonato consentirebbero una diminuzione notevole della spesa per la copertura, ma i costi di esercizio legati alla potenza di riscaldamento sarebbero molto superiori.
Il difetto del policarbonato alveolare risiede nella decrescente trasparenza all'aumentare del numero di pareti che compongono ciascuna lastra, fatto che riduce la quantità di luce che raggiunge le piante.

In conclusione, l'analisi eseguita mostra quanto un'accurata scelta del materiale che andrà a costituire la copertura della serra consenta di ottenere un notevole risparmio in termini di energia da fornire per il riscaldamento o per il raffrescamento. In passato questo aspetto veniva trascurato e il costo per la climatizzazione risultava molto elevato.
È necessario sottolineare che non esista un materiale di copertura in grado di rispondere al meglio a tutte le esigenze. La scelta "migliore" dipende dagli obiettivi di chi realizza la serra e l'impianto:
- voler ridurre la spesa per la climatizzazione porterà a preferire materiali con un basso valore di trasmissibilità della luce e con piccolo valore di trasmittanza;
- volendo dare priorità all'ingresso di luce si sceglieranno materiali con una maggiore trasparenza.

7.5. Variazione potenza moduli fotovoltaici

Nel presente paragrafo si intende calcolare la producibilità di pannelli fotovoltaici semi-trasparenti dello stesso modello di quelli scelti nelle analisi dei tre casi studio, ma con potenze crescenti, in modo da valutare la convenienza di adottare moduli più potenti in relazione ai costi dei dispositivi stessi ed al risparmio energetico che essi possono comportare.

Tabella 71: dati tecnici moduli della serie VE136PVTTFL – VE236PVTTFL di VGS

GRUPPOSTG VGS® ITALIAN PV SOLUTIONS

VE136PVTTFL - VE236PVTTFL

Comportamento in condizioni di test standard STC*					
Classe di potenza	P_{max}	150 Wp	155 Wp	160 Wp	165 Wp
Efficienza	η	9,29 %	9,60 %	9,91 %	10,21%
Tensione a circuito aperto	V_{oc}	22,58 V	22,99 V	23,41 V	23,82 V
Corrente di cortocircuito	I_{sc}	8,83 A	8,91 A	8,99 A	9,06A
Tensione alla max. potenza	V_{mp}	18,32 V	18,68 V	19,05 V	19,44 V
Corrente alla max. potenza	I_{mp}	8,25 A	8,34 A	8,43 A	8,52 A

Nella seguente tabella sono riportati i valori di energia elettrica prodotta da ciascun impianto di diversa potenza e il risparmio ottenibile sul consumo annuale di energia elettrica:

Tabella 72: confronto risparmio di costi d'esercizio ottenibile adottando moduli PV di potenza crescente

	Moduli da 150 Wp	Moduli da 165 Wp	Moduli da 160 Wp	Moduli da 165 Wp
Potenza totale impianto fotovoltaico [kWp]	13,8	14,26	14,72	15,18
Energia elettrica prodotta [kWh/anno]	**15 559,46**	**16 078,11**	**16 596,76**	**17 115,40**
Consumo di energia elettrica per climatizzazione [kWh/anno]	240749	240749	240749	240749
Differenza tra consumo per climatizzazione ed energia elettrica prodotta [kWh/anno]	225190	224671	224152	223634
Costi d'esercizio per climatizzazione con fotovoltaico [€/anno]	45038	44934	44830	44727
Costi d'esercizio per climatizzazione senza fotovoltaico [€/anno]	48149	48149	48149	48149
Risparmio [€/anno]	3111	3215	3319	3422
Risparmio [%]	6,46	6,68	6,89	7,11

Il massimo risparmio ottenibile adottando i pannelli resi disponibili dall'azienda VGS è del 7,11% rispetto ai costi d'esercizio totali in assenza di impianto fotovoltaico; esso corrisponde a 3422 €/anno. Questa riduzione può non essere ritenuta molto significativa su una spesa annuale di circa 48149 € per l'alimentazione dell'impianto di climatizzazione.

Sono anche stati confrontati i costi da sostenere per acquistare un impianto di potenza via via maggiore considerando un prezzo di 2000 € per 1 kWp **[119]**:

Tabella 73: confronto aumento di costo iniziale dell'impianto

	Moduli da 150 Wp	Moduli da 165 Wp	Moduli da 160 Wp	Moduli da 165 Wp
Potenza totale impianto fotovoltaico [kWp]	13,8	14,26	14,72	15,18
Costo impianto fotovoltaico [€]	27600	28520	29440	30360
Costo impianto di climatizzazione [€]	58706	58706	58706	58706
Aumento di costo iniziale [%]	47,01	48,58	50,15	51,72

Il costo dell'impianto fotovoltaico si aggira in tutti i casi intorno alla metà del costo dell'impianto di climatizzazione.
L'impianto da 15,18 kWp comporta un aumento di costo iniziale di 4,71 punti percentuali in più rispetto l'impianto da 13,8 kWp.

Passando da 13,8 kWp a 15,18 kWp, l'aumento di 1,38 kWp fa crescere il risparmio sui costi d'esercizio di 311 €/anno e comporta un incremento del costo di impianto fotovoltaico di 2760€.

Un parametro che può indirizzare la scelta della potenza dell'impianto fotovoltaico può essere il Pay Back Period (PBP), definito nel paragrafo 6.6.

Tabella 74: confronto dei Pay Back Period

	Moduli da 150 Wp	Moduli da 165 Wp	Moduli da 160 Wp	Moduli da 165 Wp
Costo impianto PV [€]	27600	28520	29440	30360
Ricavo da energia elettrica prodotta [€]	3111,89	3215,62	3319,35	3423,08
PBP [anni]	8,8717	8,8709	8,8701	8,8694

I valori di PBP sono molto simili tra loro, di conseguenza gli investimenti per installare un impianto fotovoltaico possono essere considerati quasi equivalenti.
Più in particolare, ammesso che si consideri conveniente l'installazione di un impianto fotovoltaico, scegliere moduli da 165 Wp, risulterebbe una decisione più oculata, sia per il minore PBP sia perché comporterebbe il maggiore risparmio in termini di costi d'esercizio.

Capitolo 8. Alternativa con sistema idronico

Ai fini della climatizzazione della serra oggetto di studio, una valida alternativa all'impianto VRF è costituita da un sistema idronico in grado di soddisfare in egual misura la richiesta di potenza per il riscaldamento e per il raffrescamento.
I sistemi idronici, detti anche a fluido itermedio, sono impianti in cui il generatore, quale può essere una pompa di calore, un frigorifero o una caldaia, trasferisce l'energia prodotta all'acqua che circola in un circuito intermedio posto tra generatore e terminali.
Per una loro descrizione più dettagliata si rimanda al paragrafo 4.4.4.1.

8.1. Sistemi idronici e impianti VRF a confronto

I sistemi idronici e gli impianti VRF presentano ciascuno proprie caratteristiche peculiari, da cui scaturiscono alcune differenze di funzionamento.

Innanzitutto, nei sistemi VRF, dal momento che le unità terminali sono parte integrante del circuito del fluido frigorifero, lo scambio di calore con l'ambiente da climatizzare è diretto e, quindi, le prestazioni del ciclo sono direttamente influenzate dalle condizioni del citato ambiente.
Inoltre, il moto viene impresso al fluido di lavoro dal compressore, di conseguenza, anche il dislivello e la lunghezza delle tubazioni influisce sulle prestazioni dell'intero sistema.
Per contro, negli impianti idronici, essendo netta la separazione tra unità interne ed esterne, le condizioni dell'ambiente interno influenzano solo le prestazioni del terminali e non quelle dei generatori; queste ultime dipendono dalle condizioni del circuito idraulico intermedio.
Il fluido è movimentato grazie ad una pompa e non ad un componente del generatore, pertanto le prestazioni di quest'ultimo non dipendono dalla lunghezza delle tubazioni e dal dislivello tra unità esterne ed interne.

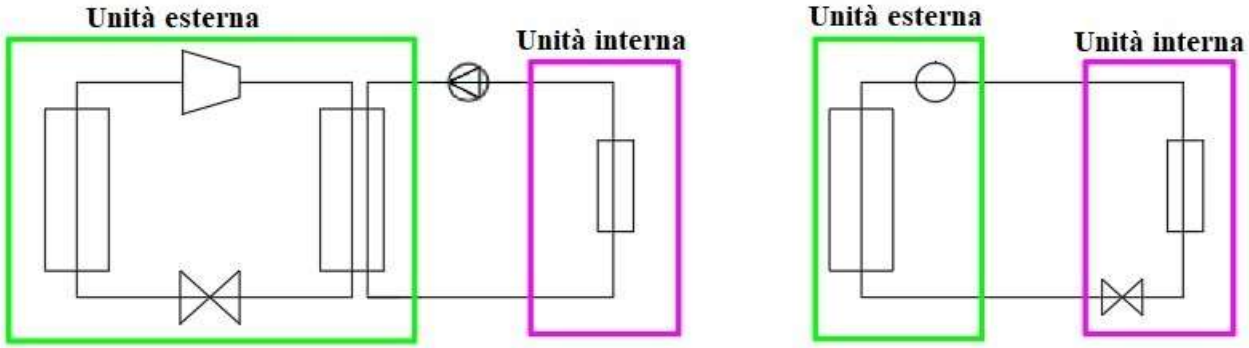


Figura 97: impianto idronico (a sinistra) e sistema VRF (a destra)

Un aspetto vantaggioso dei sistemi VRF sembrerebbe essere la possibilità di collegare una grande quantità di terminali, ma in realtà, questa opportunità non può essere completamente sfruttata: ad un impianto di circa 150 kW potrebbero essere collegate anche fino a 70 unità interne, ma le normative, in particolare la EN 378, limitano notevolmente l'estensione degli impianti VRF. Questo fa sì che si debba ricorrere all'installazione di un maggior numero di circuiti indipendenti in modo da contenere la quantità di fluido refrigerante in circolo e vanificando il risparmio dato dal minore diametro con cui possono essere realizzati i tubi dell'impianto VRF.

Inoltre, la loro installazione non è consigliabile negli edifici in cui vi sia un ambiente da mantenere a temperatura inferiore rispetto gli altri.
Infatti, la temperatura di evaporazione dell'unità presente nell'ambiente con maggiore richiesta di raffrescamento, sarà minore rispetto quella delle altre unità interne, cui si accompagna una minore pressione di evaporazione; ma siccome tutti terminali sono serviti dallo stesso circuito, devono avere la stessa pressione e, quindi, la diminuzione di pressione di anche una sola unità interna determina l'abbassamento di quella di tutte le altre.
Ad esempio, nel caso in cui si volesse mantenere l'ambiente 1 a 24°C e non a 26°C, la valvola termostatica dovrebbe far passare all'interno dell'evaporatore 1 tutta la portata di refrigerante necessaria, con conseguente aumento delle perdite di carico e diminuzione della pressione di evaporazione, cui si accompagna quella di temperatura.
Nell'evaporatore 2 si deve avere la stessa pressione di evaporazione, perciò la temperatura in esso sarà minore di quella che si avrebbe avuto se l'ambiente 1 fosse stato manutenuto a 26°C. Pertanto, la valvola termostatica dell'evaporatore 2 dovrà chiudersi di più in modo da permettere il passaggio solo della quantità di refrigerante che consenta di mantenere i 26°C.
Sul ramo di ritorno si sommano via via perdite di carico maggiori che fanno diminuire sempre più la pressione (e anche la temperatura) fino ad arrivare al compressore posto nell'unità esterna.
Invece in un sistema idronico, la temperatura di evaporazione è mantenuta costante dal microprocessore del gruppo frigorifero e le unità interne possono essere sempre alimentate da acqua alla stessa temperatura **[121]**.

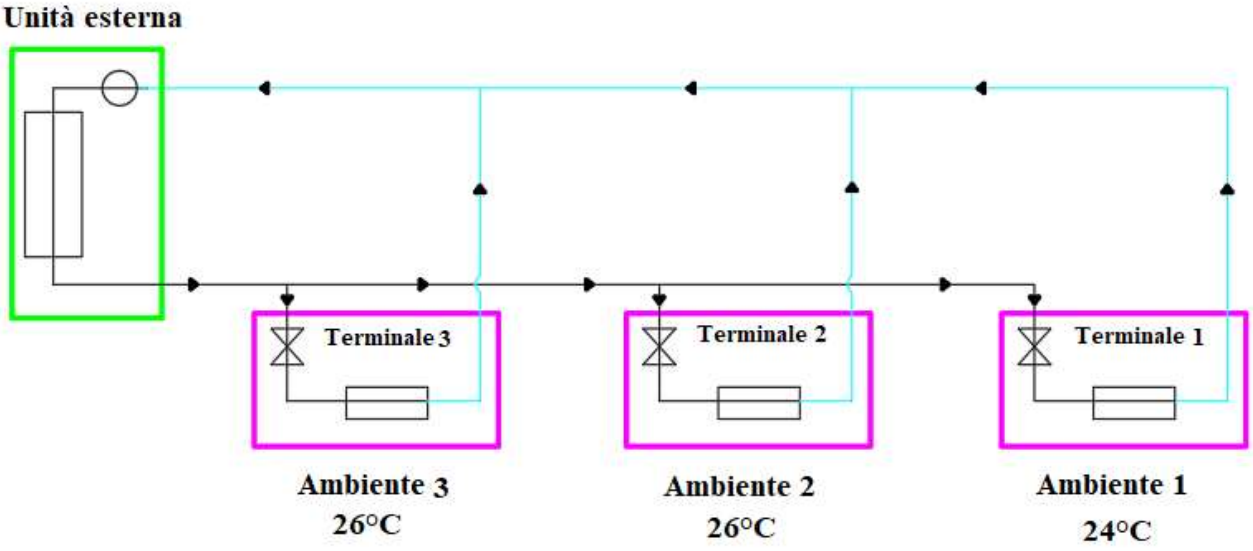


Figura 98: impianto VRF climatizzazione ambienti a temperatura diversa

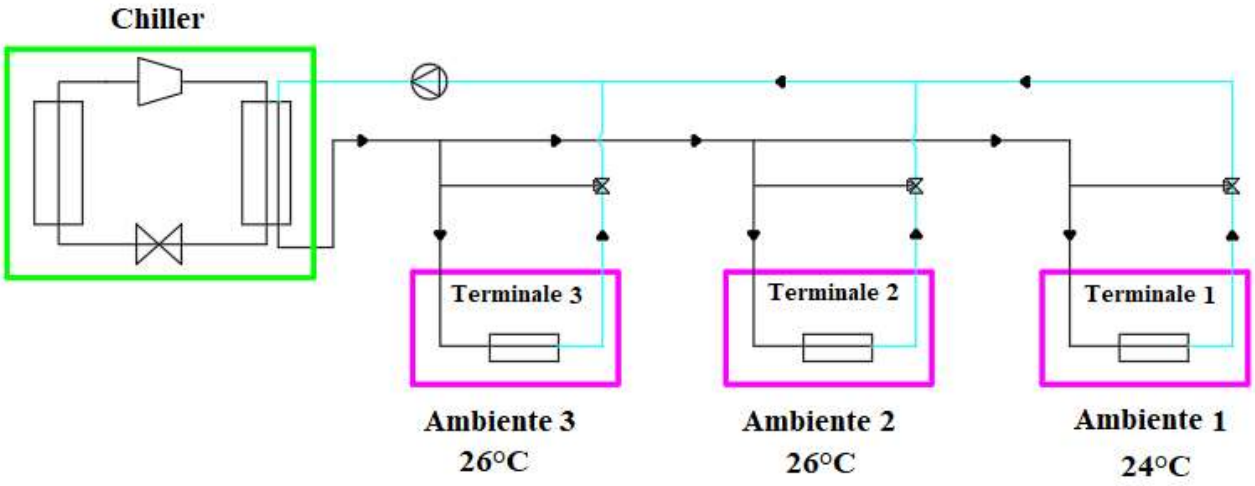


Figura 99: impianto idronico climatizzazione ambienti a temperatura diversa

Tra i vantaggi dei sistemi idronici rispetto quelli VRF vi sono:

-la possibilità di collegare generatori di diverso tipo, come caldaie, gruppi frigoriferi, pompe di calore ed essere integrati nel teleriscaldamento; un impianto VRF non presenta queste possibilità, il generatore è incorporato nel sistema;

-la validità dei dati riportati dai costruttori è maggiore rispetto quella dei sistemi VRF. Questo fatto è legato all'influenza della lunghezza dei tubi sulle prestazioni dell'intero sistema.
Le prestazioni dei sistemi VRF vengono fornite in relazione ad un impianto di lunghezza equivalente compresa tra 5 e 7,5 m, lunghezze ben lontane dalla vera estensione di molti impianti VRF.
Quindi i costruttori di sistemi ad espansione diretta possono fornire solo valori nominali delle prestazioni, non replicabili nella realtà; al contrario, quelle dei sistemi idronici possono essere riprodotte ovunque, dal momento che la lunghezza dei tubi influisce solo in minima parte sulle prestazioni dell'intero sistema e non ha effetti su quelle dei generatori;

-maggiore efficienza ai carichi parziali: generalmente si pensa che, grazie alla presenza dell'inverter, gli impianti VRF siano la soluzione migliore ai carichi parziali, ma in realtà, le loro prestazioni decadono fortemente quando il funzionamento scende sotto il 40% della potenza nominale. Questo è causato principalmente dalla riduzione del rendimento dei compressori scroll, la tipologia più utilizzata dai produttori di sistemi ad espansione diretta, al diminuire del numero di giri. Il risultato è che, quando vengono richieste potenze prossime a quelle nominali, i VRF abbiano prestazioni superiori agli idronici, ma esse degradino appena le condizioni si discostano da quelle ottimali.
Oltre al funzionamento ai carichi parziali che si può verificare durante l'anno a causa della regolazione dell'impianto, che dipende dalle condizioni climatiche che di volta in volta si presentano, il fatto di lavorare con potenze inferiori a quelle nominali è insito nella scelta dei dispositivi. Infatti, molto spesso, la richiesta estiva è superiore rispetto quella invernale, pertanto la scelta del dispositivo viene fatta sulla base della potenza di raffrescamento; la macchina scelta potrebbe fornire una potenza nominale in riscaldamento inferiore a quella nominale di raffrescamento, ma comunque notevolmente superiore a quella realmente richiesta. Quindi il funzionamento in pompa di calore è quello maggiormente penalizzato.
Nei sistemi idronici lo "sbilanciamento" dell'impianto tra il periodo estivo e quello invernale può essere attenuato suddividendo la potenza tra più generatori, soluzione non attuabile, come detto precedentemente, nei sistemi VRF;

-durante il periodo estivo, migliore controllo dell'umidità relativa nell'ambiente da climatizzare;

-montaggio e manutenzione più semplici;

-la fuoriuscita di acqua, in caso di danneggiamento dei tubi che collegano il generatore alle unità interne, è meno problematica dell'eventuale disperdimento di fluido refrigerante che potrebbe accadere nelle tubazioni che portano il refrigerante a ciascuna unità interna negli impianti ad espansione diretta **[122]**.

I sistemi idronici presentano, però, anche degli svantaggi che risiedono principalmente nella necessità di componenti aggiuntivi come pompe di circolazione e accumuli inerziali e nella presenza di un numero maggiore di scambi di calore: agli scambi tra sorgente esterna-refrigerante e refrigerante-ambiente interno si aggiunge uno scambio refrigerante- acqua e lo scambio acqua-ambiente interno si sostituisce a refrigerante-ambiente interno.

Inoltre, per limitare ulteriori perdite energetiche, è richiesta la coibentazione dei tubi che portano l'acqua dal generatore ai terminali interni. Infatti, nella modalità di funzionamento in raffrescamento, siccome l'acqua che circola nei tubi si trova ad una temperatura inferiore rispetto quella dei locali che attraversa, tende ad assorbire calore (ciò accade, seppur in minima parte, anche in presenza di una buona coibentazione).
Invece, in un impianto VRF, i tubi sono percorsi da fluido refrigerante condensato che si trova ad una temperatura superiore di quella degli ambienti che attraversa. Quindi è buona norma non coibentare i tubi, in modo che il fluido possa cedere calore agli ambienti. Questo scambio termico aumenta l'efficienza energetica perché favorisce il sottoraffreddamento del fluido. Si ricorda che il fluido percorre i tubi in forma condensata in quanto la valvola di laminazione, che trasforma il fluido condensato in una miscela liquido-gas, è posta all'interno di ciascun terminale, come si può osservare nella figura soprastante **[123]**.

Un ulteriore vantaggio a favore degli impianti VRF è rappresentato dagli scambi di calore a temperatura costante: la temperatura del fluido frigorifero non cambia durante l'attraversamento delle batterie degli scambiatori perché esso evapora o condensa in esse.
Questo permette, ad esempio nel funzionamento estivo, di raffreddare velocemente l'aria dell'ambiente da climatizzare, sia grazie alla possibilità di mantenere un elevato differenziale di temperatura tra refrigerante e aria, sia al fatto che il calore in gioco sia latente (per unità di massa è molto elevato).
Al contrario, negli impianti idronici, l'acqua all'interno del circuito intermedio non effettua passaggi di stato, di conseguenza, ad esempio in condizioni di raffreddamento, la sua temperatura aumenta durante il passaggio all'interno dell'evaporatore; questo significa che il differenziale di temperatura tra acqua e aria diminuisce, riducendo anche lo scambio termico. A ciò si aggiunge la considerazione che, non avvenendo cambiamenti di stato, il calore trasferito sia sensibile per cui, per ottenere il raffreddamento voluto, sarebbe necessario un grande volume d'acqua **[123]**.

8.2. Descrizione sistema idronico adottato

Di seguito viene riportato lo schema di un impianto alternativo a quello precedentemente analizzato, ma altrettanto valido per la climatizzazione di una serra adibita a colture aeroponiche:

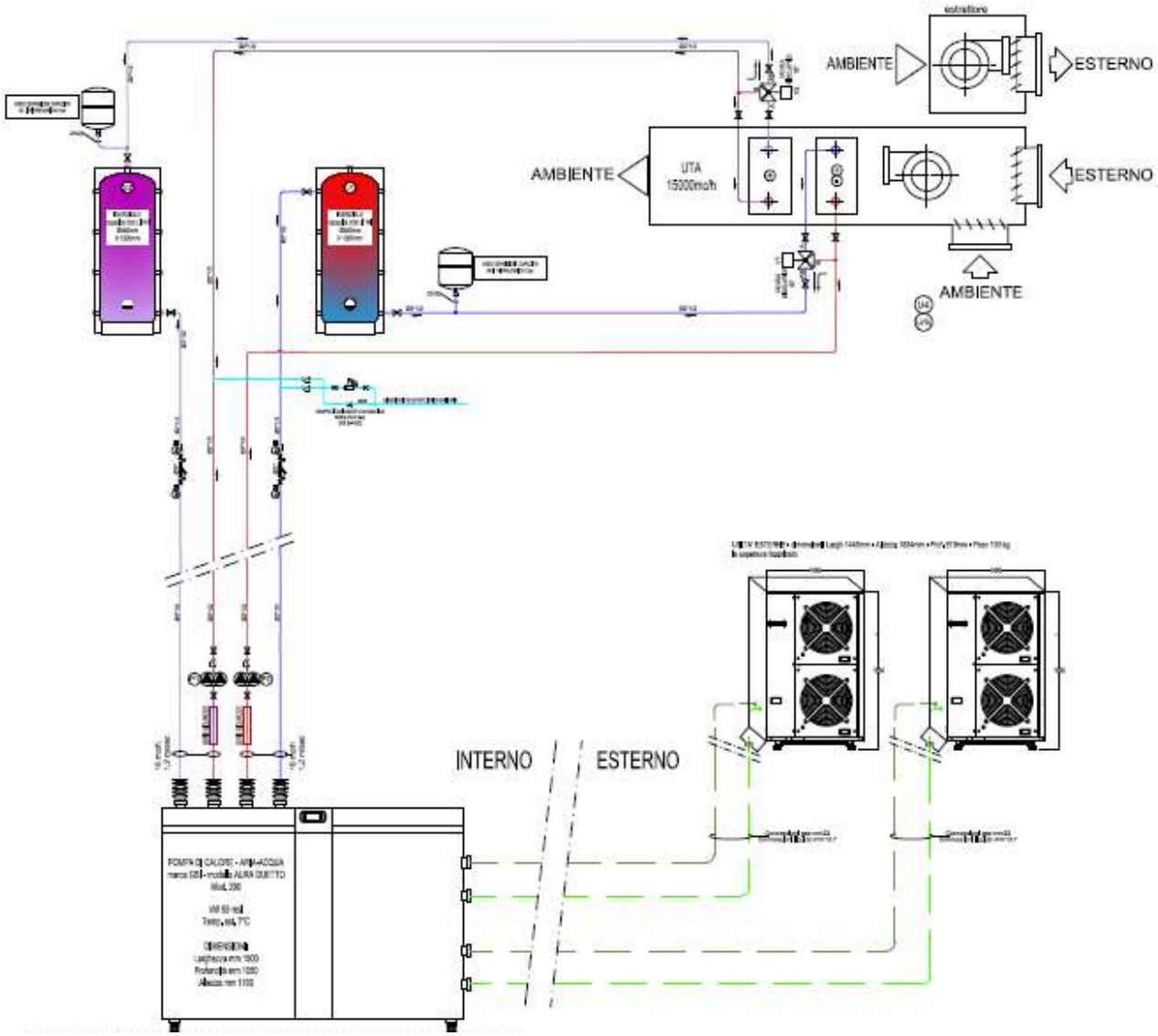


Figura 100: impianto di climatizzazione alternativa con pompa di calore aria-acqua e UTA **[124]**

La macchina termica utilizzata in questo impianto è una pompa di calore aria-acqua controllata da inverter e, quindi, modulabile, con doppio circuito frigorifero indipendente e doppio evaporatore/condensatore esterno che ne garantiscono il funzionamento al 50% in caso di guasti ad uno dei circuiti.

A differenza delle pompe di calore aria-aria previste nel precedente impianto, la pompa di calore e gli accumuli inerziali non possono essere installati in ambiente esterno, quindi deve essere previsto un box che li contenga.

Il fluido frigorifero che compie il ciclo di lavoro è il R410a: esso scambia calore con l'aria esterna durante il passaggio attraverso la batteria degli scambiatori posti in ciascuna unità esterna, percorre i tubi che connettono queste ultime con la pompa di calore e, al suo interno, scambia calore con l'acqua che circola nella rete idraulica.

La pompa di calore è unica, contiene due scambiatori distinti (uno per ciascun circuito), ed è collegata ad una unità di trattamento aria (UTA) vera e propria che sostituisce i terminali interni che erano presenti nel caso dell'impianto VRF.

Anche in questo caso, la presenza di due scambiatori esterni indipendenti ha lo scopo sia di impedire una interruzione di erogazione dell'energia necessaria per la climatizzazione, sia di realizzare contemporaneamente il funzionamento in pompa di calore e quello in modalità frigorifero: infatti uno dei due circuiti idronici che partono dalla pompa di calore è diretto ad una batteria dell'UTA che può funzionare sia come batteria di raffreddamento sia come batteria di preriscaldamento e l'altro si dirige verso la batteria di riscaldamento dell'UTA.

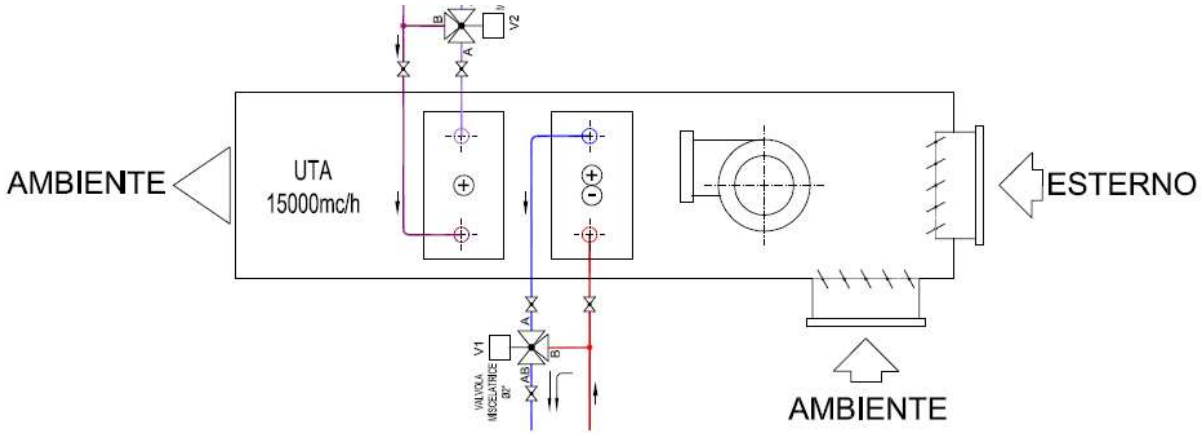


Figura 101: unità di trattamento aria **[124]**

Osservando lo schema dell'UTA si può anche notare il doppio ingresso per l'aria, questa può essere prelevata dall'esterno oppure dall'ambiente interno alla serra consentendo il ricircolo dell'aria.

Le varie condizioni di funzionamento descritte nel paragrafo 5.3. sono garantite dalle batterie dell'UTA. Quest'ultima è in grado di effettuare un post-riscaldamento dell'aria raffrescata grazie alla batteria che funziona solo in riscaldamento, posta in serie a quella che può scaldare o raffrescare.

Il circuito idronico intermedio tra pompa di calore e batterie dell'UTA richiede la presenza di accumuli inerziali; la loro funzione consiste nell'aumentare l'inerzia del circuito idraulico, la quale gioca un ruolo fondamentale durante la regolazione dell'impianto.
Infatti la stabilità della regolazione è tanto più alta quanto maggiore è l'inerzia del sistema; una regolazione stabile si traduce in una lenta variazione di temperatura del fluido che circola nell'impianto, permettendo, qualora la pompa di calore si fermasse, di non avere una brusca diminuzione o un rapido aumento di temperatura nel circuito.
Gli accumuli inerziali consentono, quindi, da un lato di sopperire alla temporanea richiesta del sistema nei momenti in cui la pompa di calore non è attiva e dall'altro di allungare il periodo di funzionamento della pompa di calore, riducendo la frequenza delle accensioni e degli spegnimenti. Senza gli accumuli, la pompa di calore sarebbe direttamente soggetta alle variazioni di richiesta termica dell'ambiente da climatizzare.
Si può, quindi, affermare che gli accumuli riducano il deterioramento sia della macchina in sé, sia delle sue prestazioni **[125]**.

Essi sono stati posizionati sul ramo di ritorno di ciascun circuito in modo tale da non rischiare di modificare la temperatura di mandata dell'acqua che alimenta le batterie dell'UTA.

Il tutto si completa con le pompe di circolazione che forniscono all'acqua l'energia necessaria per percorrere il circuito.

8.3. Confronto costi sistema VRF e sistema idronico

Dopo aver descritto i vantaggi che un sistema idronico potrebbe comportare soprattutto in termini di efficienza e, quindi, di condizioni climatiche garantite, un aspetto fondamentale riguarda il costo legato al suo acquisto.
Infatti, come precedentemente affermato, le colture aeroponiche dispongono di un limitato margine di mercato, di conseguenza è particolarmente importante contenere i costi legati innanzitutto all'iniziale investimento per la realizzazione della serra e del suo impianto di climatizzazione.
Di seguito sono riassunti i costi da sostenere per le componenti di ciascun impianto:

Tabella 75: costi per acquisto componenti impianto idronico

SISTEMA IDRONICO			
Dispositivo	Prezzo unitario [€]	Quantità	**Totale [€]**
Pompa di calore	36000	1	36000
Unità esterne	9000	1	18000
Accumuli inerziali	1000	2	2000
Pompe di circolazione	3000	2	6000
Unità Trattamento Aria	12000	1	12000
Box di contenimento pompa di calore e accumuli	21000	1	21000
TOTALE [€]			**95000**

Tabella 76: costi per acquisto componenti impianto VRF

SISTEMA VRF			
Dispositivo	Prezzo unitario [€]	Quantità	**Totale [€]**
Unità esterne	16000	2	32000
Unità interne	3500	8	28000
TOTALE [€]			**60000**

Come si evince dal confronto effettuato, all'impianto idronico è associato un costo di circa 95000 €, contro i 60000 € richiesti dal sistema VRF. La differenza di 35000 € è importante ed è accompagnata da una maggiore complessità del sistema in termini di numero di componenti.

Conclusione

I risultati ottenuti confrontando le potenze richieste per il raffrescamento e per il riscaldamento dello stesso modello di serra, climatizzata grazie allo stesso impianto con doppia pompa di calore VRF, mostrano la dipendenza dei consumi e dei rispettivi costi d'esercizio dalle condizioni climatiche proprie di ciascuna località.

Come ci si poteva aspettare, nelle località dove l'inverno è più freddo la potenza che deve essere fornita per il riscaldamento è di gran lunga maggiore rispetto quella relativa ad una località con inverni più miti (99,76 kW per Torino contro i 53,44 kW per Messina) e dove le estati sono più fresche la potenza di raffrescamento richiesta è minore (132,3 kW a Torino rispetto i 155,6 kW a Messina).

Meno intuitiva è la relazione tra potenze in gioco e costi d'esercizio: nei casi di Torino e Grosseto, la superiorità della potenza di raffrescamento (ad esempio per Torino 99,76 kW di riscaldamento e 132,3 kW per il raffrescamento) si scontra con i maggiori costi d'esercizio corrispondenti alla richiesta di riscaldamento (per Torino, 23133 €/anno per il riscaldamento e 12617 €/anno per il raffrescamento), ciò è causato da due fattori: il coefficiente SCOP inferiore al valore di SEER e la maggiore durata del periodo di riscaldamento, 7 mesi, contro i 5 mesi del "periodo estivo".
Nel caso di Messina, invece, alla maggiore potenza richiesta (quella di raffrescamento) corrisponde il maggiore costo d'esercizio.

Un aspetto comune è il risparmio energetico in periodo estivo dato dal sistema di ombreggiamento. Tale risparmio è maggiore nel caso in cui il telo ombreggiante venga posto sia su tetto sia su pareti; soprattutto alla latitudine di Messina, dove si arriva ad un 12,3 % della potenza per la climatizzazione estiva richiesta ponendo il telo solo sul tetto.

L'analisi dei costi d'esercizio può fornire una preliminare indicazione della spesa che annualmente il gestore della serra dovrà affrontare, nel caso peggiore in cui l'impianto si trovi ad operare sempre alla massima potenza richiesta.
Questa spesa potrebbe essere ridotta grazie all'installazione di un impianto fotovoltaico, costituito da moduli semi-trasparenti in sostituzione a lastre di copertura della falda sud del tetto della serra, il quale produrrebbe energia elettrica utilizzabile per alimentare le pompe di calore. Adottando, per esempio, un impianto da 13,8 kWp, il cui esborso iniziale sarebbe ripagato dopo circa 8 anni, si otterrebbe un risparmio annuale di poche migliaia di euro su un totale di qualche decina di migliaia di euro, a cui si aggiunge l'impossibilità di fare a meno dell'ombreggiamento fornito dai moduli nei momenti della giornata in cui le piante richiederebbero maggiore penetrazione della luce solare (la serra aeroponica è una serra chiusa, spostare i pannelli significherebbe dover aprire il tetto della serra).
In ogni caso, l'installazione dell'impianto fotovoltaico risulta più conveniente nella località di Messina che dispone della maggiore irradiazione solare annuale (1799 kWh/m^2) e a cui corrispondono la maggiore producibilità (17375 kWh/anno di energia elettrica) e il minore tempo di rientro (circa 7,9 anni).

Valutando, invece, come variano i consumi in relazione al modificarsi di alcuni parametri come percentuale di ombreggiamento, orientazione spaziale della serra, condizioni interne obiettivo, è possibile avere un'idea degli aspetti su cui sia più conveniente agire per ridurre i costi d'esercizio.

In tal senso, la scelta economicamente più conveniente sembrerebbe costruire una serra

utilizzando come materiale di copertura il policarbonato alveolare, orientandola lungo la direttrice est-ovest, adottando un sistema ombreggiante sia su pareti sia su tetto in grado di bloccare l'ingresso della maggior parte della radiazione solare (ad esempio, in grado di bloccare l'85% della radiazione) e accettando di ottenere condizioni climatiche interne prossime a quelle ottimali, ma non esattamente uguali ad esse.
Tutto ciò, però, si scontra con le esigenze delle coltivazioni prodotte in serra; in primo luogo con la richiesta di luce solare necessaria per il loro corretto sviluppo.
Inoltre, un aspetto da non dimenticare è la necessità di realizzare una serra adatta alla crescita di diversi tipi di colture (non una sola con i suoi determinati bisogni) perché la domanda del mercato potrebbe cambiare nel tempo.

Dal punto di vista dell'efficienza dell'impianto, risulta interessante l'alternativa con sistema idronico, ma volendo ridurre i costi relativi all'investimento iniziale, il sistema VRF offre un buon compromesso tra costi e prestazioni.

In conclusione, è auspicabile che la riduzione di costi ottenibile adottando opportune accortezze nella realizzazione delle serre e dei loro impianti di climatizzazione porti ad una riduzione di costi tale da permettere una più larga diffusione della coltura aeroponica; consentendo, seppur in piccola parte, di dare maggiore impulso alla salvaguardia del pianeta.

Indice delle figure

Figura 1: vegetali coltivati in aeroponica [1]....10
Figura 2: serra tunnel....14
Figura 3: serra a tetto curvilineo....15
Figura 4: serre a padiglione e serre Venlo....15
Figura 5: Composizione radiazione solare [26]....17
Figura 6: lastre in policarbonato alveolare [39]....19
Figura 7: effetto di luce diretta e di luce diffusa sulle piante [57]....24
Figura 8: Rete ombreggiante 30% [68]....27
Figura 9: suddivisione della radiazione solare attraverso l'atmosfera [72]....28
Figura 10: angoli solari....29
Figura 11: struttura modulo fotovoltaico tradizionale [73]....30
Figura 12: generatore d'aria calda di grandi dimensioni [69]....38
Figura 13: generatori d'aria calda di piccole dimensioni in versione pensile e portatile [69]....39
Figura 14: aerotermo [69]....40
Figura 15: tubi radianti posti a terra [69]....40
Figura 16: sistema di riscaldamento basale [96]....41
Figura 17: cooling pad [97]....42
Figura 18: sistema package [23]....43
Figura 19: sistema fogging [23]....43
Figura 20: ciclo frigorifero su diagramma pressione-entalpia del fluido R134a....45
Figura 21: pompa di calore in funzionamento raffrescamento....46
Figura 22: pompa di calore in funzione riscaldamento....46
Figura 23: schema tecnologia EVI....47
Figura 24: ciclo frigorifero con EVI....47
Figura 25: orientazione spaziale serra....52
Figura 26: schema modello di serra considerato nello studio [107]....53
Figura 27: trasformazioni condizione 1....55
Figura 28: trasformazioni condizione 1 e soluzione ottimale....56
Figura 29: trasformazioni condizione 2....56
Figura 30: trasformazioni condizione 3....57
Figura 31: trasformazioni condizione 4....58
Figura 32: raffreddamento con deumidificazione....58
Figura 33: ricircolo aria interna e riscaldamento....59
Figura 34: ricircolo aria interna, raffrescamento con deumidificazione e riscaldamento....60
Figura 35: schema impianto di climatizzazione [107]....60
Figura 36: dettaglio collegamento unità esterna con unità interne [107]....61
Figura 37: tabella dei coefficienti K_c [111]....63
Figura 38: trasformazione di raffrescamento dell'aria di rinnovo....67
Figura 39: rappresentazione di calore sensibile e latente....68
Figura 40: modulo semitrasparente VE136PVTTFL....70
Figura 41: impianto fotovoltaico....71
Figura 42: andamento dell'irradianza trasmessa attraverso la copertura durante l'arco della giornata latitudine 45°....76
Figura 43: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 1 ombreggiamento solo su tetto....78
Figura 44: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 1 ombreggiamento su tetto e pareti....78
Figura 45: irraggiamento mensile tratto dal sito PVIGS caso studio 1....79
Figura 46: energia prodotta mensilmente calcolata con UNI TS 11300-4 caso studio 1....80
Figura 47: energia prodotta mensilmente calcolata con PVGIS caso studio 1....80
Figura 48: andamento dell'irradianza trasmessa attraverso la copertura durante l'arco della giornata latitudine 42°....82
Figura 49: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 2 ombreggiamento solo su tetto....84
Figura 50: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 2 ombreggiamento su tetto e pareti....84
Figura 51: irraggiamento mensile tratto dal sito PVIGS caso studio 2....85
Figura 52: energia prodotta mensilmente calcolata con UNI TS 11300-4 caso studio 2....86

Figura 53: energia prodotta mensilmente calcolata con PVGIS caso studio 2 86
Figura 54: andamento dell'irradianza trasmessa attraverso la copertura durante l'arco della giornata latitudine 38° 88
Figura 55: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 3 ombreggiamento solo su tetto 90
Figura 56: andamento nel tempo del carico termico estivo caso 3 ombreggiamento su tetto e pareti 90
Figura 57: irraggiamento mensile tratto dal sito PVIGS caso studio 3 91
Figura 58: energia prodotta mensilmente calcolata con UNI TS 11300-4 caso studio 3 92
Figura 59: energia prodotta mensilmente calcolata con PVGIS caso studio 3 92
Figura 60: schema impianto e posizione serrandine e ventilatori 93
Figura 61: caratteristiche geometriche ventilatore di aspirazione EHP ES 404M 94
Figura 62: curva caratteristica del ventilatore EHP ES 404 M 94
Figura 63: posizione installazione a parete ventilatori di aspirazione 94
Figura 64: caratteristiche geometriche ventilatore di estrazione AFM 250/4 MF 95
Figura 65: curva caratteristica del ventilatore AFM 250/4 MF 95
Figura 66: posizione installazione a parete ventilatori di estrazione 96
Figura 67: dimensioni serrande regolabili 96
Figura 68: componenti filtro 97
Figura 69: unità esterna pompa di calore MULTI V5 ARUM260LTE5 98
Figura 70: unità esterna pompa di calore MULTI V5 ARUM280LTE5 99
Figura 71: unità interna pompa di calore ARNU76GB8A4 100
Figura 72: confronto potenze richieste per raffrescamento e per riscaldamento 107
Figura 73: confronto costi d'esercizio per raffrescamento e per riscaldamento e totali 107
Figura 74: confronto energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico 107
Figura 75: confronto tra diverse inclinazioni delle falde del tetto della serra 110
Figura 76: andamento potenza per il raffrescamento al variare del grado di ombreggiamento 112
Figura 77: andamento costi d'esercizio per il raffrescamento al variare del grado di ombreggiamento 114
Figura 78: serra orientata con il lato lungo in direzione Nord-Sud 115
Figura 79: andamento nel tempo del carico termico estivo ombreggiamento solo su tetto 117
Figura 80: andamento nel tempo del carico termico estivo ombreggiamento su tetto e pareti 118
Figura 81: variazione potenze in gioco al variare dell'orientazione della serra 119
Figura 82: variazione costi d'esercizio al variare dell'orientazione della serra 119
Figura 83: variazione orientazione serra 120
Figura 84: andamento dell'irradianza trasmessa attraverso la copertura durante l'arco della giornata 120
Figura 85: irraggiamento su moduli esposti ad est (sinistra) e ad ovest (destra) 121
Figura 86: andamento potenza richiesta per riscaldamento per diverse condizioni interne 122
Figura 87: andamento costi d'esercizio per riscaldamento per diverse condizioni interne 123
Figura 88: riscaldamento con conseguente deumidificazione 123
Figura 89: andamento potenze richieste per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento su tetto e pareti 125
Figura 90: andamento costi d'esercizio per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento su tetto e pareti 126
Figura 91: andamento potenze richieste per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento solo sul tetto 128
Figura 92: andamento costi d'esercizio per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento solo sul tetto 129
Figura 93: massima variazione delle condizioni interne obiettivo su diagramma di Mollier 129
Figura 94: confronto potenze in gioco in relazione al tipo di materiale di copertura 131
Figura 95: confronto costi d'esercizio in relazione al tipo di materiale di copertura 132
Figura 96: confronto costi d'esercizio totali in relazione al tipo di materiale di copertura 132
Figura 97: impianto idronico (a sinistra) e sistema VRF (a destra) 137
Figura 98: impianto VRF climatizzazione ambienti a temperatura diversa 138
Figura 99: impianto idronico climatizzazione ambienti a temperatura diversa 139
Figura 100: impianto di climatizzazione alternativa con pompa di calore aria-acqua e UTA [124] 141
Figura 101: unità di trattamento aria [124] 142

Indice delle tabelle

Tabella 1: classificazione serre in base a normativa UNI 13031-1:2004 14
Tabella 2: dimensioni delle più comuni tipologie di serre 15
Tabella 3: caratteristiche tecniche e costi dei materiali per copertura 20
Tabella 4: valori di radiazione luminosa consigliati per diversi tipi di specie vegetali 23
Tabella 5: confronto tra telo con LD e senza LD 25
Tabella 6: valori del VPD in millibar 37
Tabella 7: dimensioni serra 53
Tabella 8: stratigrafia 53
Tabella 9: condizioni climatiche interne obiettivo nella stagione estiva e nella stagione invernale 54
Tabella 10: caratteristiche modulo fotovoltaico 70
Tabella 11: caratteristiche installazione moduli fotovoltaici 71
Tabella 12: calcolo umidità relativa esterna periodo invernale caso studio 1 74
Tabella 13: dati riscaldamento caso studio 1 75
Tabella 14: valori temperatura e umidità relativa interne riscaldamento 75
Tabella 15: risultati per condizioni riscaldamento caso studio 1 75
Tabella 16: dati raffrescamento caso studio 1 76
Tabella 17: valori temperatura e umidità relativa interne raffrescamento 76
Tabella 18: calcolo della portata di vapore prodotta dalle piante nella serra caso 1 77
Tabella 19: calcolo carico sensibile e latente di ventilazione raffrescamento caso studio 1 77
Tabella 20: producibilità impianto fotovoltaico caso studio 1 79
Tabella 21: calcolo umidità relativa esterna periodo invernale caso studio 2 81
Tabella 22: dati riscaldamento caso studio 2 81
Tabella 23: valori temperatura e umidità relativa interne riscaldamento 81
Tabella 24: risultati per condizioni riscaldamento caso studio 2 81
Tabella 25: dati raffrescamento caso studio 2 82
Tabella 26: valori temperatura e umidità relativa interne raffrescamento 82
Tabella 27: calcolo della portata di vapore prodotta dalle piante nella serra caso 2 83
Tabella 28: calcolo carico sensibile e latente di ventilazione raffrescamento caso studio 2 83
Tabella 29: producibilità impianto fotovoltaico caso studio 2 85
Tabella 30: calcolo umidità relativa esterna periodo invernale caso studio 3 87
Tabella 31: dati riscaldamento caso studio 3 87
Tabella 32: valori temperatura e umidità relativa interne riscaldamento 87
Tabella 33: risultati per condizioni riscaldamento caso studio 3 87
Tabella 34: dati raffrescamento caso studio 3 88
Tabella 35: valori temperatura e umidità relativa interne raffrescamento 88
Tabella 36: calcolo della portata di vapore prodotta dalle piante nella serra caso 3 89
Tabella 37: calcolo carico sensibile e latente di ventilazione raffrescamento caso studio 3 89
Tabella 38: producibilità impianto fotovoltaico caso studio 3 91
Tabella 39: dati tecnici unità esterna ARUM260LTE5 99
Tabella 40: dati tecnici unità esterna ARUM160LTE5 100
Tabella 41: dati tecnici unità esterna ARUM120LTE5 100
Tabella 42: dati tecnici unità interna ARNU76GB8A4 101
Tabella 43: costi per acquisto componenti impianto di climatizzazione casi studio 1 e 2 102
Tabella 44: costi per acquisto componenti impianto di climatizzazione caso studio 3 102
Tabella 45: riepilogo costi d'esercizio casi studio 1 e 2 104
Tabella 46: riepilogo costi d'esercizio considerando risparmio dato dal fotovoltaico 104
Tabella 47: Pay Back Period 105
Tabella 48: riassunto risultati 106
Tabella 49: confronto producibilità impianto fotovoltaico con inclinazione reale ed ottimale 109
Tabella 50: confronto producibilità energia elettrica in funzione dell'inclinazione 110
Tabella 51: potenza di raffrescamento al variare dell'ombreggiamento 112
Tabella 52: costi d'esercizio per il raffrescamento al variare del grado di ombreggiamento 113
Tabella 53: calcolo umidità relativa esterna periodo invernale caso studio 1 115
Tabella 54: dati riscaldamento caso studio 1 115

Tabella 55: valori temperatura e umidità relativa interne riscaldamento caso studio 1 115
Tabella 56: risultati per condizioni riscaldamento 116
Tabella 57: dati raffrescamento caso studio 1 116
Tabella 58: valori temperatura e umidità relativa interne raffrescamento caso studio 1 117
Tabella 59: calcolo carico sensibile e latente di ventilazione raffrescamento 117
Tabella 60: variazione potenze e costi d'esercizio per il raffrescamento con ombreggiamento solo su tetto 118
Tabella 61: variazione potenze e costi d'esercizio per il raffrescamento con ombreggiamento su tetto e pareti 118
Tabella 62: risparmio dato dallo srotolamento del telo ombreggiante sia su tetto sia su pareti 120
Tabella 63: energia elettrica prodotta variando orientazione falda con moduli fotovoltaici 121
Tabella 64: confronto tra potenze richieste per riscaldamento per diverse condizioni interne 122
Tabella 65: confronto tra costi d'esercizio per riscaldamento per diverse condizioni interne 123
Tabella 66: confronto tra potenze richieste per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento su tetto e pareti 124
Tabella 67: confronto costi d'esercizio per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento su tetto e pareti 126
Tabella 68: confronto tra potenze richieste per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento solo sul tetto 127
Tabella 69: confronto tra costi d'esercizio per raffrescamento per diverse condizioni interne e con ombreggiamento solo sul tetto 128
Tabella 70: confronto potenze in gioco e costi d'esercizio in relazione al tipo di materiale di copertura 131
Tabella 71: dati tecnici moduli della serie VE136PVTTFL – VE236PVTTFL di VGS 134
Tabella 72: confronto risparmio di costi d'esercizio ottenibile adottando moduli PV di potenza crescente 134
Tabella 73: confronto aumento di costo iniziale dell'impianto 135
Tabella 74: confronto dei Pay Back Period 135
Tabella 75: costi per acquisto componenti impianto idronico 143
Tabella 76: costi per acquisto componenti impianto VRF 143

Bibliografia

[1] https://www.agricooltur.it/

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Aeroponics#Types_of_aeroponics

[3] Stoner, R.J. Aeroponics Versus Bed and Hydroponic Propagation. Florists' Review Vol 1, 1983

[4] Stoner, R.J. and J.M. Clawson, Low-mass, Inflatable Aeroponic System for High Performance Food Production. Principal Investigator, NASA, 1999–2000

[5] Rinnovabili.it, Agricooltur, la coltivazione diventa aeroponica, ottobre 2020 https://www.rinnovabili.it/agrifood/agricooltur-coltivazione-aeroponica/

[6] P Gopinath, P. Irene Vethamoni, M. Gomathi, Aeroponics Soilless Cultivation System for Vegetable Crops, 2017

[7] https://www.idroponica.it/guida-coltivazione-aeroponica_496.html

[8] http://www.svimed.eu/website/wp-content/uploads/2016/04/Agriponic-System_Ragusa_Luglio-2015.pdf

[9] Silvio Fritegotto Aeroponica, coltivare in assenza di terreno, 7 gennaio 2019 https://coltureprotette.edagricole.it/featured/aeroponica-coltivare-in-assenza-di-terreno/

[10] Imran Ali Lakhiar, Jianmin Gao, Tabinda Naz Syed, Farman Ali Chandio & Noman Ali Buttar, Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: a review on aeroponics, 2018

[11] Agriponic, Le colture fuori-suolo: un'opportunità per il bacino del mediterraneo, Indagine sulla situazione attuale e le principali opportunità delle colture protette in Sicilia e in Tunisia, 2013

[12] http://www.edoradicifelici.it/ricercasviluppo

[13] http://www.larienca.net/zafferano.html

[14] https://it.linkedin.com/company/aeroponica-industriale

[15] Nizza Monferrato: la nuova serra aeroponica del CIOFS FP, 9 gennaio 2021 https://www.fmapiemonte.it/?p=7574

[16] https://aeroponicaperrotta.it/

[17] https://www.facebook.com/Agreek-246774592848214/

[18] Il Contadino Pol, La prima serra aeroponica di Basilico in Liguria, 28 febbraio 2021, https://www.lafattoriadipol.it/la-prima-serra-aeroponica-di-basilico-in-liguria/

[19] https://www.italiafruit.net/DettaglioNews/45550/mercati-e-imprese/basilico-in-aeroponica-nuovo-impianto-in-toscana

[20] Gianluca Prestia, A Stefanaconi una serra fuorisuolo Aeroponica: la prima realizzata nell'interno mezzogiorno, Il Quotidiano del Sud, 4 agosto 2019 https://www.quotidianodelsud.it/calabria/vibo-valentia/societa-e-cultura/tecnologia/2019/08/04/a-stefa

[21] R. Mangaiyarkarasi, Aeroponics System for Production of Horticultural Crops, 2020

[22] Normativa UNI 13031-1:2004

[23] ENEA, Obiettivo efficienza energetica, Guida Operativa, L'ottenimento dei Certificati Bianchi. La scheda 40E: i sistemi serra. 2014

[24] http://www.acutis.it/Materiale_Agronomia/Colture%20protette%20per%20Agronomia_Martinetti.pdf

[25] C. A. Campiotti, Dottorato di ricerca, Tecnologie per la sostenibilità ed il risanamento ambientale: la risorsa rinnovabile per la sostenibilità ambientale ed energetica della filiera dei sistemi serra in Italia, 2011-2013

[26] Professoressa Anna Pellegrino, slide del corso Sistemi per l'illuminazione e per il controllo del rumore, 2021

[27] Corinna Viola, Amanda Campodonico, Matteo Scoccianti, Alessandro Campiotti "Le coltivazioni in serra: materiali di copertura e microclima"

[28] R. Prina, Analisi di soluzioni innovative per il riscaldamento delle serre: la cogenerazione a biomassa e la geotermia, 2012-2013

[29] http://www.scienzaegoverno.org/content/5-materiali-di-copertura-innovativi-nelle-serre

[30] http://www.esiglass.it/wp-content/uploads/2014/09/Il-vetro-e-la-radiazione-solare.pdf e Corinna Viola, Amanda Campodonico, Matteo Scoccianti, Alessandro Campiotti "Le coltivazioni in serra: materiali di copertura e microclima"

[31] https://www.serregiardini.it/materiali.html

[32] https://it.cnmorn.com/morn-greenhouse-glass.html

[33] Pietro Piccarolo, Tipologie di serre e tecniche di coltivazione, Focus MMW n.5/2008

[34] https://ita.calameo.com/read/0043198039b937b374da7?page=1

[35] Paolo Battistel, L'azione sul microclima, Colture protette n5, 2014

[36] https://coltureprotette.edagricole.it/vivaismo/coperture-e-materiali-per-serre-e-tunnel-come-orientarsi-nella-scelta/

[37] https://coltureprotette.edagricole.it/orticoltura/film-plastici-innovativi-per-le-serre-del-futuro/

[38] https://www.gallina.it/prodotti/show_prod.php?prodname=PoliCarb%C2%AE&lang=it

[39] https://www.polyplants.it/articolo_ita.php?idarticolo=A0000015

[40] Prezziario Regione Sardegna, pag.29, 2016

[41] Prezziario Regione Abruzzo, pag.47,2014/2020

[42] Prezziario Regione Emilia Romagna, pag.173, 2007

[43] Prezziario Regione Puglia, pag.9, 2018

[44] Prezziario Regione Sicilia, pag.54, 2015

[45] Prezziario Regione Lazio, pag.5/34, 2016

[46] https://www.euroserreitalia.com/wp/serre-e-orangerie/materiali-vetro-alluminio

[47] Dott. Gallina, Catalogo Generale dei prodotti, 2011

[48] https://www.plakglass.it/spessore-del-vetro.php

[49] S. Fritegotto, Nella serra si può migliorare la quantità di luce disponibile alle piante, 2018

[50] A. Vadiee, V. Martin, Energy analysis and thermoeconomic assessment of the closed greenhouse – The largest commercial solar building, 2011

[51] Hesham A. Ahemd, Abdulelah A. Al-Faraj, Ahmed M. Abdel-Ghany, Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: A review,2015

[52] S. Fritegotto, Le problematiche legate alla gestione della serra, aprile 2008

[53] ENEA, C. Campiotti, C.A. Latini, C. Bibbiani, L. Consorti, M. Scoccianti, G. Viola, Efficienza energetica in agricoltura. Il raffrescamento dei sistemi serra, 2014

[54] A.M. Abdel-Ghany, P. Picuno, I. Al-Helal, A.Alsadon, A. Ibrahim, M. Shady, Radiometric Characterization, Solar and Thermal Radiation in a Greenhouse as Affected by Shading Configuration in an Arid Climate, 2015

[55] F. Bourlot, Ageon

[56] http://www.egc.com/useful_info_lighting.php

[57] https://www.cyclamen.com/pdf/technews/201903/whitewashing-it.pdf

[58] Stefania De Pascale, Albino Maggio e Giancarlo Barbieri, La sostenibilità delle colture protette in ambiente mediterraneo: limiti e Prospettive, 30 gennaio 2006

[59] ENEA, G. Vox, I. Blanco, E. Schettini, Analisi comparativa di sistemi di distribuzione del freddo negli impianti di raffrescamento solare per serra, 2017

[60] https://www.agricontrol.it/154/prodotti/controllo-ombreggiamento/

[61] Arrigoni S.p.a., Webinar: Il mondo degli agrotessili: le differenze tra i vari tessuti. Quali parametri contano davvero nella scelta? Monofilo o bandella? Maglia piana o annodata?, 27 marzo 2020

[62] https://www.hortomallas.com/it/come-scegliere-la-rete-ombreggiante-perfetta-per-le-tue-coltivazioni-per-la-tua-casa-o-parcheggio-e-come-i-diversi-gradi-di-ombreggiatura-influiscono-sulle-tue-piante/

[63] Arrigoni S.p.a., Webinar Gestione della Luce e della Temperatura. Schermi termo-riflettenti per il miglioramento vegetativo. Esperienze e nuovi sviluppi, 16 marzo 2020

[64] https://www.polyplants.it/MaterialePDF/SCHERMI_PH_2017.pdf

[65] https://casaplast.it/sistemi-ombreggiamento-serre-guida/

[66] Mirco Romani, TESI Studi sulla nutrizione azotata della lattuga coltivata in idroponica, 2007/2008

[67] https://www.padano.it/product/reti-ombreggianti-e-frangivista/

[68] https://www.polyplants.it/articolo_ita.php?idarticolo=A0000025

[69] A. D'Emilio, Controllo del clima, Sistemi computerizzati di controllo climatico

[70] https://www.polyplants.it/articolo_ita.php?idarticolo=A0000058

[71] G. Minuto, F. Tinivella, E. Dani, F. Gimelli, A. Minuto, Serre fotovoltaiche a duplice attitudine

[72] https://www.ilmeteo.it/notizie/meteo-sole-temperature-e-temporali-con-lirraggiamento-solare

[73] F. Spertino, Conversione fotovoltaica dell'energia, 2019

[74] A. Vincenti, Sistemi fotovoltaici, Impianti solari in Conto Energiai, 2006

[75] G. Minuto, C. Bruzzone, F. Tinivella, G. Delfino, A. Minuto, Fotovoltaico sui tetti delle serre per produrre anche energia, 2009

[76] S. Moretti, A. Marucci, A Photovoltaic Greenhouse with Variable Shading for the Optimization of Agricultural and Energy Production, 2019

[77] Zhi Li, A. Yano, M. Cossu, H. Yoshioka, I. Kita, Y.Ibaraki, Electrical Energy Producing Greenhouse Shading System with a Semi-Transparent Photovoltaic Blind Based on Micro-Spherical Solar Cells,2018

[78] GSE, Regole applicative per l'iscrizione ai registri e per l'accesso alle tariffe incentivanti (Quinto Conto Energia), 5 luglio 2012

[79] G. Minuto, Le serre a duplice attitudine: una sfida tecnica e tecnologica, 2011

[80] https://www.pgcasa.it/articoli/risparmio-energetico-e-fotovoltaico/fotovoltaico-trasparente-cose-come-funziona-e-prezzi__9035

[81] https://it.wikipedia.org/wiki/Cella_di_Gr%C3%A4tzel

[82] A. Yano, M Kadowaki, A Furue, et al., Shading and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an east-west oriented greenhouse. Biosyst Eng, 2010

[83]https://www.vegaengineering.com/mlist/uploaded/GSE%20%20guida%20integrazione%20architettonica%20del%20fotovoltaico.pdf

[84] https://www.wolmann.com/blog/dimensioni-e-potenza-per-serre-fotovoltaiche

[85] A. Cappuccini, La protezione passiva delle serre dagli eccessi termici mediante: l'ombreggiamento con elementi fotovoltaici mobili, 2015

[86] https://www.solerpalau.it/formacion_01_39.html

[87] P. Sambo, C. Nicoletto, DAFNAE, Tecniche colturali per una corretta gestione del clima nelle serre: il contributo della sperimentazione, Università degli Studi di Padova

[88] Jarvis W. R., 1992. Managing diseases in greenhouse crops. APS PRESS

[89] Hoffman Glenn J., 1997. Humidity. Controlled Environment Guidelines for Plant Research. Editors: T. W. Tibbits, T.T. Kozlowski

[90] http://verticalfarm.altervista.org/positive-effects-co2-carbon-dioxide-enrichment/?doing_wp_cron=1616503638.3097751140594482421875

[91] https://www.canna-it.com/utilizzo_dellanidride_carbonica_co2_nelle_coltivazioni_indoor

[92] https://www.agricontrol.it/161/prodotti/controllo-co2/

[93] https://industriale.viessmann.it/blog/riscaldamento-serre-agricole-alta-efficienza

[94] https://industriale.viessmann.it/blog/scegliere-impianto-riscaldamento-serre

[95] E. Fabrizio, Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection, 2012

[96]https://d.facebook.com/AgriforSerre/photos/a.1584069311826685/2338769106356698/?type=3&source=48

[97] http://www.sarracenia.fr/cooling.htm

[98] I. Yildiz, D. P. Stombaugh, Dynamic modeling of microclimate and environmental control strategies in a greenhouse coupled with a heat pump system. Acta Hort, 2006

[99] Y. Tong, T. Kozai, N. Nishioka, K. Ohyama, Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP), 2009

[100] M. Bertolini, Seminario Sistemi VRF, 2021

[101] J. Gandini, Seminario Sistemi VRF, 2021

[102] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R2281&from=IT#d1e32-19-1

[103] C. Kittas, T. Bartzanas, Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations, 2005

[104] E. J. Baeza, Tesi di Dottorato, Optimización del diseño de los sistemas de ventilación en invernadero tipo parral, 2007

[105] C. Stanghellini, La gestione climatica della serra, con particolare riguardo all'azione dei fattori luce, temperatura, CO2, 2011

[106] UNI 10351

[107] G. Tosi, Schema dimensionale, Progetto di climatizzazione serre in pompa di calore in Cascina Gorrea, Carignano,2020

[108] C. Pizzetti, Condizionamento dell'aria e refrigerazione, pagg. 29-34, 1980

[109] C. Santonoceto, Rapporti acqua-pianta: Evapotraspirazione, Corso di Laurea Scienze e Tecnologie Alimentari,Corso integrato Agronomia e colture erbacee e arboree industriali, Modulo Agronomia e colture erbacee industriali

[110] A. Staiano, Individuazione di condizioni di stress da carenza idrica in Vitis vinifera L. con l'impiego di modellistica agro-idrologica, 2011

[111] J. Doorenbos, W. O. Pruitt, Crop water requirements. Irrigation and Drainage Papaer 24, Food and

Agric. Organization of the United Nations, 1977

[112] M. Acutis, Evapotraspirazione, Corso di studi in Produzione e Protezione delle Piante e dei Sistemi del Verde, Università degli Studi di Milano, Facoltà di Agraria, 2013

[113] C. A. Campiotti, R. Balducchi, A. Bernardini, C. Bibbiani, F. Dondi, F. Di Carlo, A. Genovese, M. Scoccianti, Energia rinnovabile in agricoltura

[114] https://www.wekiwi.it/main/costo-kwh-energia-elettrica/

[115] M. C. Masoero, Corso di Impianti Termitecnici, Unità di trattamento aria, 2020-2021

[116] https://www.airclimastore.com/prodotto/sistema-vrf-6900-kw-dc-inverter-pompa-calore/?utm_source=trovaprezzi

[117] https://www.climatecstore.com/it/unit---interna/4489-mini-dvm-s-unita-nterna-canalizzata-alta-prevalenza-30-280-pascal-raff-kw-180-risc-kw-200.html

[118] https://termoidraulicagostini.info/media/wp-content/uploads/2018/10/listino-vortice-areaulica-min.pdf

[119] https://www.pannellifotovoltaiciprezzi.org/costi-dei-moduli-fotovoltaici/#Quanto_costa_fotovoltaico_al_kW

[120] Sethi, On the selection of shape and orientation of a greenhouse: thermal modeling and experimental validation, 2009

[121] M. Vio, Impianti idronici e sistemi VRF,2010,pagg.73-75

[122] M. Vio, Impianti idronici e sistemi VRF,2010,pagg.1-7

[123]https://www.centrogalileo.it/nuovaPA/Articoli%20tecnici/Fantoni/ventilconvettori_espansione_diretta_115.htm

[124] G. Tosi, Schema impianto idronico per climatizzazione serra, 2021

[125] http://enercomb.it/news/realizzazioni/il-serbatoio-inerziale

RINGRAZIAMENTI

*All' **Ingegner Tosi** per avermi pazientemente seguita nello svolgimento di questa Tesi, fornito materiale di studio e contatti di esperti in campo agricolo.*

*Al **Professor Marco Carlo Masoero** per avermi dato l'opportunità di confrontarmi con argomenti stimolanti e di scoprire i mille aspetti di un mondo protetto a me completamente nuovo.*

*Al **Team** di **Agricooltur** per avermi cortesemente accolto nella loro innovativa serra di Carignano.*

*Al **Dottor Francesco Bourlot** di **Ageon** per la sua gentilezza e le sue preziose informazioni.*

*Ai miei **Genitori**, alle mie **Zie** e a mio **Padrino** per l'affetto, il sostegno, l'educazione impartita e i valori insegnati, per avermi tranquillizzata e spronata di fronte alle difficoltà.*

*A **Vale, Degio, Ale, Domi, Lidia, Anto, Albi, Henri, Marco, Teo P. e Teo B**. per le esperienze ed emozioni condivise, per le parole dette nel momento giusto, per quelle dette nel momento sbagliato, ma comunque in grado di strappare un sorriso e, soprattutto, per essermi stati vicini sempre, nonostante la distanza.*

*A **Gionny,** che reputo una persona forte e che considero un modello da seguire per la sua abilità di combinare la serietà sul lavoro, il rispetto indistinto verso tutti e la capacità di lasciar da parte i pensieri per vivere appieno i momenti di spensieratezza con gli amici.*

*Alle **Professoresse** e ai **Professori** che ci hanno incoraggiati a non perdere mai la curiosità e a migliorarci sempre.*