Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Ricerca di Sistema elettrico

Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra

Giuliano Vox, Evelia Schettini

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI ALDO MORO

Report RdS/PAR2015/156

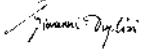
SISTEMI DI CLIMATIZZAZIONE INNOVATIVI PER EDIFICI E SISTEMI SERRA

Giuliano Vox, Evelia Schettini (Università degli Studi di Bari "Aldo Moro", Dipartimento di Scienze Agro-Alimentari e Territoriali)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2015
Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici
Progetto: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro
Obiettivo: Tecnologie “green” per gli edifici
Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all’interno dell’Accordo di collaborazione “Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra”

Responsabile scientifico ENEA: Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Università di Bari: Evelia Schettini

Indice

SOMMARIO 4
1 INTRODUZIONE 5
1.1 EDIFICI PROTETTI CON ESSENZE VEGETALI 5
1.2 IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE DI UNA SERRA BASATO SU TECNOLOGIA SOLAR COOLING. 7
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI 10
2.1 ANALISI DEI DATI PROVENIENTI DALLA CAMPAGNA SPERIMENTALE SU PARETI ESTERNE DI EDIFICI PROTETTI CON ESSENZE VEGETALI IN AMBIENTE CLIMATICO MEDITERRANEO. 10
2.1.1 Prova sperimentale presso l'Università di Bari 10
2.1.2 Analisi temperature con termocamera 18
2.2 STUDIO DEL SISTEMA DI DISTRIBUZIONE DEL VETTORE DI RAFFRESCAMENTO E INDIVIDUAZIONE DELLE SPECIFICHE FUNZIONALI ATTE A GARANTIRE IL COMFORT MICROCLIMATICO INTERNO 22
2.2.1 L'impianto sperimentale presso l'Università d Bari 22
2.2.2 Il modello di simulazione 40
2.2.3 Risultati sperimentali 42
2.3 PUBBLICAZIONI 45
3 CONCLUSIONI 46
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 46
5 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO 49

Sommario

Nell'ambito del PAR 2015 il gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali dell'Università di Bari ha investigato aspetti concernenti sistemi passivi ed attivi per incrementare la sostenibilità ambientale delle tecniche di raffrescamento estivo sia in edifici sia in serre.

Nell'ambito delle attività "Analisi dei dati provenienti dalla campagna sperimentale su pareti esterne di edifici protetti con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo", il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha elaborato i dati misurati su tre prototipi in scala di parete di edificio, due ricoperti con rampicanti sempreverdi (Pandorea jasminoides variegata e Rhyncospermum jasminoides), il terzo consisteva in una parete non coperta ed è stato utilizzato come testimone. Il campo sperimentale è dotato di un sistema di acquisizione dei parametri climatici: temperatura dell'aria esterna, radiazione solare incidente sulla superficie verticale, velocità e direzione del vento, temperatura superficiale della parete sul lato esterno esposta alla radiazione, temperatura superficiale della stessa parete sul lato interno. Le temperature massime dell'intonaco esterno per il muro privo di vegetazione sono risultate sempre maggiori nelle ore calde della giornata rispetto alle temperature dell'intonaco esterno registrate nelle stesse ore per i muri verdi. Le differenze tra le medie mensili delle temperature massime sono risultate dell'ordine di 4.8-5.6 °C nel periodo caldo e di 2.7-3.6 °C nel periodo freddo. I valori medi mensili delle temperature minime dell'intonaco esterno per il muro privo di vegetazione sono risultate sempre minori rispetto alle temperature minime dell'intonaco esterno registrate nelle stesse ore per le pareti verdi. In valore medio, nelle ore notturne le differenze tra le temperature registrate variano da 0.8 °C nel periodo estivo a 1.6 ° C nel periodo invernale in presenza delle piante.

Nell'ambito delle attività concernenti lo "Studio del sistema di distribuzione del vettore di raffrescamento e individuazione delle specifiche funzionali atte a garantire il comfort microclimatico interno" il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha ottimizzato il prototipo dimostrativo di sistema per il raffrescamento estivo di una serra basato su impianto di solar cooling. Il prototipo di solar cooling è stato realizzato dall'ENEA nel 2015 presso il centro sperimentale dell'Università di Bari. Il campo solare consiste di 50 m^2 di collettori solari sottovuoto. La macchina frigorifera ad alimentazione termica è una macchina ad assorbimento monoblocco ad acqua calda di potenza frigorifera pari a 23 kW con acqua di alimentazione a 83-88 °C, fluido refrigerante/assorbente ad acqua e bromuro di litio. Il sistema di accumulo termico è costituito da due serbatoi, uno per l'acqua calda e l'altro per l'acqua refrigerata. E' stata realizzata la linea principale di adduzione dell'acqua fredda alle piante. Durante i primi test di funzionamento si è verificato spesso il blocco dell'impianto a causa delle presenza di sedimenti nell'acqua di alimentazione. Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha trovato una soluzione per garantire il funzionamento dell'impianto additivando l'acqua di alimentazione. È stato, inoltre, realizzato un sistema per la simulazione dei profili di carico e delle potenze dell'impianto di solar cooling utilizzato per il raffrescamento della serra nel periodo estivo.

1 Introduzione

1.1 Edifici protetti con essenze vegetali

Le aree urbane sono caratterizzate nel periodo estivo da temperature dell'aria più alte rispetto a quelle registrate nelle circostanti aree suburbane e rurali con differenze di temperatura anche superiori ai 5 °C (Rowe, 2011; Santamouris, 2012;. Kanechi, et al., 2014). Questo fenomeno del riscaldamento urbano è noto come "isola di calore urbana" (dall'inglese Urban Heat Island, UHI) e dipende principalmente dalla cementificazione delle città, dalla scelta dei materiali di costruzione che, per le loro caratteristiche termiche e radiative, sono generalmente poco riflettenti, mentre assorbono un'alta percentuale della radiazione solare incidente con successivo rilascio di calore durante la notte per irraggiamento (Berdahl e Bretz, 1997; Bretz e Akbari, 1997; Bretz et al., 1998).

La cementificazione, cioè la copertura permanente del suolo con materiali quali asfalto o calcestruzzo per la costruzione di case, ospedali, scuole, edifici e strade, è la forma più evidente e diffusa di copertura artificiale del suolo. Altre forme di copertura artificiale sono relative all'asportazione del suolo per escavazione, alla compattazione del suolo dovuta alla presenza di impianti industriali, infrastrutture, manufatti, depositi permanenti di materiale o passaggio di mezzi di trasporto. Nel 2015, in Italia in 15 regioni è stato superato il 5% di suolo consumato con copertura artificiale (Figura 1.1.1); si è registrato un valore percentuale oltre il 10% in Lombardia e Veneto e valori compresi tra il 7 % e il 10% in Campania, Puglia, Emilia Romagna, Lazio, Piemonte, Sicilia e Liguria (ISPRA, 2016).

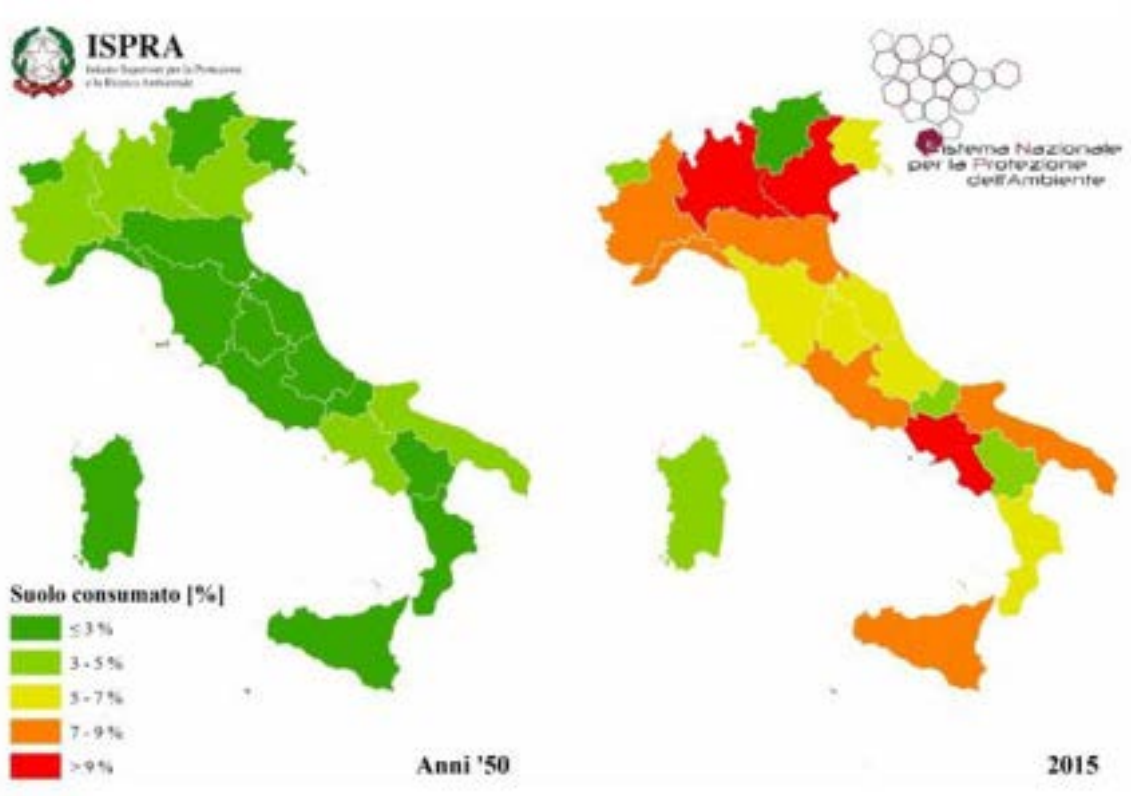


Figura 1.1.1: Stima del suolo consumato a livello regionale in Italia negli anni '50 e nel 2015 (fonte: http://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/rapporti/Rapporto_consumo_suolo_20162.pdf).

La cementificazione, inoltre, riduce la capacità dei materiali di trattenere acqua; ne consegue una minore evaporazione, che riduce ulteriormente il raffrescamento dell'aria in prossimità del terreno.

Il fenomeno del riscaldamento urbano è influenzato da numerose altre cause quali la diminuzione delle aree verdi nei centri urbani, con la conseguente riduzione di zone d'ombra e della possibilità del verde di intercettare la radiazione solare e di trattenere l'acqua piovana, la ridotta capacità della radiazione infrarossa emessa di sfuggire in atmosfera, la limitata circolazione dell'aria a causa dei canyon urbani, cioè strade costeggiate ai lati da edifici (Ryu e Baik, 2012; Alexandri e Jones, 2008). Inoltre l'UHI è influenzato anche dalla produzione di calore derivante dalle attività umane e dai consumi energetici che esse comportano: attività industriali, traffico veicolare, impianti di riscaldamento e condizionamento, produzione e consumo di energia elettrica; inoltre, le proprietà radiative dell'atmosfera sono alterate dagli alti livelli di inquinamento associati a tali attività (Santamouris, 2012; Gago et al., 2013). Il calore connesso alle attività umane ha valori medi annui compresi tra 15 e 50 W m^{-2} nelle aree urbane delle nostre latitudini, mostrando valori più alti di giorno e in inverno.

Il fenomeno UHI ha influenze negative sulle condizioni di comfort esterno, sulla concentrazione di agenti inquinanti come polveri sottili e anidride carbonica, inducendo un maggiore utilizzo dei sistemi di condizionamento dell'aria degli edifici con un notevole aumento dei consumi di energia per il raffrescamento e un aumento della domanda dell'energia elettrica di picco (Karlessi et al., 2011; Jaffal et al., 2012). Il fenomeno del riscaldamento urbano è, inoltre, particolarmente dannoso per la salute di bambini, anziani e persone malate, in quanto in estate, quando le temperature dell'aria in città sono costantemente elevate nel corso delle 24 ore, l'organismo umano può presentare difficoltà a riprendersi di notte dalle condizioni di calore estremo a cui è stato sottoposto durante il giorno (Kalkstein e Davis, 1989; Petralli et al., 2006).

Attualmente, circa il 70% della popolazione italiana risiede in aree urbane ed è soggetto ai problemi derivanti dal fenomeno del riscaldamento urbano. L'intensità del fenomeno del riscaldamento urbano è prevedibilmente in aumento nei prossimi anni sia in Italia che nel mondo, in conseguenza del costante aumento della popolazione urbana e, anche, del riscaldamento globale, in base al quale un aumento della temperatura media avrà sicuramente un effetto sulle condizioni di vita nelle città, con un peggioramento delle condizioni di benessere fisico e psicologico della popolazione.

Una tecnologia sostenibile quale il posizionamento di vegetazione sui tetti e sulle facciate degli edifici si sta diffondendo ovunque con una grande diversificazione nelle modalità di realizzazione con l'obiettivo di ridurre il consumo di energia degli edifici per il condizionamento in estate e per aumentare l'isolamento termico in inverno (Cheng et al., 2010; Jim e Tsang, 2011; Köhler e Poll, 2010; Perini et al., 2011; Pérez et al., 2011; Cameron et al., 2014; Campiotti et al., 2013; Norton et al., 2015; Tan et al., 2014; Francis e Lorimer, 2011.).

Europa e Nord America sono le nazioni in cui i tetti verdi possono essere applicati con profitto, richiedendo poca manutenzione (Ascione et al., 2016; Castleton et al., 2010; Refahi e Talkhabi, 2015). Attualmente in letteratura sono riportati risultati sperimentali sulle pareti verdi di non più di 2 settimane durante il periodo estivo, mancano dati relativi a tutto l'anno, e spesso i modelli di simulazione non sono convalidati con dati reali (Hunter et al., 2014; Pérez et al., 2014;. Raji et al., 2015).

La presenza di verde sui tetti e sulle pareti verticali degli edifici può contribuire alla riduzione dell'inquinamento atmosferico: la riduzione delle temperature superficiali delle pareti degli edifici contribuisce a una riduzione del consumo energetico dell'edificio e, dunque, si ha una riduzione del fenomeno del riscaldamento urbano con una conseguente riduzione dell'inquinamento atmosferico (Berardi et al., 2014; Fernandez-Canero et al., 2013; Gagliano et al., 2015). Le piante agendo come biofiltri: assorbono alcuni contaminanti, rimuovono le sostanze inquinanti e trattengono particelle sospese nell'aria (Fernandez-Cañero et al., 2013; Feng e Hewage, 2014). La tecnologia verde contribuisce anche all'isolamento acustico e all'assorbimento del rumore (Berardi et al., 2014; Rowe,

2011), riducendo la riflessione del suono fino a 3 dB e migliorando l'isolamento acustico fino a 8 dB (IGRA, 2016).

Il lavoro svolto dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra" è consistito nell'esaminare gli effetti di due diversi piante rampicanti sempreverdi, utilizzate come sistemi passivi verticali verdi sulle pareti, nel corso di un anno intero. La prova sul campo è stato effettuata presso l'Università di Bari (Italia), al fine di superare la mancanza in letteratura di dati sperimentali, relativamente alla regione mediterranea, per un periodo sufficientemente esteso.

1.2 Impianto di climatizzazione di una serra basato su tecnologia solar cooling.

Le coltivazioni in ambiente protetto, sia produzioni orticole sia quelle floricole, richiedono condizioni microclimatiche all'interno dell'ambiente confinato favorevoli alla crescita, allo sviluppo e alla massima produttività delle piante in epoca anticipata o ritardata rispetto a quella normalmente ottenibile in pien'aria o rispetto alla coltivazione di piante originarie di zone con clima molto diverso da quello locale. I parametri climatici che devono essere controllati all'interno dell'ambiente confinato sono: la temperatura e l'umidità relativa dell'aria, la temperatura del suolo o del substrato di coltivazione, il livello di radiazione cui sono esposte le piante. Ottimali condizioni microclimatiche all'interno di una serra garantiscono l'ambiente adatto alla crescita delle piante, condizione di sicurezza per i lavoratori e risparmio energetico (von Zabeltitz, 1999; Vox et al., 2010; Vox et al., 2008). Nelle regioni caratterizzate da clima Mediterraneo, a cause delle elevate temperature registrate all'interno delle serre durante il periodo primavera-estate, è necessario prevedere dei sistemi attivi per il raffrescamento. I metodi di raffreddamento più diffusi per le serre sono i sistemi mediante evaporazione d'acqua, cioè i sistemi a filtri evaporativi e il fog system.

Il sistema a filtri evaporativi è un sistema costituito da pannelli permeabili, disposti in testata o sulle pareti laterali, mantenuti imbibiti d'acqua, con i ventilatori sulle pareti opposte funzionanti in aspirazione (Figura 1.2.1 – 1.2.2). Questo sistema di raffrescamento può ridurre le temperature dell'aria all'interno della serra di circa 4-5 °C (Jain and Tiwari, 2002); si può incrementare la riduzione fino a circa 12 °C se il sistema è integrato con sistemi ombreggianti (Sethi and Sharma, 2007). I sistemi a filtri evaporativi sono tanto più efficienti quanto più bassi sono i livelli di umidità dell'aria esterna. La differenza di temperatura dell'aria tra il ventilatore e il filtro evaporativo può variare tra 3°C e 7 °C (Vox et al., 2010).

Il fog system si basa sull'immettere all'interno della serra una fitta nebulizzazione di goccioline minute che, evaporando, sottraggono all'aria il calore latente di evaporazione (Figura 1.2.3). La temperatura all'interno della serra può essere ridotta di 3-8°C (Sethi and Sharma, 2007). Questo sistema viene utilizzato in zone con clima caldo e secco e quando la traspirazione delle piante è insufficiente (ASABE, 2008), fornendo una maggiore uniformità nei livelli di temperatura e umidità rispetto al sistema a filtri evaporativi.

Esiste anche un altro sistema di raffreddamento che consiste nel posizionare spruzzatori di acqua sul tetto; questo sistema, meno efficace rispetto al sistema a filtri evaporativi e al fog system, consente una riduzione della temperatura dell'aria interna di 3-5 ° C (Sethi e Sharma, 2007).

I sistemi di raffreddamento evaporativo sopra descritti richiedono, però, grandi quantità di acqua di alta qualità; l'acqua però è una risorsa naturale limitata nell'area del Mediterraneo.

Diverse ricerche sono in atto sull'applicazione di sistemi integrati per il raffrescamento delle serre, utilizzando scambiatori di calore terra-aria o scambiatori di calore accoppiati con la falda acquifera (Ghosal et al., 2004; Sethi e Sharma, 2007; Sharan, 2009). Questi sistemi usano il potenziale termico della terra o dell'acqua della falda acquifera, avendo questi una temperatura costante durante tutto l'anno minore rispetto alla temperatura ambientale nel periodo estivo. Questi sistemi possono ridurre significativamente la temperatura dell'aria all'interno della serra con un risparmio energetico, rispetto

ad altri sistemi di raffreddamento, soprattutto quando sono combinati con l'energia solare e geotermica (Yildiz et al., 2012). I sistemi di raffreddamento che usano la refrigerazione o la deumidificazione sono troppo costosi in termini di investimenti e di costi operativi, quest'ultimi aumentano soprattutto quando una grande quantità di calore deve essere rimossa dalla serra (Kumar et al., 2009; Vox et al., 2010).

Al fine di ridurre sia i consumi di energia elettrica/carburante sia la dipendenza energetica da combustibili fossili, i sistemi di raffreddamento ad energia solare possono essere usati in quanto le esigenze di raffreddamento sono in fase con la disponibilità di energia solare (Al-Alili et al. 2012; Ghaddar et al., 1997). La radiazione solare può essere utilizzata per produrre energia termica attraverso collettori solari termici, questa può alimentare sistemi di raffrescamento. Tali sistemi sono classificati in tre categorie: cicli chiusi ad adsorbimento e ad assorbimento, cicli aperti essiccanti solidi e liquidi, e cicli termo-meccanici di espulsione. Questi cicli sono caratterizzati dal coefficiente termico di prestazione ($COP_{thermal}$). Il ciclo ad assorbimento è caratterizzato da un valore maggiore di $COP_{thermal}$ rispetto al ciclo di adsorbimento, e richiede temperature superiori a 85 ° C (Hwang et al., 2008).

Il lavoro svolto dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra" presenta i risultati preliminari di una ricerca sull'applicazione di un sistema di raffreddamento ad assorbimento solare per una serra mediterranea. Questo sistema fornisce significative opportunità di risparmio energetico per il raffreddamento di una serra nei climi caldi.

Figura 1.2.1: Filtri evaporativi nel sistema di raffrescamento.

Figura 1.2.2: Ventilatori di aspirazione in un sistema di raffrescamento a filtri evaporativi.

Figura 1.2.3: Raffrescamento mediante fog system.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Le attività svolte dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e Territoriali dell'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" nell'ambito dell'accordo di collaborazione "Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra" con l'ENEA riguardano l'analisi delle prestazioni di pareti verdi per edifici in ambiente climatico mediterraneo (paragrafo 2.1) e l'ottimizzazione tecnologica ed energetica di un impianto di climatizzazione per un sistema serra basato su tecnologia solar cooling (paragrafo 2.2). Le attività svolte hanno consentito di elaborare nove pubblicazioni (paragrafo 2.3).

2.1 Analisi dei dati provenienti dalla campagna sperimentale su pareti esterne di edifici protetti con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo.

2.1.1 Prova sperimentale presso l'Università di Bari

Nell'ambito delle attività finanziate dal PAR 2014, il gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e Territoriali dell'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" ha realizzato tre prototipi di parete di edificio in scala: due ricoperti con rampicanti sempreverdi (Pandorea jasminoides variegata e Rhyncospermum jasminoides), la terza parete è una parete non coperta ed è utilizzata come testimone. La prova è stata realizzata presso il centro didattico sperimentale "Martucci" dell'Università di Bari sito in Valenzano (Bari), latitudine 41° 05' N, longitudine 16° 53' E, altitudine 85 m s.l.m.

Le pareti, esposte a sud, sono state realizzate con mattoni forati (0.20 m x 0.25 m x 0.25 m) posati su uno strato di malta. Ogni singola parete è caratterizzata da una larghezza pari a 1.00 m, un'altezza pari a 1.55 m, e uno spessore pari a 0.22 m. I mattoni forati sono caratterizzati da un coefficiente di conducibilità termica (UNI EN 1745, 2012) λ pari a 0.282 W m^{-1} K^{-1} e da un coefficiente di calore specifico C pari a 840 J kg^{-1} K^{-1}.

Le pianti rampicanti sono state trapiantate nel Giugno 2014 (figura 2.1.1), una rete è stata posizionata ad una distanza di circa 15 cm dalla parete verticale al fine di sostenere la crescita delle piante.

Per consentire una corretta valutazione dell'influenza delle piante sugli effetti della radiazione solare incidente, la parete posteriore di ogni parete verticale è stata isolata mediante la realizzazione di una struttura coibentata, realizzata con fogli in polistirene espanso sinterizzato dello spessore di 30 mm; inoltre una rete ombreggiante blu è stata posizionata sulla struttura per ridurre l'effetto della radiazione solare incidente (Figura 2.1.2).

Le piante all'inizio della prova non presentavano uno sviluppo vegetativo tale da ipotizzare una continua coltre vegetale sul muro (Figura 2.1.1). La parete ricoperta con il rampicante Rhyncospermum jasminoides rispetto alla parete con il rampicante Pandorea jasminoides variegata ha presentato per mesi una maggiore presenza di vuoti, questa differenza influenzava le temperature dell'intonaco esterno delle due pareti "verdi" (Figura 2.1.2). Dalla primavera 2015 entrambi i muri verdi sono stati ricoperti in modo uniforme dalle piante rampicanti (Figure 2.1.3 e 2.1.4).

Figura 2.1.1: Le tre pareti presso il campo sperimentale dell'Università di Bari; la parete a destra è ricoperta da *Rhyncospermum jasminoides*, la parete centrale da *Pandorea jasminoides variegata* mentre la parete non coperta a sinistra è il testimone; giorno del trapianto delle piante, 18 Giugno 2014.

Figura 2.1.2: Sviluppo delle piante rampicanti utilizzate presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: la parete a destra è ricoperta da *Rhyncospermum jasminoides*, la parete centrale da *Pandorea jasminoides variegata* mentre la parete non coperta a sinistra è il testimone; 1 Settembre 2014.

Figura 2.1.3: Sviluppo delle piante rampicanti utilizzate presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: la parete a destra è ricoperta da Rhyncospermum jasminoides, la parete centrale da Pandorea jasminoides variegata mentre la parete non coperta a sinistra è il testimone; 1 Luglio 2015.

Figura 2.1.4: Sviluppo delle piante rampicanti utilizzate presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: la parete a destra è ricoperta da Rhyncospermum jasminoides, la parete centrale da Pandorea jasminoides variegata; 1 Luglio 2016.

Il campo sperimentale è stato dotato sin dall'inizio della prova di una stazione meteorologica (figura 2.1.5) con un sistema di acquisizione dati costituito da un data logger (CR10X, Campbell, Logan, USA) e da sensori per la rilevazione della temperatura dell'aria esterna, della radiazione solare incidente sulla superficie verticale, della velocità e direzione del vento, della temperatura superficiale interna ed esterna della parete. I dati climatici sono stati registrati ogni 60 s dal data logger e memorizzati come valori medi ogni 15 minuti. La radiazione solare incidente sulla superficie verticale è stata misurata con un piranometro (modello 8-48, Eppley Laboratorio, Newport, RI, USA) nell'intervallo di lunghezze d'onda 0.3-3 μm. La temperatura dell'aria esterna è stata misurata con sonde Hygroclip-S3 (Rotronic, Zurigo, Svizzera) e le sonde sono state schermate dalla radiazione solare. Per misurare la velocità e la direzione del vento è stato utilizzato un sensore Young Wind Sentry 03002 (Wind Sentry 03002 Data Sheet, R. M. Young Company 1999). La velocità del vento è stata misurata da un anemometro con piccole pale rotanti che producono un segnale sinusoidale la cui frequenza è proporzionale alla velocità del vento. La direzione del vento è stata rilevata da una banderuola potenziometrica la cui resistenza è funzione dell'orientamento della banderuola. I campi di misura sono 0-50 m s^{-1} per la velocità del vento e 0-360° per la direzione del vento.

Su ogni parete verticale sono state misurate sin dall'inizio della prova la temperatura superficiale della parete sul lato esterno esposta alla radiazione solare e la temperatura superficiale della parete sul lato interno. Le temperature sono state misurate mediante termistori (Tecno.el s.r.l. Formello, Rome, Italy). I sensori sono stati opportunamente posizionati sulla superficie della parete.

Figura 2.1.5: Stazione meteorologica presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.

In riferimento al periodo temporale che intercorre dal 1 Settembre 2015 al 31 Agosto 2016 sono stati calcolati i valori medi mensili delle temperature massime (tabella 2.1.1) e minime (tabella 2.1.2)

giornaliere, nonché i valori medi mensili (tabella 2.1.3) dell'aria esterna e della superficie esterna dell'intonaco delle pareti coperte da *Rhyncospermum jasminoides* e *Pandorea jasminoides variegata* e del muro senza vegetazione usato come testimone. Sono stati calcolati anche i valori cumulativi mensili della radiazione solare normale alla parete (tabelle 2.1.1 - 2.1.3).

Analizzando i dati medi mensili riportati nella tabella 2.1.1, le temperature massime dell'intonaco esterno registrate per il muro privo di vegetazione sono risultate sempre maggiori nelle ore calde della giornata rispetto alle temperature dell'intonaco esterno registrate nelle stesse ore per i muri ricoperti da *Rhyncospermum jasminoides* e *Pandorea jasminoides variegata*. La presenza del verde, dunque, mitiga il quantitativo di radiazione solare assorbita dalle pareti e conseguentemente la temperatura dell'intonaco esterno delle pareti coperte dai rampicanti si riduce rispetto alla temperatura dell'intonaco della parete senza copertura verde. Le differenze tra le medie mensili delle temperature massime sono risultate dell'ordine di 4.8-5.6 °C nel periodo caldo e di 2.7-3.6 °C nel periodo freddo. Le due pareti verdi sono caratterizzate nelle ore calde della giornata da valori medi mensili delle temperature massime dell'intonaco esterno statisticamente simili (tabella 2.1.1).

La tabella 2.1.2 mostra che i valori medi mensili delle temperature minime dell'intonaco esterno registrate per il muro privo di vegetazione sono risultate sempre minori rispetto alle temperature minime dell'intonaco esterno registrate nelle stesse ore per le pareti verticali ricoperte da *Rhyncospermum jasminoides* e *Pandorea jasminoides variegata*. Nelle ore notturne le differenze tra le medie mensili delle temperature minime variano da 1.2 °C nel periodo estivo a 1.6 ° C nel periodo invernale per il muro coperto dal *Rhyncospermum jasminoides* e variano da 0.8 °C nel periodo estivo a 1.6 ° C nel periodo invernale in presenza *Pandorea jasminoides variegata*.

I valori medi mensili delle temperature dell'aria esterna e della superficie esterna dell'intonaco delle tre pareti esposte alla radiazione solare sono statisticamente simili, come si evince dalla tabella 2.1.3

L'andamento delle temperature giornaliere dell'aria esterna e della superficie esterna dell'intonaco delle tre pareti esposte alla radiazione solare sono rappresentate nella figura 2.1.6 per un mese freddo (Gennaio 2016) e nella figura 2.1.7 per un mese caldo (Luglio 2016). L'anno 2016, da un punto di vista termico, è stato caratterizzato da alcuni giorni invernali con caldo fuori stagione con temperature superiori alle medie stagionali (figura 2.1.6), e da alcuni giorni estivi caratterizzati da temperature inferiori alle medie stagionali (figura 2.1.7).

La figura 2.1.8 mostra le temperature della superficie esterna delle pareti verdi e della parete priva di vegetazione, la temperatura dell'aria esterna e la radiazione solare normale alla parete in una giornata estiva (17/09/2015). Durante il giorno la presenza della vegetazione mitiga la temperatura dell'intonaco esterno delle pareti, in confronto con la parete di controllo; con una temperatura dell'aria esterna massima è stata pari a 41.4 ° C, il verde ha favorito un decremento della temperatura pari a 6.4 °C in presenza di Rhyncospermum jasminoides e pari a 7.2 °C in presenza di Pandorea jasminoides variegate rispetto alla temperatura dell'intonaco esterno della parete priva di vegetazione.

La figura 2.1.9 mostra le temperature della superficie esterna delle pareti verdi e della parete priva di vegetazione, la temperatura dell'aria esterna e la radiazione solare normale alla parete in una giornata invernale (19/01/2016). La temperatura minima dell'aria esterna è stata pari a 2.2 ° C. Durante le ore più fredde, le ore notturne, la presenza della vegetazione davanti alla parete aumenta le prestazioni di isolamento delle pareti.

Tabella 2.1.1: Valori medi mensili delle temperature massime giornaliere dell'aria esterna e della superficie esterna dell'intonaco delle tre pareti esposte alla radiazione solare e radiazione solare cumulativa normale alla parete per il periodo che va da Settembre 2015 ad Agosto 2016.

	Settembre 2015	Ottobre 2015	Novembre 2015	Dicembre 2015	Gennaio 2016	Febbraio 2016	Marzo 2016	Aprile 2016	Maggio 2016	Giugno 2016	Luglio 2016	Agosto 2016
	Media della temperatura giornaliera massima [C°]											
Muro coperto con Rhyncospermum jasminoides	27.4^{b}	20.7^{b}	17.1^{b}	14.5^{c}	13.2^{b}	15.7^{c}	14.2^{b}	20.5^{b}	20.8^{c}	26.5^{b}	30.4^{c}	28.0^{c}
Muro coperto con Pandorea jasminoides variegated	27.7^{b}	21.2^{b}	17.2^{b}	14.8^{bc}	13.2^{b}	16.0^{bc}	15.2^{b}	21.4^{b}	21.8^{bc}	26.9^{b}	31.1^{c}	29.9^{b}
Muro senza vegetazione	32.2^{a}	24.2^{a}	20.5^{a}	18.1^{a}	15.9^{a}	18.8^{a}	17.2^{a}	24.7^{a}	23.9^{ab}	31.3^{a}	35.8^{a}	33.6^{a}
Aria Esterna	30.6^{a}	23.6^{a}	19.1^{ab}	15.9^{b}	14.7^{ab}	17.6^{ab}	17.1^{a}	24.2^{a}	24.5^{a}	30.3^{a}	33.3^{b}	30.7^{b}
	Radiazione solare mensile cumulata normale alla parete [MJ m^{-2}]											
	356.9	295.4	320.8	331.1	289.2	298.1	275.7	334.6	247.1	232.1	278.3	321.9

$^{a-c}$ Means in the same column with different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

Tabella 2.1.2: Valori medi mensili delle temperature minime giornaliere dell'aria esterna e della superficie esterna dell'intonaco delle tre pareti esposte alla radiazione solare e radiazione solare cumulativa normale alla parete per il periodo che va da Settembre 2015 ad Agosto 2016.

	Settembre 2015	Ottobre 2015	Novembre 2015	Dicembre 2015	Gennaio 2016	Febbraio 2016	Marzo 2016	Aprile 2016	Maggio 2016	Giugno 2016	Luglio 2016	Agosto 2016
	Media della temperatura giornaliera minima [C°]											
Muro coperto con Rhyncospermum jasminoides	18.6^{a}	14.3^{a}	9.7^{a}	7.2^{a}	6.4^{a}	8.8^{a}	7.7^{a}	11.6^{a}	13.4^{a}	18.2^{a}	21.4^{a}	20.0^{a}
Muro coperto con Pandorea jasminoides variegated	18.3^{a}	14.2^{a}	9.7^{a}	7.1^{a}	6.3^{a}	8.8^{a}	7.8^{a}	11.7^{a}	13.2^{ab}	17.6^{a}	21.0^{ab}	19.6^{ab}
Muro senza vegetazione	17.4^{a}	13.1^{a}	8.2^{b}	5.6^{b}	4.8^{a}	7.3^{a}	6.5^{b}	10.1^{b}	12.0^{b}	16.8^{a}	20.0^{b}	18.8^{b}
Aria Esterna	18.9^{a}	14.7^{a}	10.0^{a}	7.1^{a}	6.3^{a}	8.1^{a}	7.4^{ab}	11.1^{ab}	13.1^{ab}	17.7^{a}	21.0^{ab}	19.8^{a}
	Radiazione solare mensile cumulata normale alla parete [MJ m^{-2}]											
	356.9	295.4	320.8	331.1	289.2	298.1	275.7	334.6	247.1	232.1	278.3	321.9

$^{a-c}$ Means in the same column with different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

Tabella 2.1.3: Valori medi mensili delle temperature dell'aria esterna e della superficie esterna dell'intonaco delle tre pareti esposte alla radiazione solare e radiazione solare cumulativa normale alla parete per il periodo che va da Settembre 2015 ad Agosto 2016.

	Settembre 2015	Ottobre 2015	Novembre 2015	Dicembre 2015	Gennaio 2016	Febbraio 2016	Marzo 2016	Aprile 2016	Maggio 2016	Giugno 2016	Luglio 2016	Agosto 2016
	Media della temperatura giornaliera media [C°]											
Muro coperto con Rhyncospermum jasminoides	22.9[a]	17.3[a]	12.9[a]	10.0[a]	9.4[a]	12.2[a]	10.8[a]	16.0[a]	17.1[a]	22.5[b]	26.1[a]	24.2[a]
Muro coperto con Pandorea jasminoides variegated	22.8[a]	17.4[a]	12.9[a]	10.0[a]	9.3[a]	12.3[a]	11.1[a]	16.3[a]	17.5[a]	22.4[b]	26.0[a]	24.5[a]
Muro senza vegetazione	23.4[a]	17.4[a]	12.9[a]	10.0[a]	9.1[a]	12.1[a]	10.8[a]	16.2[a]	17.2[a]	23.1[ab]	26.8[a]	25.0[a]
Aria Esterna	24.1[a]	18.4[a]	13.8[a]	10.6[a]	10.1[a]	12.5[a]	11.6[a]	17.0[a]	18.7[a]	24.0[a]	27.3[a]	25.1[a]
	Radiazione solare mensile cumulata normale alla parete [MJ m^{-2}]											
	356.9	295.4	320.8	331.1	289.2	298.1	275.7	334.6	247.1	232.1	278.3	321.9

[a-c] Means in the same column with different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

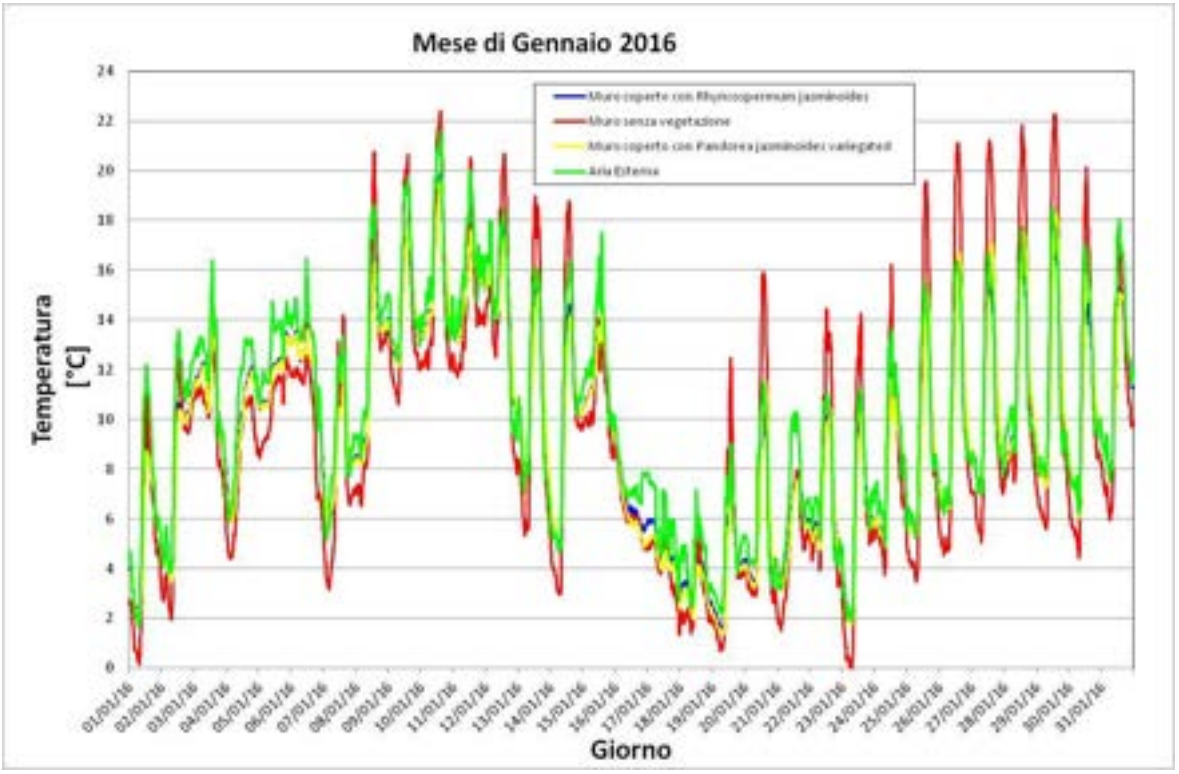


Figura 2.1.6: Diagramma delle temperature giornaliere dell'aria esterna e della superficie esterna dell'intonaco delle tre pareti esposte alla radiazione solare per il mese di Gennaio 2016.

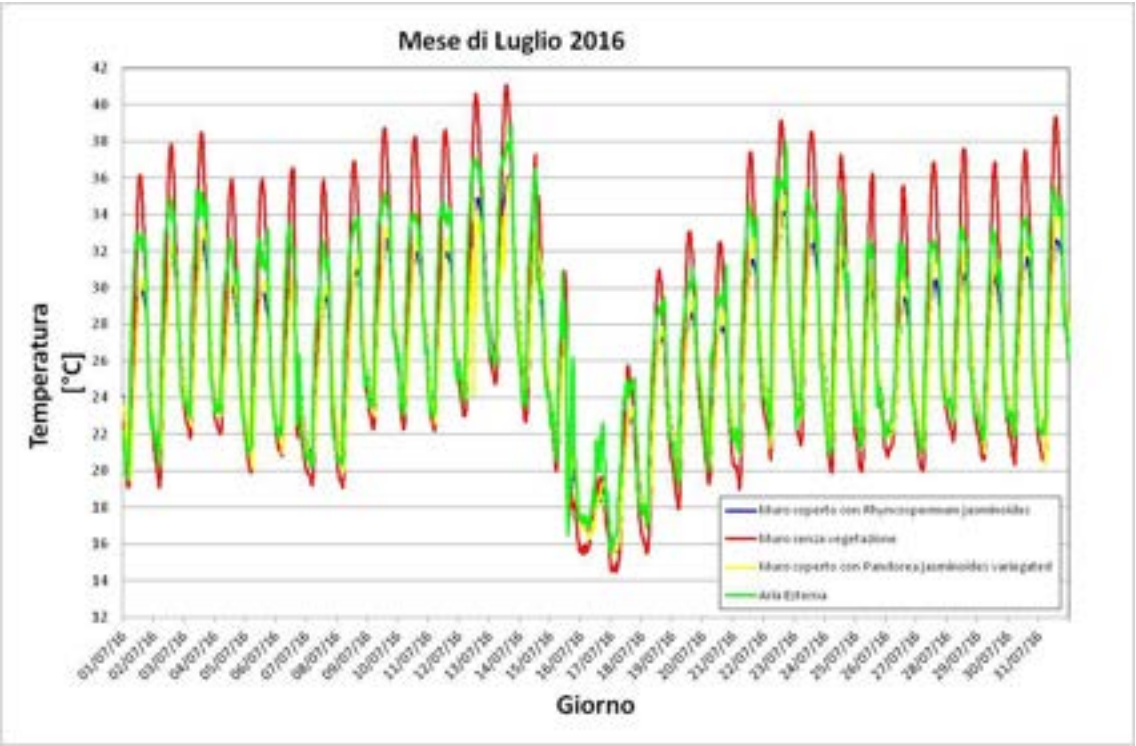


Figura 2.1.7: Diagramma delle temperature giornaliere dell'aria esterna e della superficie esterna dell'intonaco delle tre pareti esposte alla radiazione solare per il mese di Luglio 2016.

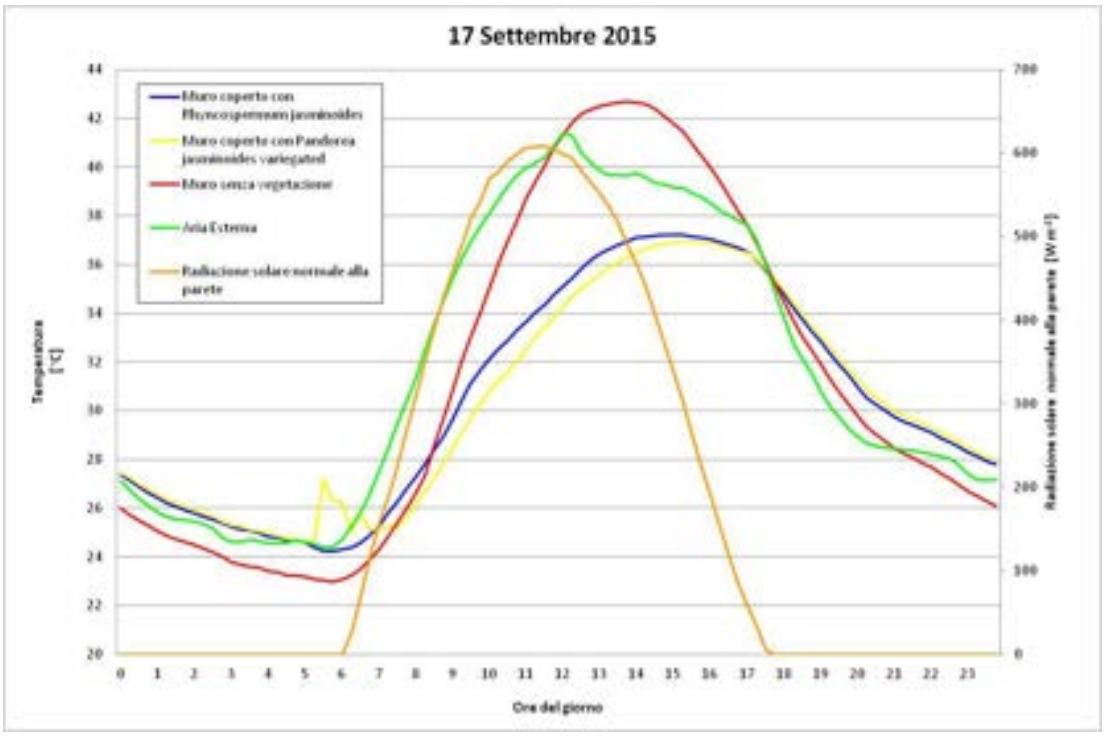


Figura 2.1.8: Diagramma delle temperature dell'aria esterna e della superficie esterna dell'intonaco delle tre pareti esposte alla radiazione solare e radiazione solare normale alla parete per un giorno caldo: 17 Settembre 2015.

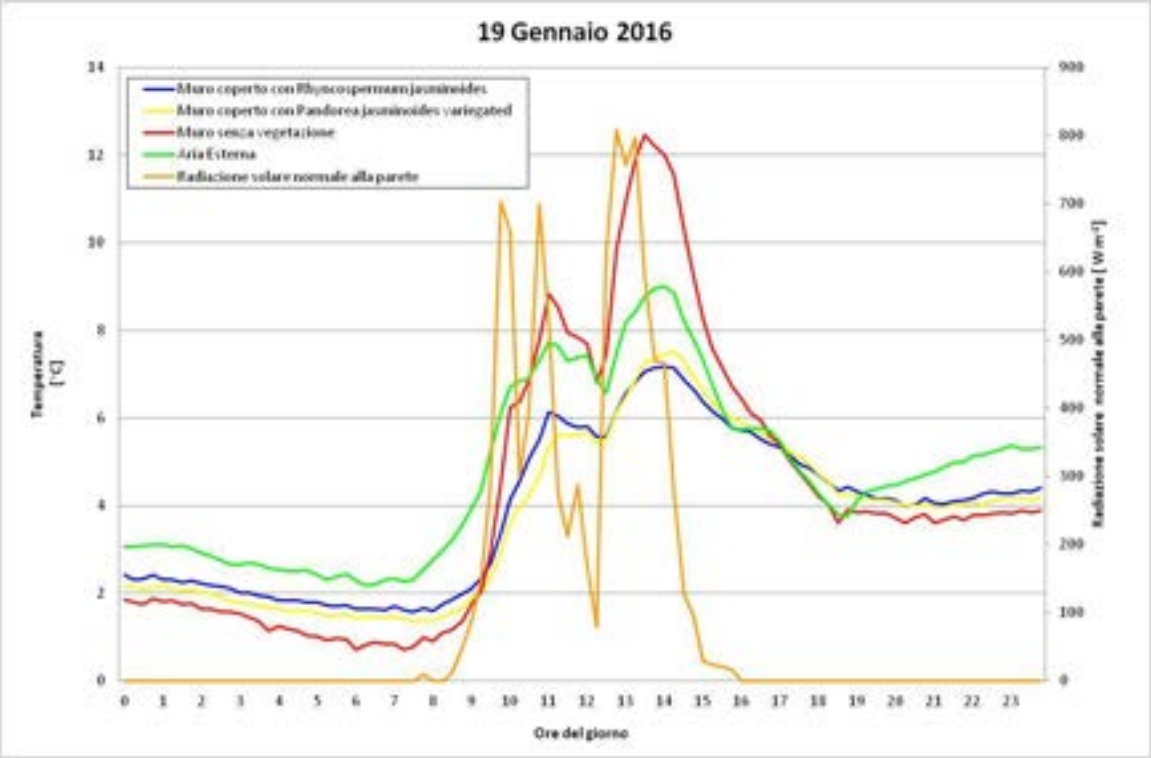


Figura 2.1.9: Diagramma delle temperature dell'aria esterna e della superficie esterna dell'intonaco delle tre pareti esposte alla radiazione solare e radiazione solare normale alla parete per un giorno freddo: 19 Gennaio 2016.

2.1.2 Analisi temperature con termocamera

Nell'ambito delle attività finanziate dal PAR 2014, il gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e Territoriali dell'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" ha svolto analisi termografiche utilizzando una termocamera, cioè ha misurato la temperatura delle foglie, dell'intonaco delle pareti coperte dalle essenze vegetali e dell'intonaco della parete senza alcuna copertura vegetale. La termografia è un metodo di misura delle temperature superficiali senza alcun contatto con il sensore.

La termocamera utilizzata è del tipo a raggi infrarossi, il modello è B660, FLIR Systems, (Burlington, ON, Canada). La termocamera FLIR B660 possiede un detector ad alta risoluzione da 640 x 480 pixels che consente una maggiore precisione ed ispezioni di piccoli dettagli a lunga distanza. La sensibilità termica è minore di 30 mK in modo da fornire i dettagli dell'immagine ed informazioni relative alle differenze di temperatura. La fotocamera è caratterizzata da alta qualità delle immagini, le immagini prodotte sono da 3.2 Megapixels. La termocamera è dotata di un sistema GPS integrato, che consente di localizzare l'esatta area geografica del luogo d'ispezione relativo all'immagine ad infrarossi.

Le misurazioni sono state effettuate impostando un valore medio di emissività pari a 0.95 per entrambe le pareti verdi, cioè per la parete coperta dalla Pandorea jasminoides variegata e dal Rhyncospermum jasminoides; l'intonaco bianco della parete non coperta dalle essenze vegetali è stata valutata con un valore di emissività pari a 0.96.

Le immagine termiche (Figure 2.1.10-2.1.13) mostrano la distribuzione della temperatura sulle pareti verdi, sulle foglie dell'essenza vegetale e sulla parete non coperta da vegetazione, utilizzata come testimone.

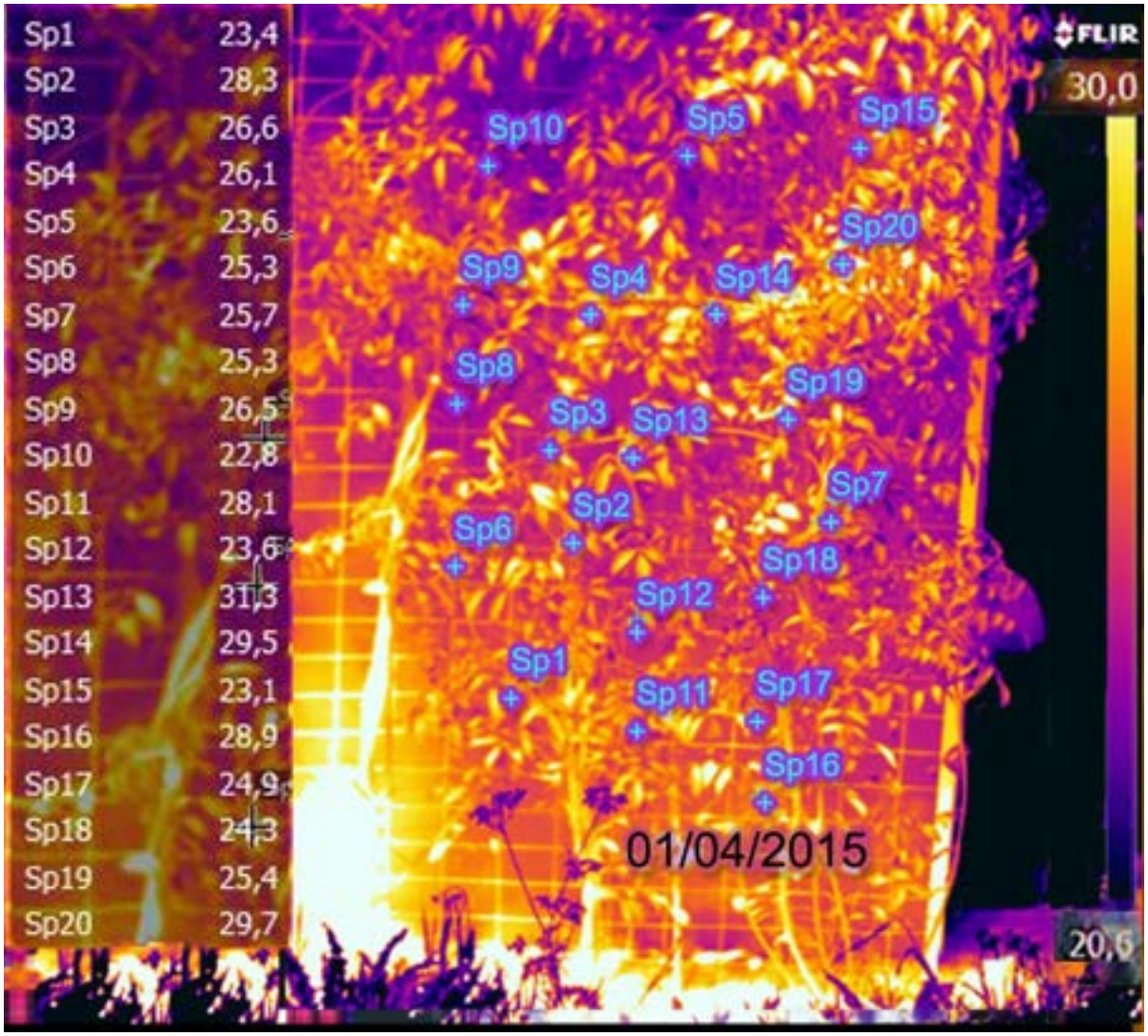


Figura 2.1.10: Immagine registrata con una termocamera del muro coperto con Pandorea jasminoides variegata; immagine registrata il giorno 1 Aprile 2015 alle ore 13.15.

La presenza delle pareti verdi in corrispondenza di un muro influenza le temperature superficiali dell'intonaco delle parete soprattutto nel periodo caldo, come si può notare dalle immagini registrate con la termocamera relative alle temperature dell'intonaco delle pareti verdi, delle foglie e dell'intonaco del testimone (Figura 2.1.10-2.1.13).

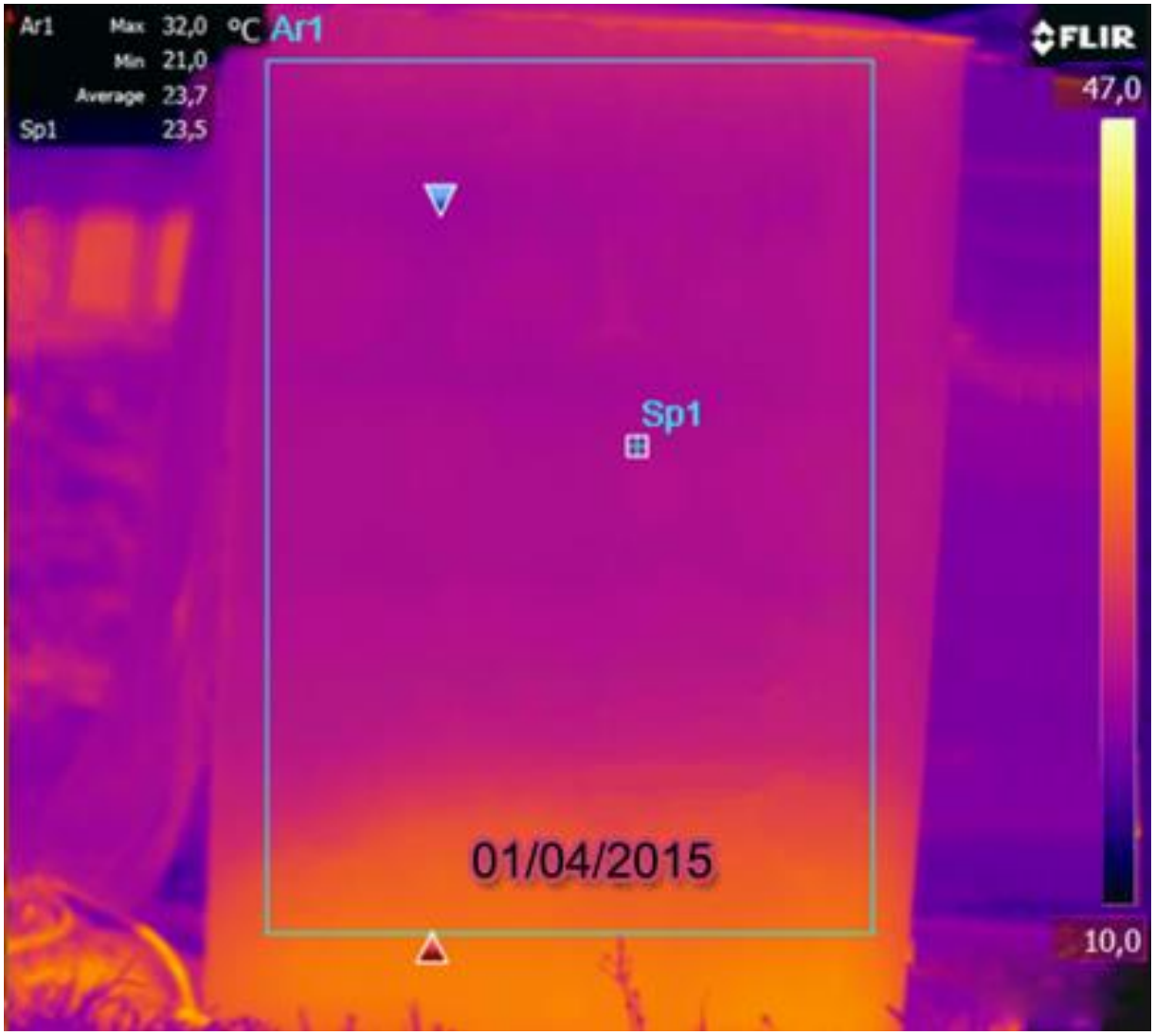


Figura 2.1.11: Immagine registrata con una termocamera della parete non coperta da verde usato come testimone; immagine registrata il giorno 1 Aprile 2015 alle ore 13.15.

Le figure 2.1.10 - 2.1.11 mostrano le temperature misurate il giorno 1 Aprile 2015; la temperatura delle foglie è stata influenzata dalla diversa esposizione alla radiazione solare, le foglie presentano una temperatura media pari a 26.1 ° C, mentre la temperatura dell'intonaco al di dietro della coltre verde è pari a 22.2 ° C; la temperatura media dell'intonaco della parete non coperta dalle essenze vegetali è pari a 23.7 ° C.

Le figure 2.1.12 - 2.1.13 mostrano le temperature misurate il giorno 7 Luglio 2015: la temperatura media delle piante è pari a 26.9 ° C, la temperatura dell'intonaco al di dietro delle piante è pari a 26.9 ° C, mentre la temperatura media dell'intonaco della parete non coperta dalle essenze vegetali è pari a 29.0 ° C.

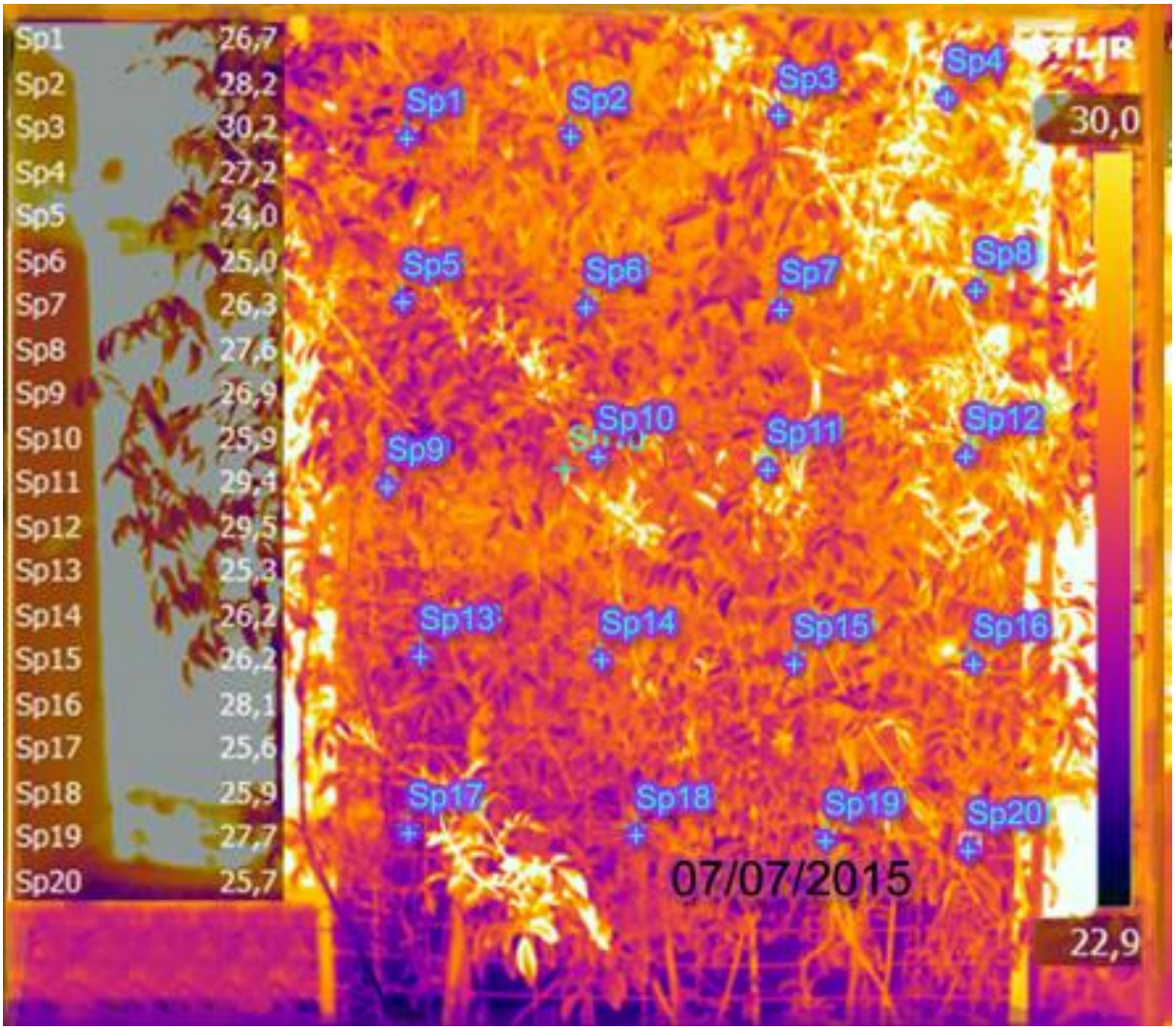


Figura 2.1.12: Immagine registrata con una termocamera del muro coperto con Pandorea jasminoides variegata; immagine registrata il giorno 7 Luglio 2015 alle ore 9.30.

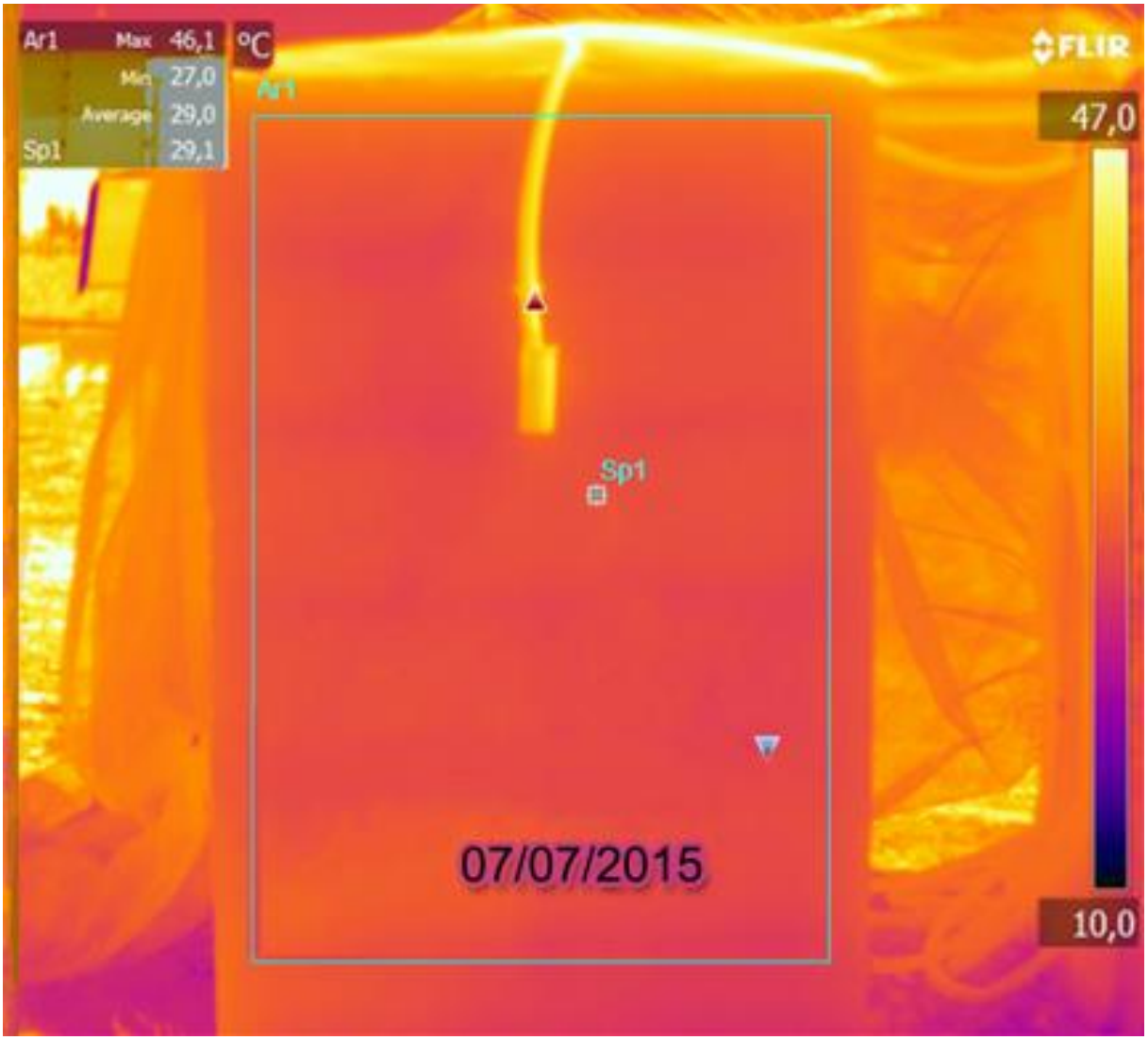


Figura 2.1.13: Immagine registrata con una termocamera della parete non coperta da verde usato come testimone; immagine registrata il giorno 7 Luglio 2015 alle ore 9.30.

2.2 *Studio del sistema di distribuzione del vettore di raffrescamento e individuazione delle specifiche funzionali atte a garantire il comfort microclimatico interno*

2.2.1 L'impianto sperimentale presso l'Università d Bari

Nell'ambito delle attività del progetto "Diffusion of Cooling and Refreshing Technologies using the Solar Energy Resource in the Adriatic Regions (Adriacold)", finanziato dalla Commissione Europea (IPA Adriatic Cross Border Cooperation Programme), l'ENEA ha realizzato un prototipo dimostrativo per il raffrescamento estivo basato su impianto di solar cooling a servizio di una serra presso il centro didattico sperimentale "Martucci" dell'Università di Bari, sito in Valenzano (Bari), latitudine 41 °, 1 ', 12'', longitudine 16 °, 54', 16 '', altitudine 85 m s.l.m. (Figure 2.2.1).

Questo impianto è stato testato e ottimizzato nell'ambito delle attività del PAR 2015.

La serra, orientata nord-sud con una superficie coperta di 300 m^2, è caratterizzata dalla lunghezza pari a 30 m, larghezza pari a 10 m, altezza al colmo pari a 4.45 m e altezza alla gronda pari a 2.45

m (Figura2.2.2). Il film di copertura della serra è un film PATILUX D/AG (P.A.T.I. SPA, San Zenone degli Ezzelini, Treviso), film in Etilene-Vinil-Acetato (EVA), con spessore pari a 0.200 mm. È un film diffusivo (D) a lunga durata (dai 3 ai 5 anni) con additivo antigoccia (AG), cioè evita l'appannamento e la formazione di gocce. La base della serra e le testate a sud e a nord sono realizzate in plastica rigida in policarbonato (PC).

Figura 2.2.1: Vista dall'alto del centro didattico sperimentale "Martucci" dell'Università di Bari in Valenzano (Bari) (Google Earth high resolution image).

La struttura portante modulare è realizzata in acciaio zincato tubolare, il passo delle colonne è pari a 2 m; sono presenti 4 controventi (2 nel lato Est della serra e 2 nel lato Ovest). I 32 pilastri hanno diametro pari a 60 mm.

Figura 2.2.2: Serra sperimentale presso il centro didattico sperimentale “Martucci” dell’Università di Bari in Valenzano (Bari).

La serra è una serra per coltivazione fuori suolo. Su tutto il pavimento in terreno compattato è posizionato un telo pacciamante bianco (COVERTEX, TENAX SPA, Viganò (LC)), caratterizzato da densità 105 g/m2 (Figura 2.2.3). Il telo pacciamante bianco, realizzato in polipropilene di alta qualità, è molto resistente agli agenti biologici ed è indicato per le colture fuori suolo riflettendo in misura notevole le radiazioni solari, trasmette radiazione solare alle colture poste sul telo ed impedisce il surriscaldamento del terreno.

I vasi rettangolari a cassetta utilizzati per coltivare fuori suolo sono in Polipropilene (PP) (Euro3plast SPA, Ponte di Barbarano (VI)) e hanno dimensione pari a 1 m x 0.46 m x 0.4 m (Figura 2.2.3). La distanza tra le linee dei vasi è pari a 1.50 m. I vasi sono poggiati su una struttura in ferro lunga 6 m e larga 25 cm, realizzata utilizzando 3 barre in ferro a sezione cava (2 cm x 3 cm) unite tra di loro tramite 5 piedritti, ognuno largo 50 cm e alto 25 cm.

All’interno della serra è presente uno schermo termico mobile, realizzato in HDPE alluminato (ALUMINET IC60; GINEGAR Ltd, Kibbutz Ginegar, Israel.) con spessore 0.1 mm (Figura 2.2.4). Lo schermo termico è comandato automaticamente e rimane in opera durante la notte in inverno per diminuire le perdite di calore per irraggiamento e per conduzione e convezione. Questo schermo è usato in estate, quando serve, come rete ombreggiante per limitare l’eccesso di radiazione solare.

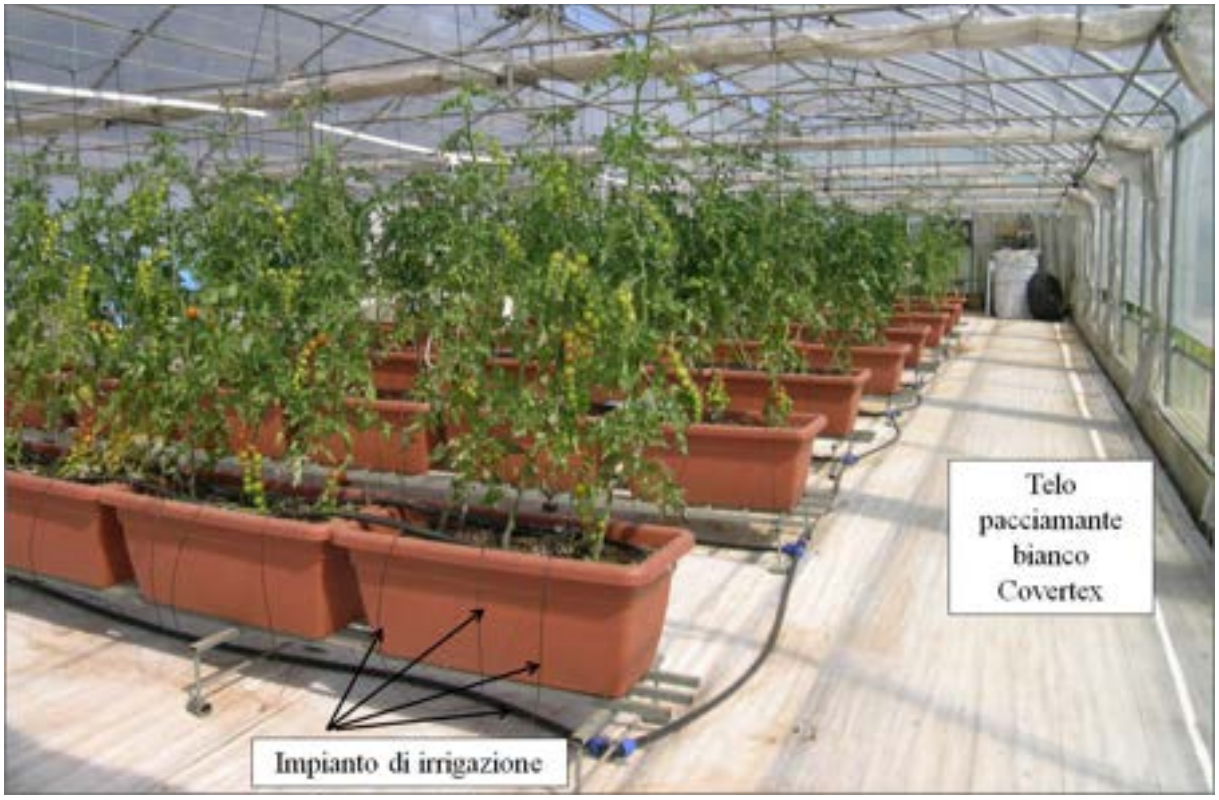


Figura 2.2.3: Interno della serra sperimentale presso il centro didattico sperimentale “Martucci” dell’Università di Bari in Valenzano (Bari).

Figura 2.2.4: Schermo termico mobile all’Interno della serra sperimentale presso il centro didattico sperimentale “Martucci” dell’Università di Bari in Valenzano (Bari).

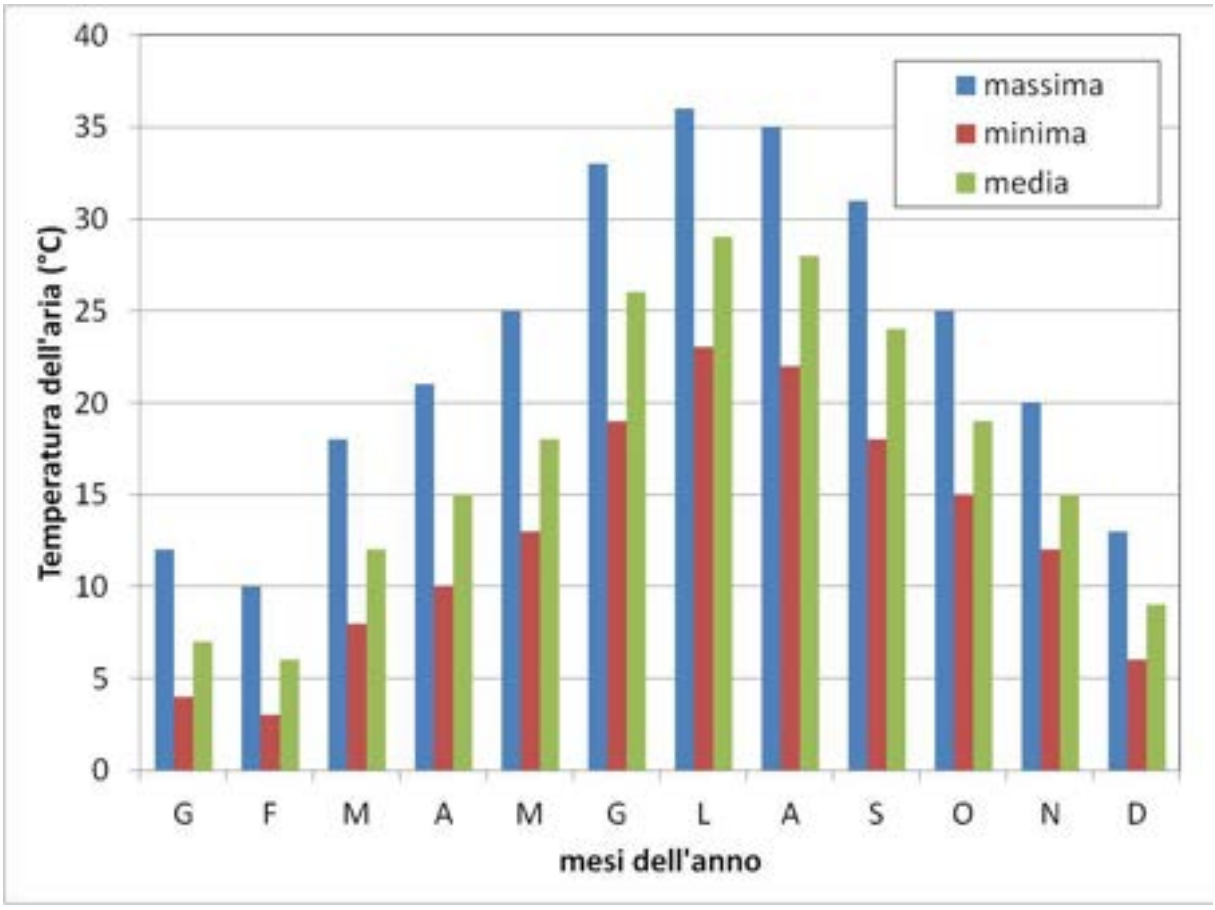
I dati climatici registrati presso il centro didattico sperimentale “Martucci” dell’Università di Bari in Valenzano sono riportati nella Tabella 2.2.1 e negli Istogrammi 2.2.1-2.2.3.

In tabella 2.2.1 sono riportati il valore medio annuale della temperatura dell’aria e dell’umidità relativa, medie calcolate sui valori registrati nel periodo 2009-2015.

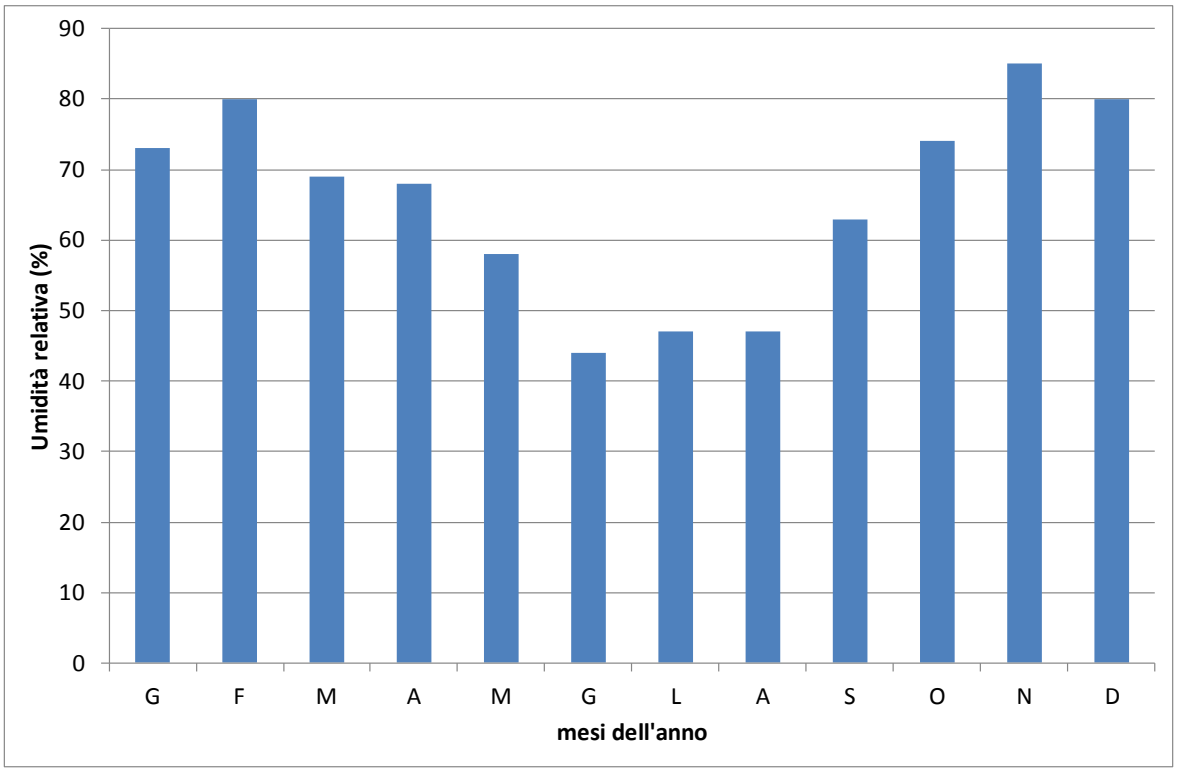
Gli istogrammi presentano i valori medi mensili delle temperature giornaliere massime, minime e medie dell'aria esterna (Istogramma 2.2.1), i valori medi mensili dell’umidità relativa dell'aria esterna (Istogramma 2.2.2) e i valori cumulati mensili della radiazione solare incidente su una superficie orizzontale (Istogramma 2.2.3.).

Tabella 2.2.1: Dati climatici registrati presso il campo sperimentale dell’Università di Bari, Valenzano (Bari).

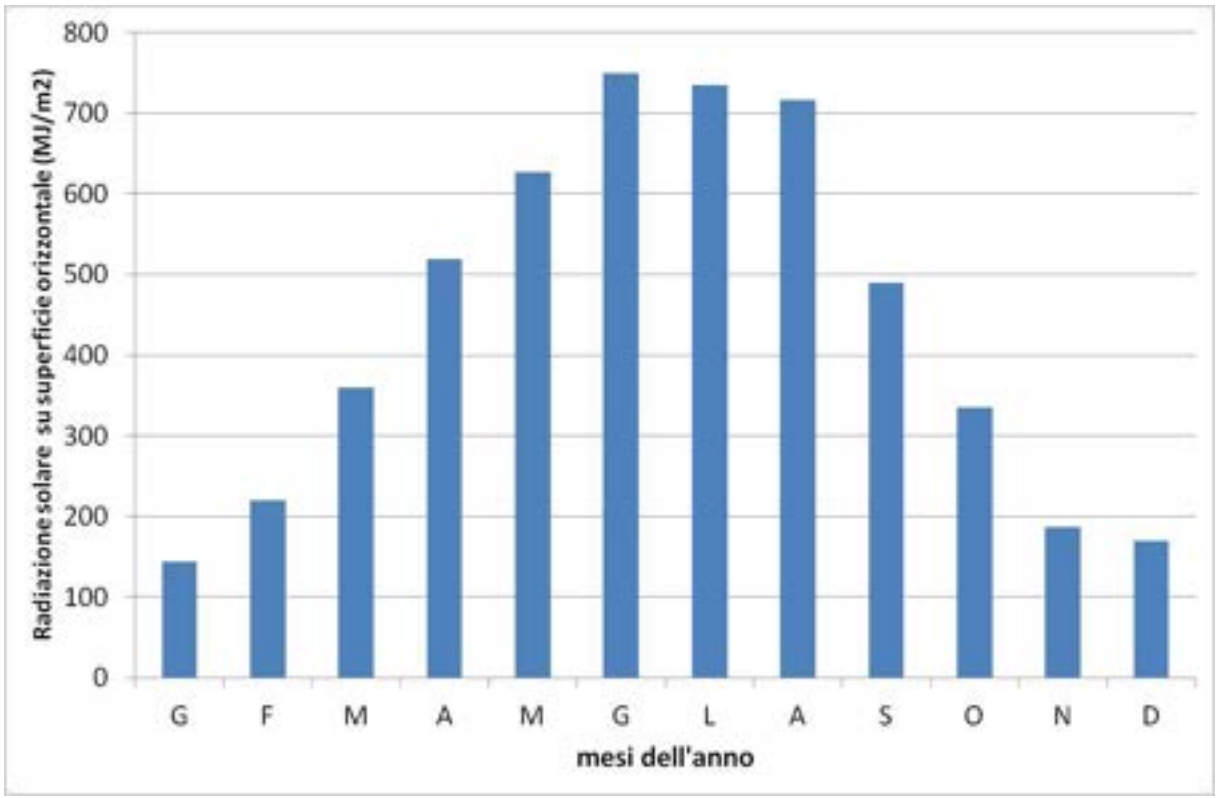
media annuale della temperatura dell’aria	17.4°C
media annuale dell’umidità relativa dell’aria	69.4 %



Istogramma 2.2.1. Valori medi mensili delle temperature massime giornaliere dell'aria esterna, delle temperature minime giornaliere dell'aria esterna e delle temperature medie giornaliere dell’aria esterna misurate presso il campo sperimentale in Valenzano (Bari).



Istogramma 2.2.2. Valori medi mensili dell'umidità relativa dell'aria esterna presso il campo sperimentale in Valenzano (Bari).



Istogramma 2.2.3. Valori cumulati mensili della radiazione solare incidente su una superficie orizzontale presso il campo sperimentale in Valenzano (Bari).

L'impianto di Solar Cooling realizzato è schematizzato nelle figure 2.2.5 -2.2.10.

La tecnologia solar cooling si basa sulla produzione di acqua calda, mediante pannelli solari termici con tubi sottovuoto ad alto rendimento, per azionare una macchina frigorifera ad alimentazione termica, denominata Chiller ad Assorbimento, capace di erogare acqua refrigerata nel normale campo di temperature previste da queste applicazioni (7-12 °C).

Il vantaggio di questo tipo di impianti consiste nell'utilizzare una fonte energetica gratuita e rinnovabile e di avere la capacità di produrre tanto più freddo al crescere dell'irraggiamento solare.

Il campo solare (C SOL) (Figura 2.2.5) è realizzato con 50 m^2 di collettori solari SKY PRO 1800 (Kloben - Turco Group Srl, Bovolone (VR)) sottovuoto in vetro borosilicato a doppia intercapedine (Figura 2.2.6), saldati all'estremità, al cui interno è provocato il vuoto, con intercapedine interna resa selettiva per mezzo di verniciatura metallica speciale multistrato tipo ''CERMET" e dotati delle seguenti caratteristiche tecniche :

- Rendimento (η_0) > 70,00%;
- Coefficiente di perdita termica (a_1) ≤ 1,052 W $m^{-2}K^{-1}$;
- Coefficiente di perdita termica (a_2) ≤ 0,004 $Wm^{-2}K^{-2}$;
- Pressione massima d'esercizio: 6,0 bar;
- Portata ottimale: 0.001 $m^3 min^{-1} m^{-2}$.

I collettori solari sono inseriti all'interno di un telaio metallico, in profilato di adeguato spessore in alluminio elettrocolorato, come previsto dalle normative per una resistenza alla corrosione in nebbia salina. I collettori solari sono certificati in conformità alle normative EN 12975-1:2006 e EN 12975-2:2006.

La macchina frigorifera ad alimentazione termica, denominata Chiller ad Assorbimento (Figure 2.2.7-2.2.8), è una macchina ad assorbimento monoblocco ad acqua calda di potenza frigorifera pari a 23 kW con acqua di alimentazione a 83 - 88 °C, controllo refrigerazione modulante tramite Inverter, attacchi a circuiti idraulici DN 50. Il Chiller ad Assorbimento è una macchina Yazaki WFC-SC 5, con le caratteristiche tecniche indicate in Tabella 2.2.2. Il fluido di lavoro impiegato è costituito da una miscela di acqua e bromuro di litio, che opera sottovuoto durante l'intero ciclo. La miscela non è pericolosa, è atossica ed inodore. Il gruppo non impiega i CFC (clorofluorocarburi) e i HCFC (idroclorofluorocarburi) dannosi per l'ambiente. Il gruppo è perfettamente insonorizzato, estremamente silenzioso e privo di vibrazioni. La macchina è all'interno di un armadio impermeabile essendo installata all'esterno.

Il sistema di accumulo termico è costituito da due serbatoi (Figure 2.2.7-2.2.8): un serbatoio di accumulo di acqua calda in acciaio, con isolamento in poliuretano esente da CFC ed HCFC, del volume complessivo di 2000 litri e un serbatoio di accumulo di acqua refrigerata in acciaio, con isolamento in poliuretano esente da CFC ed HCFC, del volume di 500 litri.

Tabella 2.2.2: Specifiche tecniche del Chiller ad Assorbimento Yazaki WFC-SC 5.

Potenza frigorifera				kW	17,6
Acqua refrigerata	Temperatura		Ingresso	° C	12,5
			Uscita	° C	7
	Perdite di carico			kPa	52.6
	Pressione massima di lavoro			kPa	588
	Portata nominale			l/s	0.77
	Volume serpentine			l/s	8
Acqua raffreddamento	Potenza dissipata			kW	42,7
	Temperatura		Ingresso	° C	31
			Uscita	° C	35
	Perdite di carico			kPa	38.3
	Fattore di sporcamento			M2hr°K/kW	0.086
	Pressione massima di lavoro			kPa	588
	Portata nominale			l/s	2.55
	Volume serpentine			l/s	37
Acqua calda	Potenza assorbita			kW	25,1
	Temperatura	Ingresso		° C	88
		Uscita		° C	83
		Intervallo alimentazione		° C	Min. 70 – Max 95
	Perdite di carico			kPa	95.8
	Pressione massima di lavoro			kPa	588
	Portata nominale			l/s	1.2
	Volume serpentine			l/s	10
Dimensioni	Larghezza			mm	594
	Profondità			mm	744
	Altezza			mm	1786
Peso	A vuoto			kg	365
	In esercizio			kg	420
Rumorosità	Livello sonoro dB(A) a 1 metro				46
Alimentazione elettrica	Alimentazione elettrica				220V 1 fase 50 Hz
	Potenza			W	48
	Intensità corrente			A	0.22
Controllo	Refrigerazione				ON - OFF
Diametro tubazioni	Circuito acqua refrigerata			mm	DN 32
	Circuito acqua di raffreddamento			mm	DN 40
	Circuito acqua calda			mm	DN 40

Figura 2.2.5: Impianto di solar cooling presso il centro l'Università di Bari.

Figura 2.2.6: Collettori solari dell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

Figura 2.2.7:Macchine dell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

Figura 2.2.8: Particolare delle macchine dell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

L'impianto è costituito da un sottoimpianto solare e da un sottoimpianto frigorifero (Figura 2.2.9-2.2.10). Il sottoimpianto solare (figura 2.2.9) è costituito principalmente dal campo solare (C SOL), dal serbatoio di accumulo termico (ACC), dall'aerotermo di smaltimento (AER), dalla pompa P1 e da una centralina solare. Il sottoimpianto solare serve a produrre l'acqua calda alla temperatura di utilizzo: la centralina solare confronta la temperatura del fondo del serbatoio di accumulo termico con quella in uscita dal campo solare e varia la velocità della pompa P1 in modo da mantenere un determinato salto di temperatura. In caso di eccessiva temperatura in uscita dal campo solare (T>95°C) la stessa centralina commuta la portata di acqua calda verso l'aerotermo di smaltimento mediante una valvola a tre vie a comando elettrico. Una terza sonda di temperatura, tipicamente posta sulla tubazione di ingresso al campo solare, viene utilizzata per attivare la pompa P1 in caso di rischio gelo (T<5°C) in assenza di idoneo liquido antigelo.

Il sottoimpianto frigorifero è composto dal chiller ad assorbimento (ASS), dalla torre evaporativa (TE), dal serbatoio per l'accumulo di acqua fredda (ACF) e dalle pompe P2, P3, P4 e P5. L'acqua calda dal serbatoio di accumulo termico viene inviata tramite la pompa P2 al chiller ad assorbimento, l'acqua fredda prodotta viene mandata tramite la pompa P4 al serbatoio per l'accumulo di acqua fredda e da qui, su richiesta, al sistema di distribuzione in serra tramite la pompa P5.

Nel suo funzionamento il chiller ad assorbimento produce una corrente di acqua a temperature fra 30 e 40 °C che, tramite la pompa P3, viene mandata alla torre evaporativa per il raffreddamento. La torre evaporativa per il suo funzionamento e per il mantenimento di una concentrazione salina adeguata nella vasca di raccolta, consuma acqua potabile in ragione di circa 3 l/min. Una centralina di comando incorporata nel chiller ad assorbimento si incarica di regolare l'accensione e lo spegnimento delle pompe P2, P3 e P4 e del ventilatore della torre evaporativa, per ottenere un funzionamento ottimale. Tubazioni, coibentazioni, strumenti di misura e di monitoraggio, valvole di intercettazione e di sicurezza, sfiati e reintegri, quadro elettrico generale completano l' impianto nel suo complesso.

Nella figura 2.2.11 sono indicate le diverse linee di adduzione dell'acqua utilizzate nella serra e dal sistema solar cooling. La linea di adduzione dell'acqua d'irrigazione è costituita da una pompa di 0.74 kW e da 10 serbatoi cilindrici di accumulo di acqua, con piedi di appoggio e realizzati in polietilene ad alta densità (HDPE), ognuno di 1000 litri. L'acqua prelevata da un pozzo, arriva ai serbatoi e tramite la pompa viene trasferita alla serra mediante tubi in plastica in polietilene a bassa densità (LDPE) di colore nero e diametro pari a 1''. La tubazione all'esterno della serra ha una lunghezza di circa 10 m. All'interno della serra, l'acqua viene distribuita mediante tubi, in LDPE nero di diametro 1'', e mediante spaghetti. Gli spaghetti, ciascuno posizionato in corrispondenza di ogni pianta, sono caratterizzati da una lunghezza pari a 80 cm e un diametro pari a 7 mm.

Nel sistema solar cooling, la linea di adduzione dell'acqua che va dai serbatoi di accumulo alla torre evaporativa è una linea mista: dalla pompa fino alla serra si usa un tubo di plastica in LDPE nero, di diametro 1'' e lungo 25 m; dall'interno della serra fino alla torre evaporativa l'acqua percorre tubi in acciaio zincato di diametro 1/2" per una lunghezza di 25 m.

Nell'ambito del PAR 2015 il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha implementato il sistema solar cooling realizzando la linea principale di adduzione dell'acqua fredda per il raffrescamento delle piante (figura 2.2.12). L'acqua fredda proveniente dal sistema di assorbimento viene distribuita all'interno della serra con tubi in acciaio zincato di diametro pari a 3/4", per una lunghezza totale pari a circa 120 m. La linea principale di adduzione dell'acqua fredda alimenta 2 linee di raffreddamento disposte in modo da raffreddare 2 linee di coltivazione composte da sei vasi ciascuna. Ogni linea di adduzione di acqua fredda è costituita dagli elementi elencati in figura 2.2.13.

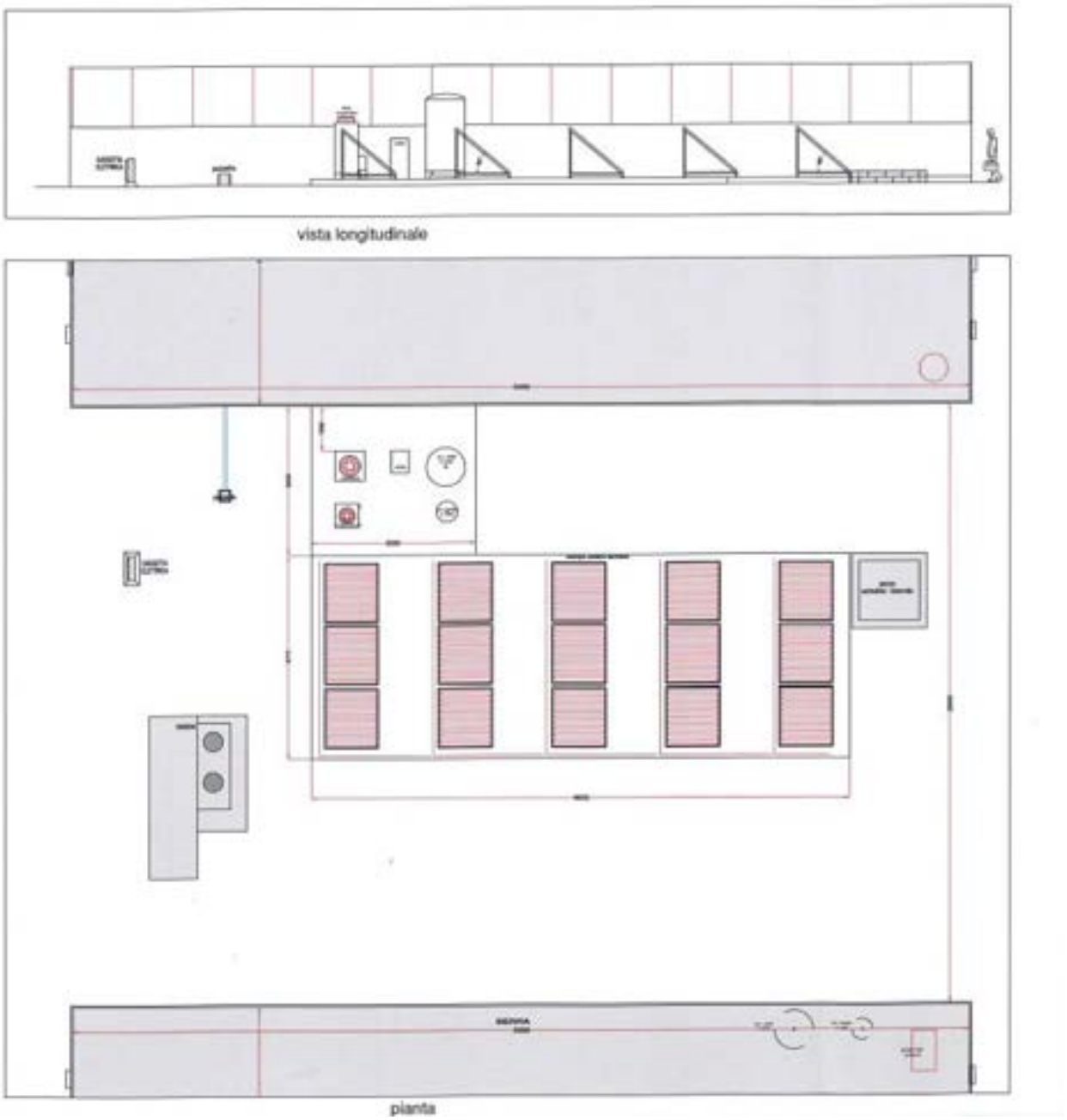


Figura 2.2.9 (A): Layout dell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

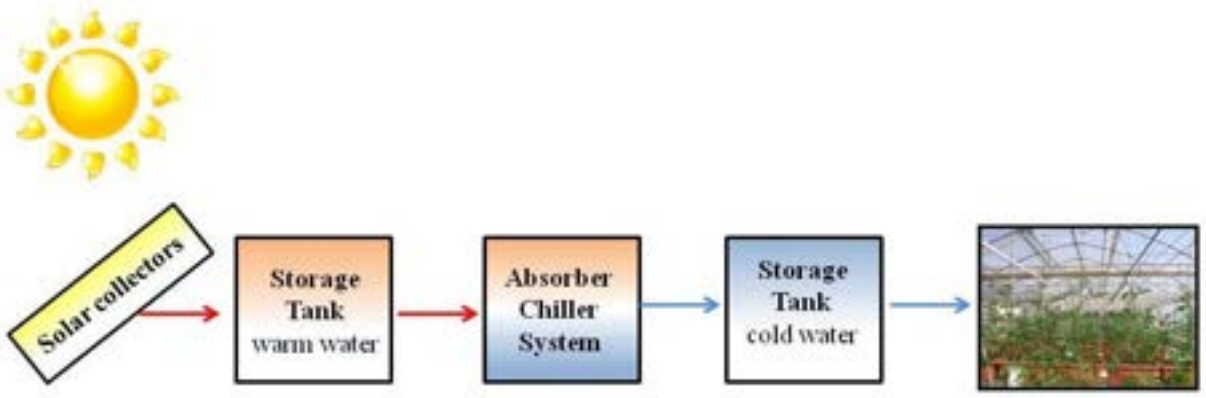


Figura 2.2.9 (B): Layout dell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

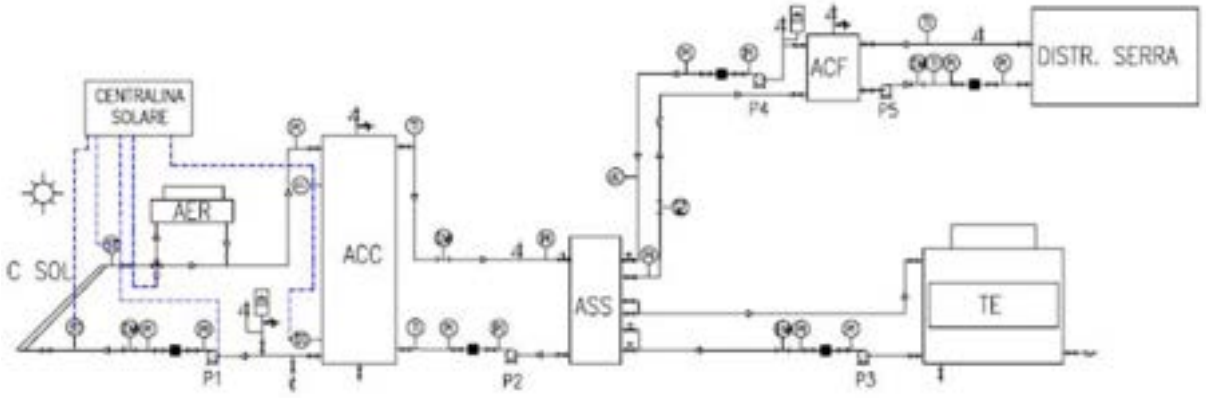


Figura 2.2.10: Schema impianto di solar cooling presso l'Università di Bari; C SOL: campo solare; ASS: chiller ad assorbimento; ACC: serbatoio di accumulo caldo; ACF: serbatoio di accumulo freddo; TE: torre evaporativa: AER: aerotermo; Pi: Manometro; Ti: termometro; EM: Energy meter.

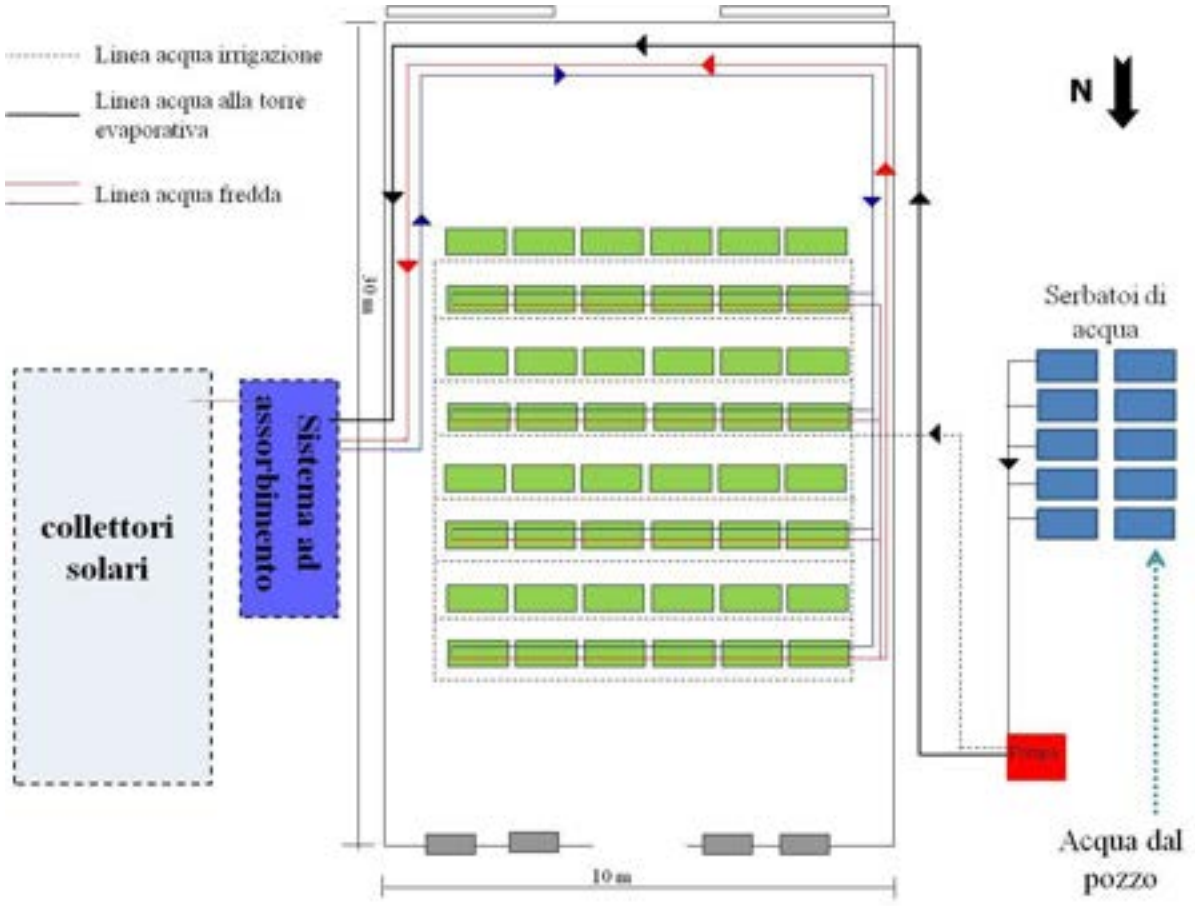


Figura 2.2.11: Schema della distribuzione dell'acqua fredda nell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

Figura 2.2.12: Linea di adduzione acqua fredda.

Durante i primi test di funzionamento dell'impianto di solar cooling sono emerse alcune problematiche quale il blocco dell'impianto a causa delle presenza di sedimenti nell'acqua di alimentazione. I sedimenti nell'acqua rallentano il fluire dell'acqua fra la torre evaporativa (Figura 2.2.14) ed il chiller ad assorbimento (Figura 2.2.15), e questo comporta un mal funzionamento o blocco della macchina. Nel corso del PAR 2015 il gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT ha provato varie soluzioni fino a trovarne una per garantire il funzionamento continuo dell'impianto di solar cooling indipendentemente dalla qualità dell'acqua di alimentazione. Periodicamente è stata effettuata la pulizia dei filtri dell'acqua di mandata e di ritorno fra il chiller ad assorbimento e la torre evaporativa. In considerazione della riscontrata necessità di pulizia quasi quotidiana dei filtri si è cercato di ovviare con un additivo in grado di agire sulla qualità dell'acqua circolante. Nell'acqua circolante tra la torre evaporativa e il chiller ad assorbimento è stato aggiunto un prodotto (Cillit-CC 300 UNI) antiincrostante, anticorrosivo e antialghe idoneo per i circuiti di raffreddamento; il prodotto è aggiunto nella vasca di raccolta della torre evaporativa che viene addizionata con l'acqua proveniente dal pozzo aziendale. Il prodotto è biodegradabile ed è stato scelto per le sue caratteristiche, infatti protegge i circuiti di raffreddamento alimentati con acqua di scarsa qualità dalle incrostazioni calcaree, dalle corrosioni e dallo sviluppo di batteri, alghe, lieviti e muffe. Inoltre risana gradualmente impianti già oggetto di incrostazioni, corrosioni o crescite biologiche. È un prodotto idoneo al contatto con tutti i metalli, compresi rame, alluminio e leghe leggere.

n. 40 pezzi di TES ZINCATO FIG.130 1/2"
(raccordo zincato)

n. 30 pezzi di Gomito zincato 090 1/2"

n. 40 pezzi di Niples 280 1/2"
(raccorderia zincata filettata in acciaio)

n. 16 pezzi di prolunga ottone MF ½" x 30 mm

n. 4 portasensori per la misura della temperatura, attacco 1/2", cm 10

n. 4 pezzi di Raccordo Croce fig.180 ½"

n. 40 pezzi di valvola Vienna F/F ½" Farfalla

n. 30 pezzi di Bocchettone svitabile in ottone Maschio e Femmina. Completo di O-Ring , ½"

40 m di Tubi zincati senza saldatura ½"

Figura 2.2.13: Elementi che costituiscono una linea di adduzione acqua fredda nella zona di coltivazione

Figura 2.2.14: Torre evaporativa dell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

Figura 2.2.15: Chiller ad assorbimento (Yazaki WFC-SC 5) dell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

La Tabella 2.2.3 indica con che frequenza è stato effettuato il trattamento dell'acqua e la percentuale di impurità presenti nei filtri, avendo indicato con A il filtro in alto della torre evaporativa, i.e. il filtro in corrispondenza dell'acqua che scorre dal chiller ad assorbimento verso la torre evaporativa, e con B il filtro presente in basso della torre evaporativa, i.e. il filtro relativo all'acqua che scorre dalla torre evaporativa al chiller ad assorbimento. È stata effettuata anche periodicamente la pulizia dei filtri di adduzione dell'acqua ai 10 serbatoi cilindrici di accumulo; un ulteriore filtro è stato aggiunto nel punto di presa dell'acqua presso la vasca di prima raccolta dell'acqua del pozzo.

Il 5 Agosto 2016 è stato inserito un nuovo filtro in corrispondenza del pescaggio dell'acqua della torre evaporativa, che ha migliorato il funzionamento continuo dell'impianto di solar cooling, evitando l'intasamento dei filtri fra la torre evaporativa e il chiller ad assorbimento.

I primi riscontri sperimentali sulla qualità dell'acqua suggeriscono la realizzazione di analisi chimiche sulla qualità dell'acqua ottenuta dal pozzo aziendale, in modo da automatizzare la correzione della qualità dell'acqua mediante un addolcitore appositamente progettato.

Tabella 2.2.3. Interventi di pulizia dei filtri presenti nella Torre evaporativa nel periodo 14 Luglio -24 Agosto 2016 con indicazione della percentuale di impurità nei filtri; A: filtro alto da chiller chiller ad assorbimento verso torre evaporativa; B: filtro basso da torre evaporativa a chiller ad assorbimento

Data intervento	Presenza impurità sui filtri (%) fra torre evaporativa e chiller ad assorbimento	Additivo Cillit-CC 300 UNI	Spurgo acqua
14/07/2016	A: 5%; B: 50%	200 ml	SI
20/07/2016	A: 1%;B: 5%	100 ml	SI
22/07/2016	A: 4%; B: 45%	-	-
25/07/2016	A: 8%; B: 40%	-	-
28/07/2016	A: 5%; B: 50%	100 ml	SI
01/08/2016	A: 4%; B: 40%	-	-
03/08/2016	A: 3%; B: 40%	100 ml	SI
05/08/2016	A: 2%; B: 30%	-	-
08/08/2016	A: 1%;B: 5%	50 ml	SI
10/08/2016	A: 0%; B: 5%	-	-
16/08/2016	A: 1%;B: 30%	50 ml	SI
20/08/2016	A: 7%; B: 40%	50 ml	SI
24/08/2016	A: 0%;B: 5%	50 ml	SI
30/08/2016	A: 2%;B: 4%	50 ml	SI

Le attività svolte dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari sono indirizzate al completamento dell'impianto di solar cooling nella parte di raffreddamento in serra e all'ottimizzazione delle diverse componenti del sistema nelle condizioni di funzionamento al fine di incrementarne l'efficienza

energetica complessiva. E' stato inoltre preparato il Documento Unico per la Valutazione dei Rischi da Interferenza – DUVRI.

2.2.2 Il modello di simulazione

Nell'ambito del PAR 2015 è stato realizzato un sistema per la simulazione dei profili di carico e delle potenze dell'impianto di solar cooling utilizzato per il raffrescamento della serra nel periodo estivo.

Il modello di simulazione è stato sviluppato in Matlab-Simulink. Questo software consente l'utilizzo di vari tipi di elementi (blocchi) al fine di creare modelli per la simulazione di un sistema dinamico; ovvero un sistema che può essere rappresentato da un modello di equazioni differenziali o differenza cui variabile indipendente è il tempo. L'interfaccia Simulink permette di collocare i blocchi, specificare i parametri di impostazione e di interconnessione tra blocchi multipli per costruire modelli di sistemi sempre più complessi. Il modello elabora le variabili secondo l'approccio modulare sequenziale in modo che i dati di uscita di una componente sono utilizzati come input per il componente successivo. Per avviare la simulazione, l'utente deve specificare un passo temporale, un tempo di inizio, un tempo finale e un metodo di integrazione. I valori dei segnali vengono aggiornati durante la simulazione ad ogni step temporale tra il momento di start e il momento di stop. Il modello dell'impianto di solar cooling in oggetto è stato sviluppato collegando i vari componenti (collettori solari, accumulo, assorbitore, ecc) che a loro volta sono stati creati sulla base delle equazioni fisiche relative al loro funzionamento.

Lo sviluppo del modello del campo solare ha come base la configurazione del modello per il singolo collettore, fondato sull'equazione di Bliss che esprime l'efficienza del collettore come il rapporto tra l'energia assorbita dal fluido termovettore e quella potenzialmente sfruttabile dal sole (Figura 2.2.16); l'equazione è stata adattata alla caratteristica dell'impianto in esame inserendo alcune correlazioni correttive: le diverse portate di lavoro rispetto a quelle di test definite dalla normativa di riferimento, il numero di collettori collegati in serie e la direzione della radiazione solare non perpendicolare alla superficie del collettore.

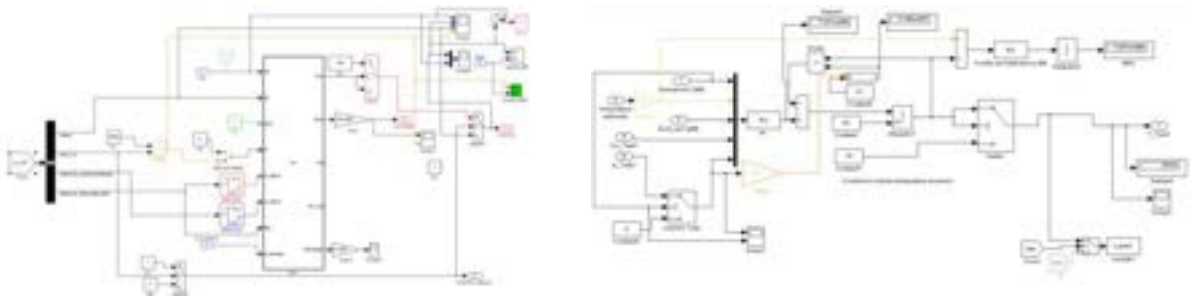


Figura 2.2.16: Modello simulink dei collettori solari (sinistra) e accumuli (destra).

Il modello dell'accumulo è stato costruito sull'ipotesi di perfetta miscelazione con la temperatura uniforme in tutta l'accumulo (Figura 2.2.16). Questa temperatura è variabile in funzione del tempo a causa di energia fornita o estratta durante operazioni di carico e scarico e le interazioni con l'ambiente. Il comportamento del serbatoio viene quindi descritto da un'equazione di equilibrio energetico in forma differenziale. Il sistema di controllo è inserito nel modello tramite S-funzione in cui la temperatura del serbatoio, posta in confronto con quella di riferimento controlla l'attivazione della pompa di circolazione del circuito solare.

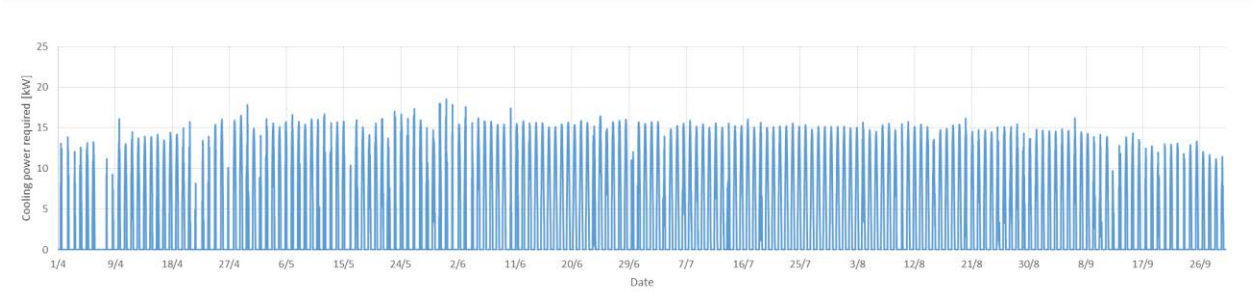
Il modello è in grado di calcolare la potenza di raffreddamento erogata dalla macchina avendo come ingresso la temperatura dell'acqua e le condizioni ambientali (temperatura, umidità). Le prestazioni si

ottengono utilizzando le specifiche fornite dal produttore. Tramite una doppia look-up table sono stati implementate le curve, parametrizzate per diverse temperature dell'acqua di uscita dalla torre di raffreddamento, queste permettono di ottenere la potenza termica assorbita e la potenza frigorifera prodotta, il tutto in funzione della temperatura dell'acqua calda fornita.

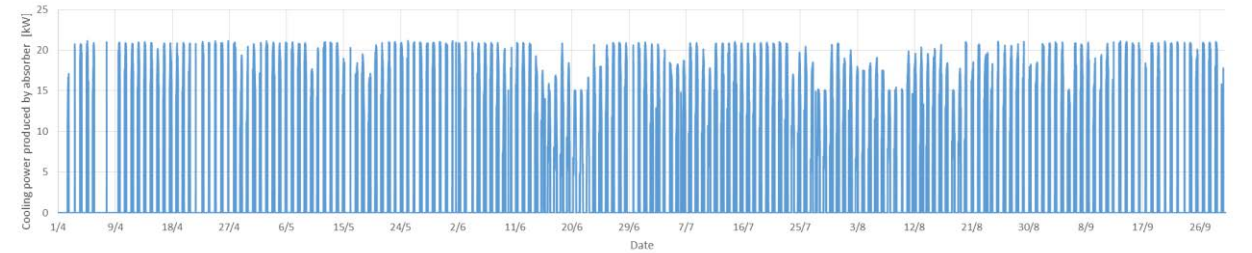
Analizzando le caratteristiche della serra, la potenza di raffreddamento totale necessaria sarebbe di circa 110 kW e, nell'ipotesi di fornire questo carico con un sistema di raffreddamento solare, la superficie solare richiesta sarebbe di circa 350 m^2. L'impianto realizzato è un impianto con un sistema di distribuzione in cui il potere di raffreddamento non è disponibile per l'intero volume della serra, ma solo per il volume circostante le culture. La superficie del campo solare è circa 50 m^2, con una potenza di picco di 18 kW.Il sistema di distribuzione di raffreddamento è costituito da varie linee di tubazioni, posizionate a livello coltura, lungo il lato più lungo di vasi di plastica, attraverso le quali circola l'acqua refrigerata che, con opportuni sistemi di dissipazione ad aria, contribuisce ad abbassare la temperatura nell'intorno della pianta.

Questa valutazione ha portato a determinare il carico di raffreddamento della serra dai dati raccolti presso il centro sperimentale dell'Università degli Studi di Bari, questo rappresenta la domanda di raffreddamento che il modello di raffreddamento solare deve soddisfare. La figura 2.2.17 mostra la tendenza oraria della domanda di raffreddamento della serra e della potenza frigorifera prodotta dal refrigeratore ad assorbimento valutata tramite simulazione Simulink, per il periodo 1 aprile- 30 settembre.

La figura 2.2.18 riporta l'andamento della temperatura del serbatoio freddo per il periodo 1 aprile - 30 settembre.



(A)



(B)

Figura 2.2.17: A: Potenza frigorifera richiesta. B: Potenza frigorifera prodotta dall'assorbitore.

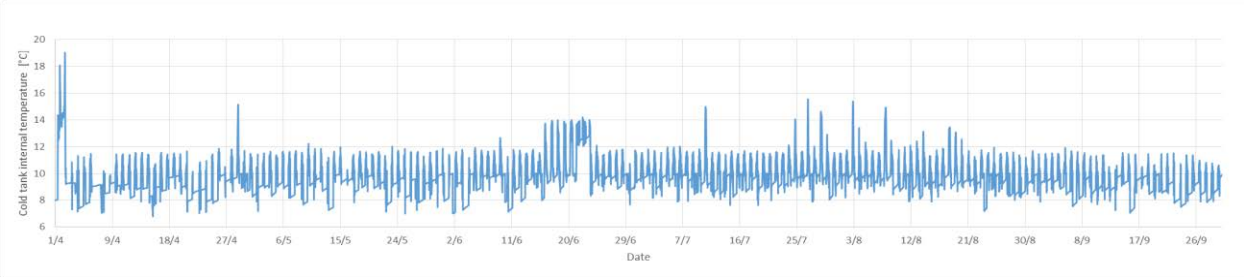


Figura 2.2.18: Temperatura accumulo freddo [°C]

Le figure 2.2.17 -2.2.18 evidenziano come il modello è in grado di soddisfare la domanda di raffreddamento ogni passo temporale:

- la potenza generata è sempre più elevata rispetto a quella richiesta;
- il serbatoio freddo ha una temperatura compresa in un intervallo [7-12 ° C];

questo sta a significare che il sistema è ben bilanciato dal punto di vista energetico perché questo intervallo corrispondono alle condizioni di lavoro di uscita acqua prodotta dalla macchina frigorifera ad assorbimento.

Le simulazioni effettuate confermano la buona progettazione del sistema e la corretta scelta delle dimensioni dei componenti. Il modello ha permesso di valutare se il sistema è in grado di fornire la potenza di raffreddamento necessaria, calcolando i profili di produzione dell'impianto. Il modello dinamico sviluppato è stato quindi utilizzato come strumento per la verifica e la conferma della corretta progettazione e può essere utilizzato come piattaforma per testare nuove strategie di controllo e di gestione in modo da minimizzare il consumo di energia primaria. Le simulazioni operate dimostrano che i sistemi di raffreddamento solari possono fornire significative opportunità di risparmio energetico per il comparto dell'agricoltura in serra in quanto consentono la riduzione del consumo di energia primaria sfruttando la contemporaneità tra le esigenze di raffreddamento e la disponibilità di energia solare.

2.2.3 Risultati sperimentali

Nel periodo di funzionamento del sistema di solar cooling, durante l'estate 2016, sono stati acquisiti dati sperimentali preliminari delle temperature di funzionamento. In particolare sono stati posizionati sensori: nella parte superiore del serbatoio di accumulo caldo, in corrispondenza dell'acqua calda di adduzione proveniente dal campo solare; nel tubo che eroga acqua fredda dal chiller al serbatoio freddo; sui tubi di rinfrescamento posizionati in prossimità dell'apparato vegetale in serra. Questi dati sono stati inoltre correlati con le temperature dell'aria interna alla serra.

Le figure 2.2.19-2.2.21 mostrano le temperature dell'aria della serra, dell'acqua calda nella parte superiore del boiler, dell'acqua fredda dal chiller al serbatoio freddo; del tubo freddo utilizzato per il raffreddamento localizzato sulle piante, registrate nei giorni 28/06/2016, 05/07/2016 e 10/08/2016.

Il comando di accensione del chiller è stato programmato per una temperatura del serbatoio di accumulo caldo superiore a 70°C e per una temperatura dell'aria interna della serra maggiore di 30 °C; una volta in stato di accensione il chiller attiva il funzionamento per il raffreddamento dell'acqua secondo un proprio protocollo di funzionamento e di controllo dello stato di diversi parametri relativi alle temperature della sezione del lato caldo di alimentazione e alle temperature della sezione di raffreddamento tramite torre evaporativa.

Le figure Le figure 2.2.19-2.2.21 mostrano come le necessità di raffreddamento della serra siano in fase con l'incremento di temperatura dell'acqua nell'accumulo caldo, il chiller incomincia a produrre acqua di raffreddamento quando la temperatura dell'aria interna della serra è ben oltre 30 °C. La

temperatura dell'acqua nel tubo di raffreddamento in serra segue la temperatura dell'acqua fredda in uscita dal chiller, ma con un valore più elevato dovuto alla miscelazione dell'acqua fredda con l'acqua già presente nel serbatoio freddo. L'efficienza nella capacità di raffreddamento dell'acqua è stata molto influenzata dalla capacità dissipativa in torre evaporativa, che a sua a volta dipende strettamente dalla portata nelle tubazioni e quindi dallo stato dei filtri che tendono facilmente ad intasarsi a causa della presenza di impurità nell'acqua. Questo aspetto è stato trattato in altra sezione della presente relazione.

I risultati descritti inducono a proporre ulteriori sviluppi nella ricerca, in particolare si sottolinea la necessità di acquisire ulteriori dati sperimentali nel prossimo periodo caldo mediante il nuovo sistema di acquisizione dati che è ora installato presso l'impianto. Tale sistema di acquisizione è dotato di un numero di sensori per la misura delle temperature e delle portate tale da descrivere tutti i flussi energetici e gli effetti sul condizionamento della temperatura dell'aria nella zona di coltivazione.

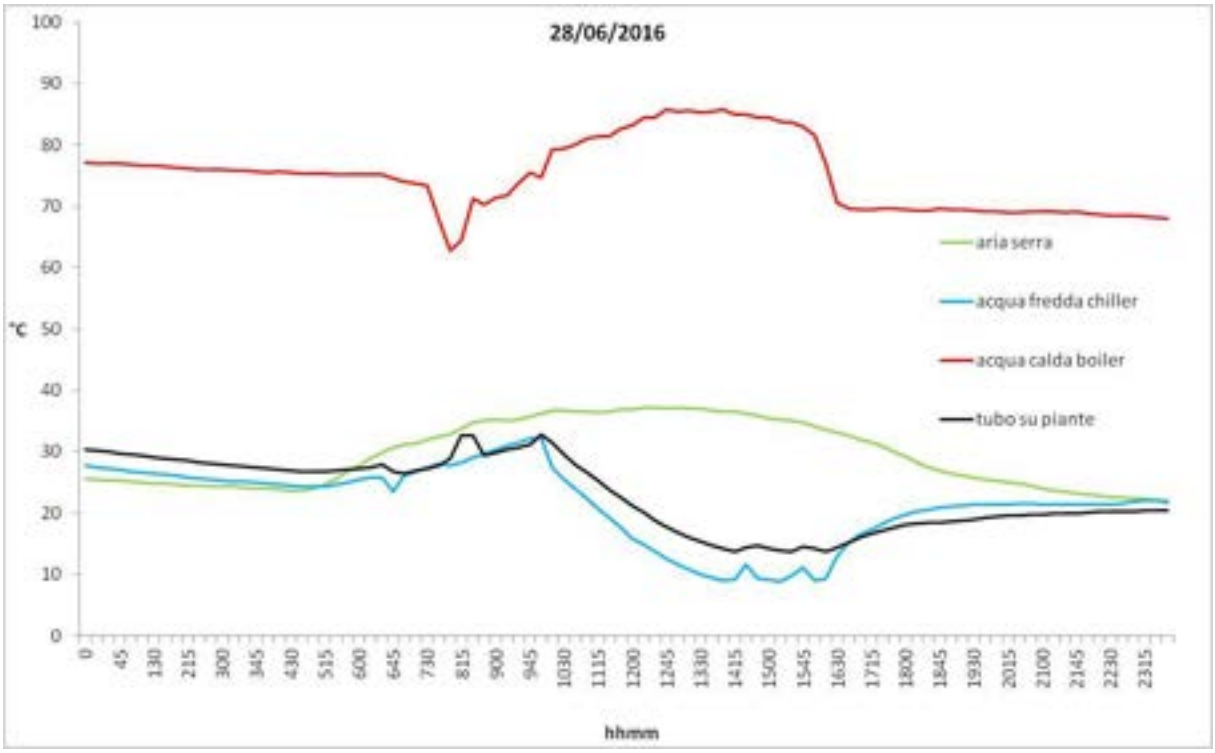


Figura 2.2.19: Temperatura [°C] dell'aria della serra, dell'acqua calda nella parte superiore del boiler, dell'acqua fredda dal chiller al serbatoio freddo; del tubo freddo utilizzato per il raffreddamento localizzato sulle piante, misura del giorno 28/06/2016.

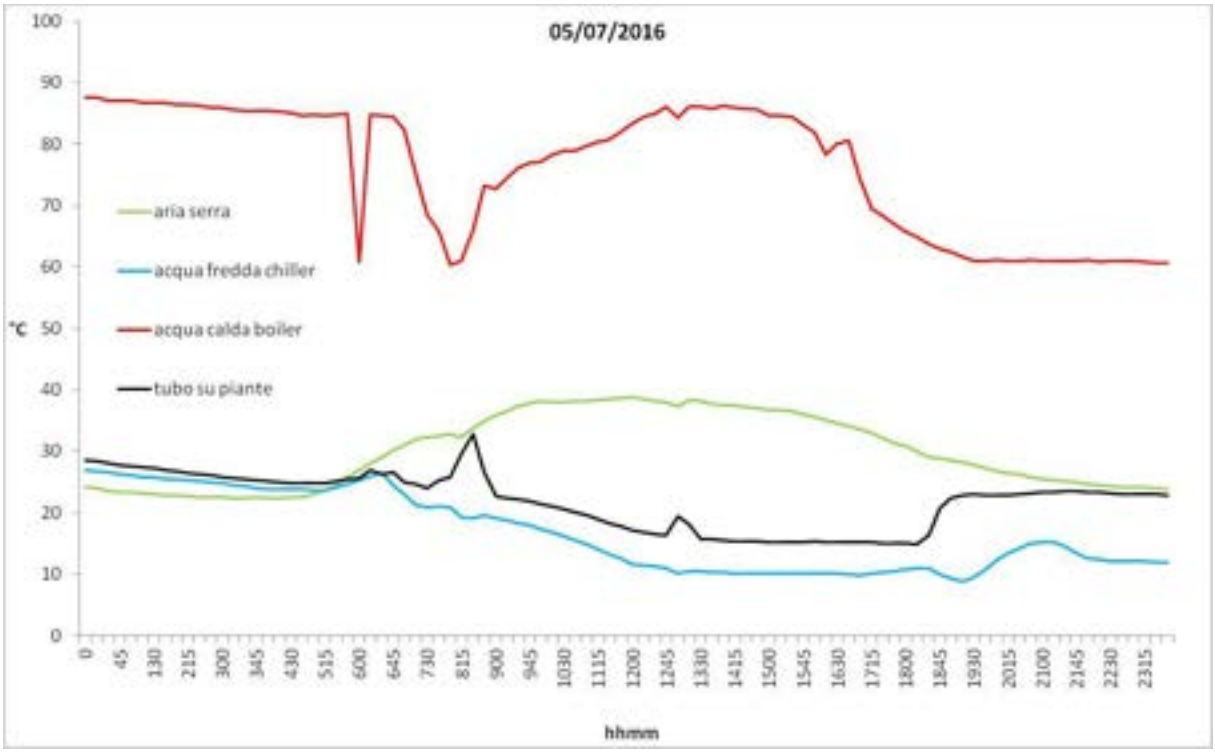


Figura 2.2.20: Temperatura [°C] dell'aria della serra, dell'acqua calda nella parte superiore del boiler, dell'acqua fredda dal chiller al serbatoio freddo; del tubo freddo utilizzato per il raffreddamento localizzato sulle piante, misura del giorno 05/04/2016.

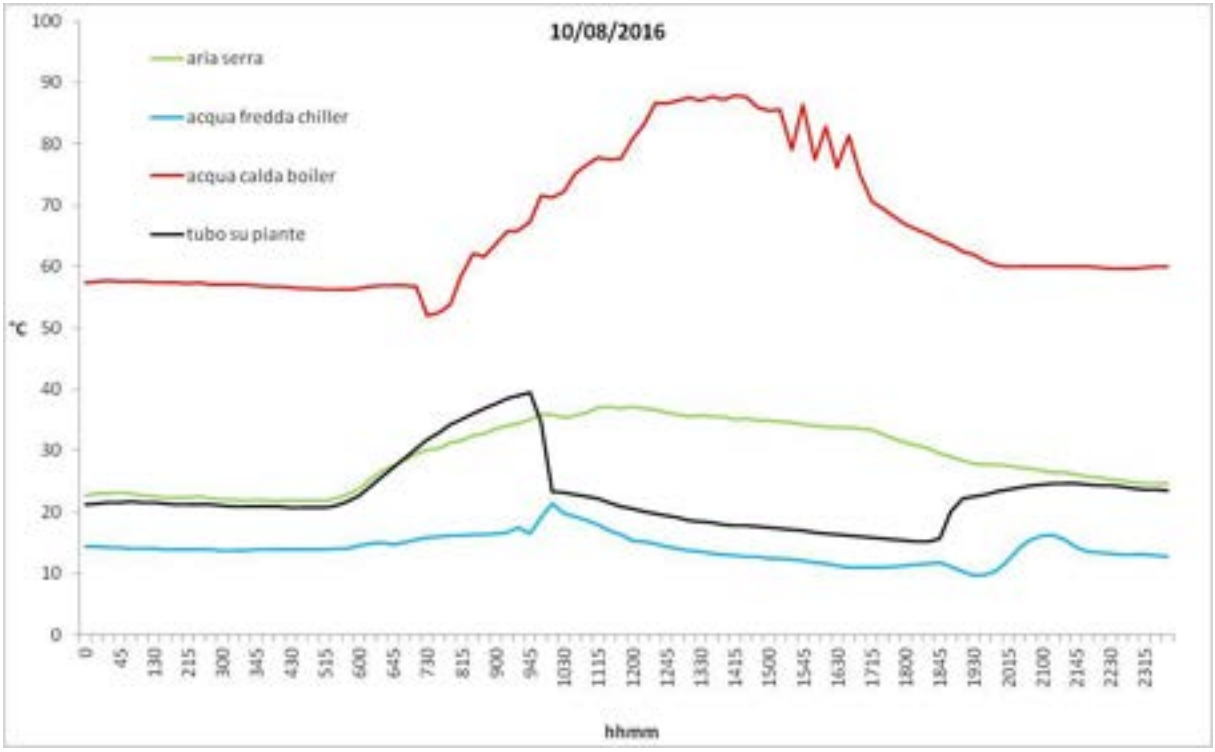


Figura 2.2.21: Temperatura [°C] dell'aria della serra, dell'acqua calda nella parte superiore del boiler, dell'acqua fredda dal chiller al serbatoio freddo; del tubo freddo utilizzato per il raffreddamento localizzato sulle piante, misura del giorno 10/08/2016.

2.3 Pubblicazioni

I risultati ottenuti dal gruppo di ricerca del'Università di Bari e dall'ENEA UTEE AGR sono stati presentati durante le seguenti conferenze:

- 43rd International Symposium on Agricultural Engineering, Opatija (Croatia), 24-27 Febbraio 2015;
- International Mid-Term Conference AIIA 2015, Napoli, 22-23 Giugno 2015;
- International Symposium ISHS Greensys 2015 "New Technologies and Management for Greenhouses", Évora, Portogallo, 19- 23 Luglio 2015;
- 4th Annual Conference of the Zero Energy Mass Custom Home - ZEMCH 2015, Bari - Lecce, 21-25/9/2015;
- Second International Symposium on Agricultural Engineering ISAE-2015, Belgrade – Zemun, Serbia, 9--10 Ottobre 2015, con presentazione della comunicazione ad invito "Contribution of green walls to building microclimate control" (Schettini E., Blanco I., Scarascia Mugnozza G., Campiotti C. A., Vox G.).

Gli articoli pubblicati sono stati:

1. Blanco I., Schettini E., Scarascia Mugnozza G., Puglisi G., Campiotti C. A., Giagnacovo G., Vox G., 2015. Thermal solar collectors and absorption system applied to greenhouse cooling. Proceedings of the 43rd International Symposium on Agricultural Engineering "Actual Tasks on Agricultural Engineering", 24-27/2/2015, Opatija, Croatia, 713-722. (ISSN 1848-4425. http://atae.agr.hr)
2. Vox G., Blanco I., Campiotti C. A., Giagnacovo G., Schettini E., 2015. Vertical green systems for buildings climate control. Proceedings of the 43rd International Symposium on Agricultural Engineering "Actual Tasks on Agricultural Engineering", 24-27/2/2015, Opatija, Croatia, 723-732. (ISSN 1848-4425. http://atae.agr.hr)
3. Schettini E., Blanco I., Scarascia Mugnozza G., Campiotti C. A., Vox G., 2015. Contribution of green walls to building microclimate control. Proceedings of the 2nd International Symposium on Agricultural Engineering (ISAE 2015), 09-10/10/2015, Belgrade, Serbia, pages V53-V60. (INVITED LECTURE, ISBN: 978-86-7834-232-5)
4. Schettini E., Blanco I., Fuina S., Scarascia Mugnozza G., Campiotti C.A., Vox G., 2015. Green walls for a sustainable control of building microclimate. Proceedings of the "ZEMCH 2015" International Conference, Bari-Lecce, 21-25/9/2015, 857-866. (ISBN: 978 88941 52609)
5. Schettini E., Blanco I., Campiotti C.A., Bibbiani C., Fantozzi F., Vox G., 2016. Green control of microclimate in buildings. Proceedings of Florence "Sustainability of Well-Being International Forum", 2015: Food for Sustainability and not just food, FlorenceSWIF2015. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 8, 576–582. (DOI:10.1016/j.aaspro.2016.02.078)
6. Campiotti C. A., Morosinotto G., Puglisi G., Schettini E., Vox G., 2016. Performance evaluation of a solar cooling plant applied for greenhouse thermal control. Proceedings of Florence "Sustainability of Well-Being International Forum", 2015: Food for Sustainability and not just food, FlorenceSWIF2015. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 8, 664–669. (DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.02.076)
7. Giuliano Vox, Ileana Blanco, Silvana Fuina, Carlo Alberto Campiotti, Giacomo Scarascia Mugnozza, Evelia Schettini, 2016. Evaluation of wall surface temperatures in green

facades. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability. 11 Pagine Published Online: September 06, 2016. DOI: 10.1680/jensu.16.0001

Gli articoli accettati e in corso di stampa sono:

8. Blanco I, Scarascia Mugnozza G., Schettini E., Puglisi G., Campiotti C.A., Vox G. Design of a solar cooling system for greenhouse conditioning in a Mediterranean area. Proceedings of the "International Symposium on New Technologies and Management for Greenhouses - GreenSys2015", 19-23/7/2015, Évora, Portugal, 8 pages. (Acta Horticulturae, in stampa)
9. Blanco I., Schettini E., Scarascia Mugnozza G., Campiotti C. A., Giagnacovo G., Vox G. Vegetation as passive system for enhancing building climate control. Proceedings of the "International Symposium on New Technologies and Management for Greenhouses - GreenSys2015", 19-23/7/2015, Évora, Portugal, 8 pages. (Acta Horticulturae, in stampa)

3 Conclusioni

Le attività svolte dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e Territoriali dell'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" nell'ambito dell'accordo di collaborazione "Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra" con l'ENEA hanno riguardano l'analisi delle prestazioni di pareti verdi per edifici in ambiente climatico mediterraneo. I dati analizzati nel rapporto riguardano un intero anno. La ricerca potrà proseguire continuando la prova sperimentale per superare la mancanza in letteratura di dati sperimentali per un periodo più lungo in una zona climatica quale la regione mediterranea. Questi dati consentirebbero di poter stabilire dei coefficienti, ad esempio un coefficiente di resistenza termica effettiva della pianta, che possono essere usati nei modelli di scambio termico delle pareti verdi. Uno studio approfondito sulle pareti verdi potrà servire per scegliere le essenze vegetali, i materiali e gli impianti da utilizzare per la progettazione di un edificio ricoperto con essenze vegetali, rispettando le esigenze di comfort termico per le persone che usufruiscono dell'edificio.

Inoltre, le attività svolte dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari hanno riguardano l'ottimizzazione tecnologica ed energetica dell'impianto di climatizzazione per un sistema serra basato su tecnologia solar cooling presente presso il centro didattico sperimentale dell'Università di Bari, sito in Valenzano (Bari). Ulteriori studi devono essere eseguiti per il completamento dell'impianto di solar cooling nella parte di raffreddamento in serra e per l'ottimizzazione delle diverse componenti del sistema nelle condizioni di funzionamento al fine di incrementarne l'efficienza energetica complessiva. Sicuramente si dovranno definire le caratteristiche di un sistema di correzione della qualità dell'acqua per garantire il funzionamento continuo dell'impianto di solar cooling, in relazione alle caratteristiche dell'acqua proveniente dal pozzo aziendale.

4 Riferimenti bibliografici

1. Al-Alili, A., Islam, M.D., Kubo, I., Hwang, Y., and Radermacher, R. 2012. Modeling of a solar powered absorption cycle for Abu Dhabi. Appl Energ 93: 160-167.
2. Alexandri E., Jones P., "Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates", Building and Environment, 43 (4) (2008), 480-493.
3. ASABE. 2008. Heating, ventilating and cooling greenhouses. ASABE standards, ANSI/ASAE EP406.4 JAN2003 (R2008). St. Joseph, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers.

4. Ascione F., Bianco N., de' Rossi F., Turni G., Vanoli G. P., "Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning?", Applied Energy, 104 (2013), 845-859
5. Berardi U, Ghaffarianhoseini AH and Ghaffarian Hoseini A. "State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs". Applied Energy 115 (2014), 411-428.
6. Berdahl P and Bretz SE. "Preliminary Survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials". Energy and Buildings 25 (1997), 149-158.
7. Bretz SE and Akbari H. "Long-term Performance of High-Albedo Roof Coatings". Energy and Buildings 25 (1997), 159-167.
8. Bretz SE, Akbari H and Rosenfels A. "Pratical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands". Atmospheric Environment 32 (1998), 95-101.
9. Cameron RWF, Taylor JE and Emmett MR. "What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls". Building and Environment 73 (2014), 198-207.
10. Campiotti CA, Schettini E, Alonzo G, Viola C, Bibbiani C, Scarascia Mugnozza G, Blanco I and Vox G. "Building green covering for a sustainable use of energy". Journal of Agricultural Engineering 44 (2013), 253-256.
11. Castleton HF, Stovin V, Beck SBM and Davison JB. "Green roofs: building energy savings and the potential of retrofit". Energy and Buildings 42 (2010), 1582-1591.
12. Cheng CY, Cheung KKS and Chu LM. "Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls". Building and Environment 45(8) (2010), 1779-1787.
13. Feng H., Hewage K., "Lifecycle assessment of living walls: air purification and energy performance", Journal of Cleaner Production, 69 (2014), 91-99.
14. Fernandez-Cañero R, Emilsson T, Fernandez-Barba C and Herrera Machuca MA. "Green roof systems: A study of public attitudes and preferences in southern Spain". Journal of Environmental Management 128 (2013), 106-115.
15. Francis, R. A., Lorimer, J., 2011. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. Journal of Environmental Management 92 (6), 1429-1437.
16. Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Evola G. "A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs". Building and Environment, 90 (2015), 71-81.
17. Gago E.J., Roldan J., Pacheco-Torres R., Ordóñez J., "The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25 (2013), 749-758.
18. Ghaddar, N. K., Shihab, M., and Bdeir, F. 1997. Modeling and simulation of solar absorption system performance in Beirut. Renew Energy 10 (4):539-558.
19. Ghosal, M.K., Tiwari, G.N., and Srivastava, N.S.L. 2004.Thermal modelling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation. Energ Buildings 36 (3): 221–227.
20. Hunter AM, Williams NSG, Rayner JP, Aye L, Hes D and Livesley SJ "Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review". Ecological Engineering 63 (2014), 102-113.
21. Hwang, Y., Radermacher, R., Al Alili, A., and Kubo, I. 2008. Review of Solar Cooling Technologies. Hvac&R Res 14 (3): 507-528
22. IGRA International Green Roof Association. (2016). http://www.igra-world.com/

23. ISPRA. Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi eco sistemici. Rapporto 248/2016. (2016).http://admin.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/rapporti/Rapporto_consumo_suolo_20162.pdf
24. Jaffal I, Ouldboukhitine SE and Belarbi R "A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance". Renewable Energy 43 (2012), 157-164.
25. Jain, D., and Tiwari, G.N. 2002. Modeling and optimal design of evaporative cooling system in controlled environment greenhouse. Energ Convers Manage 43 (1): 2235–2250.
26. Jim C. Y., Tsang S.W. "Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof". Build. Environ. 46 (2011), 1263-1274.
27. Kalkstein LS and Davis RE "Weather and human mortality: An evaluation of demographic and interregional responses in the United States". Annals of the Association of American Geographers 79 (1989), 44-64
28. Kanechi M, Fujiwara S, Shintani N and Uno Y. "Performance of herbaceous Evolvulus pilosus on urban green roof in relation to substrate and irrigation". Urban Forestry & Urban Greening 13(1) (2014), 184-191.
29. Karlessi T, Santamouris M, Synnefa A, Assimakopoulos D, Didaskalopoulos P and Apostolakis K, "Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat Island and cool buildings". Building and Environment 46 (2011), 570-576.
30. Köhler M and Poll PH "Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive greenroofs in Berlin". Ecological Engineering 36(5) (2010), 722-729.
31. Kumar, K.S., Tiwari, K.N., and Jha, M.K. 2009. Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review. Energ Buildings 41 (12): 1269-1275.
32. Norton BA, Coutts AM, Livesley SJ, Harris RJ, Hunter AM and Williams NSG "Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes". Landscape and Urban Planning 134 (2015), 127-138.
33. Pérez G, Coma J, Martorell I and Cabeza LF "Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review". Renewable and Sustainable Energy Reviews 39 (2014), 139-165.
34. Pérez G, Rincón L, Vila A, González JM and Cabeza LF. "Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings". Applied Energy 88(12) (2011), 4854-4859.
35. Perini K, Ottelé M, Fraaij ALA, Haas EM and Raiteri R "Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope". Building and Environment 46(11) (2011), 2287-2294.
36. Petralli M, Prokopp A, Morabito M, Bartolini G, Torrigiani T and Orlandini S "Ruolo delle aree verdi nella mitigazione dell'isola di calore urbana: uno studio nella città di Firenze". Rivista Italiana di Agrometeorologia 1 (2006), 51-58 (in Italian).
37. Raji B, Tenpierik MJ and Van Den Dobbelsteen A "The impact of greening systems on building energy performance: A literature review". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45 (2015), 610-623.
38. Refahi AH and Talkhabi H "Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs". Renewable Energy 80 (2015), 595-603.
39. Rowe DB "Green roofs as a means of pollution abatement". Environmental Pollution 159 (2011), 2100-2110.
40. Ryu YH and Baik JJ "Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Intensity". Journal of Applied Meteorology and Climatology 51 (2012), 842–854.

41. Santamouris M “Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments”. Solar Energy 103 (2012), 682–703.
42. Sethi, V. P., and Sharma, S. K. 2007. Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. Sol Energy 81 (12): 1447-1459.
43. Sharan, G. 2009. Controlled environment agriculture in semi-arid north-west India. Ann Arid Zone 48 (2): 95-102.
44. Tan C. L., Wong N. H., Jusuf S. K.. “Effects of vertical greenery on mean radiant temperature in the tropical urban environment”. Landscape and Urban Planning, 127 (2014), 52-64
45. UNI EN 1745 “Masonry and masonry products - Methods for determining thermal properties”. (2012). UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione - Italian Organization for Standardization; IT.
46. von Zabeltitz, C. 1999. Chapter 2: Greenhouse structures. Greenhouse Ecosystems, G. Stanhill and H. Zvi Enoch, Elsevier, Amsterdam, 17-69.
47. Vox, G., Schettini, E., Lisi Cervone, A., and Anifantis A. 2008. Solar thermal collectors for greenhouse heating. Acta Hort 801: 787-794.
48. Vox, G., Teitel, M. Pardossi, A., Minuto, A., Tinivella, F., and Schettini E. 2010. Chapter 1: Sustainable Greenhouse Systems. in “Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management”, Augusto Salazar e Ismael Rios Editors, Nova Science Publishers, Inc. NY USA, ISBN: 978-1-60876-269-9: 1-79.
49. Yildiz, A., Ozgener, O., and Ozgener, L. 2012. Energetic performance analysis of a solar photovoltaic cell (PV) assisted closed loop earth-to-air heat exchanger for solar greenhouse cooling: An experimental study for low energy architecture in Aegean Region. Renew Energ 44: 281-287.

5 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

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

Il gruppo di ricerca è costituito da:

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

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

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

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

Sig. Francesco Ferrulli - Tecnico, esperto di sensoristica.