



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi del comportamento energetico di una serra bioclimatica con sistema vegetale interno per migliorare l'efficienza energetica dell'edificio

Prof. Fabio Fantozzi, Prof. Carlo Bibbiani, Arch. PhD Caterina Gargari

ANALISI DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DI UNA SERRA BIOCLIMATICA CON SISTEMA VEGETALE INTERNO PER MIGLIORARE L'EFFICIENZA ENERGETICA DELL'EDIFICIO

Prof. Fabio Fantozzi (Dip. DESTEC Università di Pisa), Prof. Carlo Bibbiani (Centro CiRAA Università di Pisa), Arch. Caterina Gargari (Dip. DESTEC Università di Pisa)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *2 - Materiali e soluzioni innovative per ottimizzare l'isolamento dell'involucro edilizio*

Linea di attività: *LA2.4 - Analisi del comportamento energetico di una serra bioclimatica con sistema vegetale interno per migliorare l'efficienza energetica dell'edificio - I*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Giovanni Puglisi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Analisi del comportamento energetico di una serra bioclimatica con sistema vegetale interno per migliorare l'efficienza energetica dell'edificio*"

Responsabile scientifico ENEA: Dott. Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Dip. DESTEC Università di Pisa: Prof. Fabio Fantozzi

Indice

SOMMARIO.....	4
1. INTRODUZIONE	5
2. DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1. ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE DELLA RICERCA SULL'EFFETTO DELLA PRESENZA DI ELEMENTI VEGETALI NELLA REGOLAZIONE DEL COMFORT INTERNO.....	5
2.2. COSTRUZIONE DEL MODELLO GEOMETRICO E TEORICO	6
2.3. COSTRUZIONE DEL MODELLO CLIMATICO	13
2.4. VALIDAZIONE DEL MODELLO E RISULTATI	14
2.5. SIMULAZIONE DEL CONTRIBUTO EVAPOTRASPIRATIVO: ANALISI CRITICA	20
3. CONCLUSIONI.....	24
4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	24

Sommario

Nel primo anno della ricerca è stato costruito e validato un modello climatico e geometrico in grado di rappresentare, attraverso il software di simulazione dinamica Energy+, il comportamento della serra bioclimatica realizzata sulla terrazza dell'edificio F92 ENEA in presenza di sistemi vegetali collocati in vaso. Attraverso un modello teorico costruito per rappresentare il processo evapotrasporativo, così come documentato dal monitoraggio eseguito durante l'estate 2020, i risultati della simulazione hanno posto l'attenzione sul modesto contributo offerto dalle piante al miglioramento del comfort interno della serra, stante la fase iniziale dello sviluppo vegetativo proprio durante la stagione più calda. Il complesso fenomeno evapotraspirativo è stato simulato tramite il modulo *Water Use: equipement* impiegabile per la simulazione di tutti gli usi finali dell'acqua, inclusa la frazione evaporativa all'interno della zona termica. Il modello ha dato risultati apprezzabili soprattutto per quanto riguarda la stima delle temperature dell'aria all'interno della serra bioclimatica.

1. Introduzione

Le attività svolte a supporto dell'ENEA sono volte ad una caratterizzazione ambientale ed energetica puntuale del sistema serra bioclimatica/ambiente indoor, costruito presso l'Ed. F92 nel Centro di Ricerca ENEA Casaccia. Le attività hanno riguardato la pianificazione della ricerca, l'aggiornamento dello stato dell'arte sulla modellazione termodinamica degli edifici in presenza di elementi vegetali e del modello di calcolo predisposto per la simulazione nel software Energy plus, con l'inserimento del sistema vegetale così come effettivamente realizzato nella serra bioclimatica dell'edificio dimostrativo ENEA. Di seguito vengono riassunte le principali attività svolte relativamente a ciascuno dei tre sistemi in studio.

La ricerca bibliografica ha consentito di ricostruire lo stato dell'arte sulla ricerca e sugli strumenti informatici attualmente più affidabili per la simulazione del comportamento termoigrometrico degli edifici in presenza di elementi vegetali, andando oltre le consuete configurazioni di tetto-verde e parete-verde, offrendo così spunti di riflessione sulla possibilità di utilizzare, in parallelo con Energy Plus, anche altri software di più recente ideazione e più specifica finalità

L'ultimo aggiornamento della banca dati climatici JRC ha consentito di lavorare su file climatici del tipo Typical Meteorological Year più recenti (2016) che sono stati ulteriormente affinati, per le località di studio, attraverso l'implementazione dei dati mancanti (es. piovosità e velocità del vento) e aggiornati all'anno 2020.

Il modello tridimensionale geometrico-materico della palazzina ENEA e della serra bioclimatica è stato aggiornato e integrato con la disposizione degli elementi vegetali così come effettivamente installati all'interno della serra. È stato costruito un modello semplificato da utilizzarsi in altri software di modellazione. Sono state valutate eventuali configurazioni alternative, nella disposizione degli elementi vegetali e nella configurazione degli elementi vetrati, volti a valutare l'incidenza di tali variabili nei risultati della simulazione e nella capacità quindi del modello di predire il reale comportamento dell'edificio.

Sono stati avviati studi paralleli su altri software di simulazione energetica volti a determinare con maggiore dettaglio il comportamento di alcuni parametri identificati come rilevanti e ricavare informazioni utili ad una successiva ed ulteriore definizione del modello Energy Plus

2. Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1. Analisi dello Stato dell'arte della ricerca sull'effetto della presenza di elementi vegetali nella regolazione del comfort interno

La particolarità della ricerca in oggetto, in cui si richiede di valutare l'influenza di un sistema vegetale complesso, assimilabile a quello presente in una serra ortofrutticola, sul microclima interno di un ambiente destinato ad ufficio, ha spostato l'ambito della ricerca, dalla progettazione di sistemi verdi per l'edilizia, quali quelli normalmente presenti nelle costruzioni con funzioni ornamentali e di controllo microclimatico (pareti e tetti verdi), allo studio e analisi dei comportamenti termoigrometrici all'interno di serre bioclimatiche.

La necessità di predire, attraverso un modello informatico, il contributo offerto dalla presenza di sistemi vegetali articolati alla riduzione della temperatura in regime estivo degli ambienti confinati, richiede necessariamente una conoscenza approfondita dei fenomeni legati alla evapotraspirazione in grado di influenzare i parametri di umidità relativa e temperatura dell'ambiente intero e di produrre quindi un sensibile cambiamento nei livelli di comfort misurati e percepiti dagli utenti.

Una serra è un sistema fisico e biologico complesso che include il processo dinamico di trasferimento di calore e di massa nonché il processo di fotosintesi delle piante.

Come evidenziato da Priarone (1), una delle funzioni principali di una serra è appunto quella di garantire condizioni ottimali per la crescita delle piante, riducendo quanto più possibile, in virtù del costante innalzamento delle temperature estive, la temperatura dell'aria interna senza compromettere la produzione delle colture vegetali, migliorando l'isolamento della serra, e aumentando l'efficienza

energetica del riscaldamento e raffreddamento ed è appunto in questo ambito che occorre muoversi, per sviluppare un modello di calcolo in grado di produrre i risultati attesi dalla ricerca.

Benché tutti i più recenti studi condotti nell'ambito delle serre ortofrutticole (4)(5)(6)(7)(9)(10)(11), abbiano sottolineato l'importanza di considerare la presenza e la fisiologia delle piante nelle simulazioni del comportamento energetico dell'edificio al fine di predirne il comportamento energetico, pochi sono in casi in cui questo contributo è stato effettivamente misurato. Anche se è tacito che le piante influenzino il bilancio energetico della serra, lo scambio di calore sensibile e latente non è facile da valutare perché varia a seconda della specie vegetale, degli stadi di crescita e delle condizioni micro-ambientali: nella maggioranza degli studi condotti, tale contributo non è stato modellizzato.

Nonostante infatti negli ultimi 50 anni siano stati teorizzati numerosi modelli empirici per la valutazione della evapotraspirazione nei substrati quale funzione delle diverse variabili climatiche, è emerso (10) come spesso tali relazioni richiedano accurate calibrazioni e non abbiano, in generale, una validità a scala globale. Esiste quindi una carenza di informazioni circa l'interazione effettiva tra la fisiologia delle piante, il microclima, le caratteristiche termofisiche dei materiali che costituiscono l'involucro della serra e soprattutto, la ventilazione e il ricambio d'aria che costituiscono elementi cruciali nella determinazione non solo del comfort ideale alla crescita delle piante ma anche alla regolazione dei consumi energetici della serra (5)(9)(10).

Per tale motivo, per la stima della evapotraspirazione, si è deciso di procedere non attraverso modelli matematici ideali, come ad esempio il modello FAO di Penman-Monteith, ma attraverso la misura delle pesate dei vasi effettuate in serra successivamente ai cicli di irrigazione, per valutare sperimentalmente, attraverso la misura ponderale, la quantità di acqua effettivamente evapotraspirata rispetto alla quantità irrigata.

2.2. Costruzione del modello geometrico e teorico

Il modello geometrico per la simulazione del comportamento estivo degli edifici è stato realizzato attraverso l'applicativo Euclid, utilizzato in bibliografia per la creazione di modelli energetici, sviluppato dal National Renewable Energy Laboratory (NREL). Esso supporta la lettura e la scrittura della geometria EnergyPlus nel suo formato IDF nativo.

L'edificio oggetto di studio è l'edificio F92, denominato "Scuola delle Energie", situato presso il Centro Casaccia dell'ENEA. Si tratta di una villetta monofamiliare, con piano semi interrato, due fuori terra con copertura piana a lastrico solare, con una superficie complessiva di circa 230 m²: qui ha sede il laboratorio per la nuova casa del futuro, dove tecnologie, comfort ed ecosistema trovano un punto di convergenza grazie ad ENEA. L'edificio che ospita la Scuola è stato realizzato dall'Enea con criteri di alta efficienza energetica e soggetto, negli ultimi anni, a numerosi interventi di riqualificazione energetica quali ad esempio la realizzazione di un tetto verde e l'installazione di una parete verde verticale

Sia la copertura a prato che la parete verde sono stati oggetto di precedenti indagini sul comportamento energetico e ambientale, condotte da questa unità di ricerca per conto di ENEA.

Nell'ambito della ricerca Edifici Intelligenti C.1 Coltri vegetali – C.2. Climatizzazione microclimatica sostenibile con sistemi innovativi a fonte rinnovabile per sistemi serra (Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA Piano Annuale di Realizzazione 2017) è stata realizzata, su porzione di terrazzo del piano primo, una serra a ridosso del parapetto della terrazza, con tre lati trasparenti e copertura inclinata anch'essa trasparente e con superficie di circa 7,5 m².

La serra ha un volume complessivo di 20 m³ ed esposizione Sud-Ovest, struttura in scatolari in acciaio con elementi trasparenti verticali in vetro 5 mm con finestre scorrevoli su binari a tutta superficie e falda trasparente di copertura composta da lastra in polycarbonato compatto di spessore 10 mm, con trattamento anti-UV.

La superficie inclinata della serra è protetta internamente con una schermatura solare interna mobile a capanno con guide laterali (binari) a struttura fissa con funzionamento automatico azionato da motori elettrici su tutta la lunghezza.

Lo schema del modello geometrico semplificato, è riportato in Figura 1

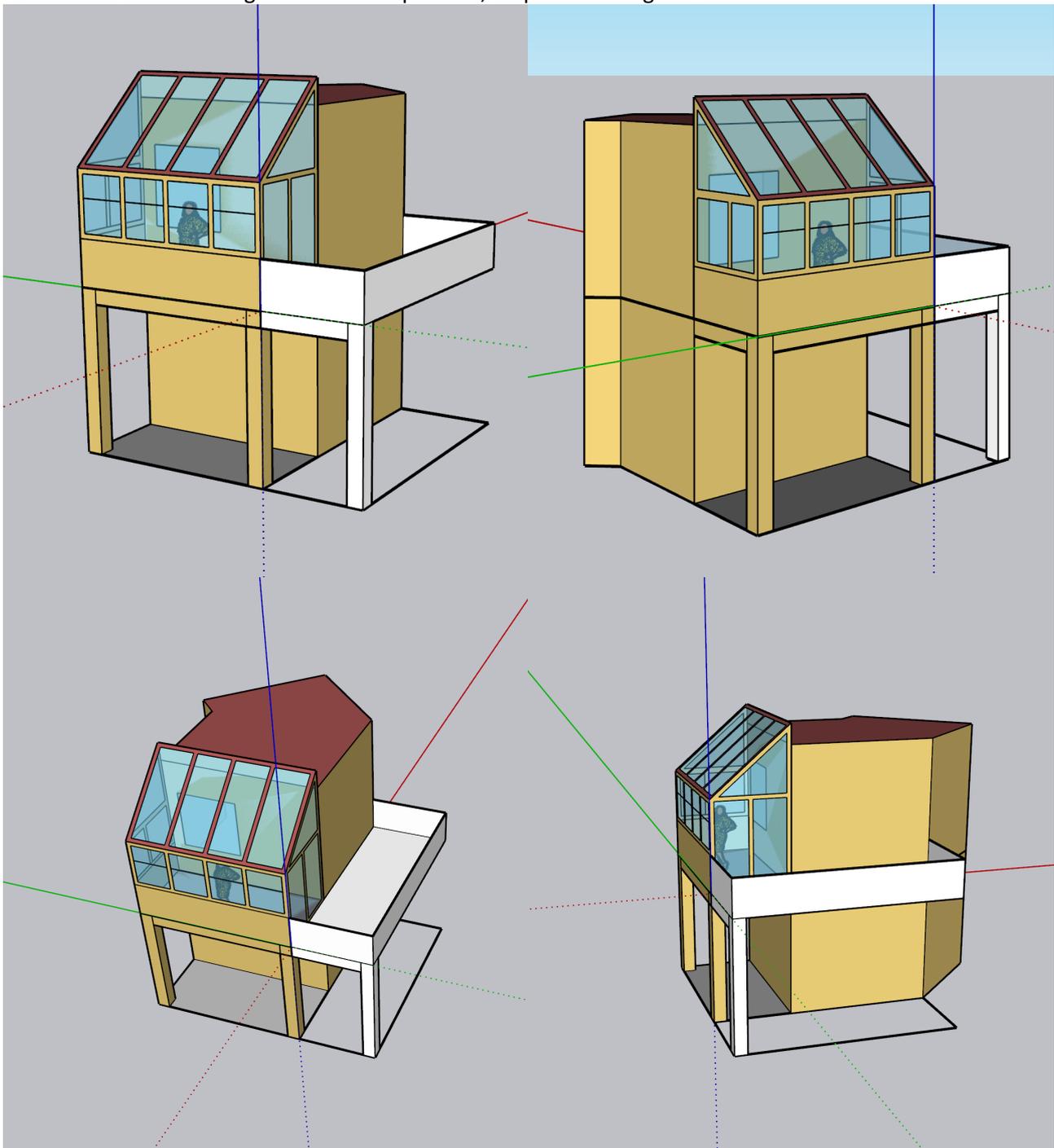


Figura 1 schema del modello semplificato utilizzato per la simulazione in E+

Il modello è stato semplificato rispetto alla reale geometria complessa dell'edificio dal momento che l'eventuale influenza della presenza delle piante sul comfort degli ambienti interni (altri rispetto alla serra), può essere misurata esclusivamente sull'aula a ridosso della serra stessa.

Tutti gli altri volumi sono stati quindi ritenuti invariati ed esclusi dalla modellazione. Il modello è composto da due Zone termiche distinte: la Serra bioclimatica e l'Aula.

Le caratteristiche degli elementi opachi e trasparenti sono state già descritte nel rapporto RdS/PAR2017/095, "Studio di un prototipo di serra bioclimatica per l'efficienza e la sostenibilità energetica" (15), e si riportano pertanto in questo documento esclusivamente i dati relativi agli elementi trasparenti della serra e alle schermature, così come risultanti dalla validazione del modello.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Glass_103_Layer	Glass_9048_Layer
Optical Data Type		Spectral	Spectral
Window Glass Spectral Data Set Name		Glass_103_Layer_S	Glass_9048_Layer_
Thickness	m	0,005715	0,012086
Solar Transmittance at Normal Incidence			
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence			0,6
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence			0,1
Visible Transmittance at Normal Incidence			
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence			
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence			
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0,18	0,9
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,968
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,968
Conductivity	W/m-K	1	1,3
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittanc			

Figura 2 parametri termici delle vetrate della serra (Glass_103 vetro verticale, Glass_9048 Policarbonato)

Field	Units	Obj1
Name		Tenda Serra
Solar Transmittance	dimensionless	0,015
Solar Reflectance	dimensionless	0,92
Visible Transmittance	dimensionless	0,03
Visible Reflectance	dimensionless	0,08
Infrared Hemispherical Emissivity	dimensionless	0,89
Infrared Transmittance	dimensionless	0,03
Thickness	m	0,057
Conductivity	W/m-K	0,12
Shade to Glass Distance	m	0,1
Top Opening Multiplier		0,5
Bottom Opening Multiplier		0,5
Left-Side Opening Multiplier		0,5
Right-Side Opening Multiplier		0,5
Airflow Permeability	dimensionless	0,2

Figura 3 parametri termici della schermatura oscurante

Le caratteristiche solari degli elementi sono riportate in Figura 2.

Gli elementi vetrati della serra sono schermati internamente con una tenda scorrevole in tessuto chiaro, spessore 1,5 mm color grigio, avente le caratteristiche riportate in Figura 3.

La simulazione è stata condotta nel periodo estivo dell'anno 2020, ed in particolare nei mesi di Giugno, Luglio, Agosto, Settembre 2020, quando, all'interno della serra sono stati collocati alcuni elementi vegetali come da schema in Figura 4.



Figura 5 Posizionamento dei vasi – 14 Luglio 2020



Figura 6 Serra - 21 Luglio 2020



Figura 7 Serra - 5 Agosto 2020



Figura 8 Serra 19 Agosto

Tabella 1 schema di apertura chiusura delle finestre e della tenda interna - Piano di irrigazione

DATA	FINESTRE			OSCURANTE ESTERNO		TENDA INTERNA			FINESTRA DI COLEGAMENTO CON L'AULA	
	CHIUSE	NORD APERTA	OVEST APERTE (45 CM)	ALZATO	ABBASSATO	ALZATA	ABBASSATA	ALZATA a metà finestra del davanzale	APERTA	CHIUSA
06/07	X			X		X				
DAL 7/07 AL 13/07	X				X		X			
14/07 inserimento vasi con terra e 3 piante di VITE		X	X		X			X		
15/07 inserimento piante + irrigazione (ogni pianta ha un irrigatore da 6litri/h attivo per 1'/giorno alle 19:00)		X	X		X			X		
16/07			X		X			X		
DAL 21/07 AL 25/09 Irrigazione 1'/giorno lunedì, mercoledì, domenica)			X		X			X		X

Di più difficile simulazione è stato, come emerso dall'analisi preliminare, la simulazione del processo evapotraspirativo legato alla presenza delle specie vegetali in crescita nella zona della serra.

Note le quantità d'acqua giornaliere fornite alle piante, la scelta di metodo si è basata sulla disponibilità di dati sperimentali misurati direttamente all'interno della serra attraverso pesature programmate.

Dai dati sperimentali ENEA, la evapotraspirazione effettivamente misurata all'interno della serra bioclimatica è stata registrata come media nelle 5 ore centrali della giornata.

Poiché nella serra sono state piantate specie diverse (lattuga pomodoro, sedano, uva fragola) ma non aveva senso analizzare comportamenti differenziati per ciascuna delle diverse specie, l'analisi ha considerato un valore medio di evapotraspirazione.

L'evapotraspirazione è la quantità di acqua che passa dallo stato liquido a quello gassoso attraverso le foglie ed il substrato di crescita, ovvero l'effetto combinato di traspirazione (attraverso le foglie) ed evaporazione (dal suolo), ed è responsabile di un significativo assorbimento di calore nelle serre. L'evaporazione dal suolo è piuttosto complicata da modellare e in questo studio è stata quindi inclusa nell'evapotraspirazione delle piante.

Pertanto, i valori orari di evapotraspirazione sono stati convertiti in un profilo giornaliero a step orari (un profilo per ogni mese dell'anno) in modo da poter essere facilmente gestiti in uno Schedule del modello Energy Plus seguendo le ipotesi seguenti:

- per ogni profilo giornaliero (uno per ogni mese), si è resa adimensionale, rispetto al valore massimo, la curva di Irradianza globale registrata dal sensore 'GR01'(Figura 9) creando così una spezzata (linea rossa);
- successivamente, la legge di variazione oraria della evapotraspirazione è stata valutata decurtando la durata dell'irraggiamento solare di 1 ora dopo l'alba e 1 ora prima del tramonto (linea tratteggiata verde). Ciò equivale ad inserire un valore di soglia minimo della radiazione solare incidente;
- Il valore massimo della evapotraspirazione oraria è stato assunto come media del valore sperimentale misurato nelle 5 ore.

I valori di evapotraspirazione, misurati in peso di acqua evaporata [kg/h], sono stati convertiti in [m³/s] considerando costante la densità dell'acqua.

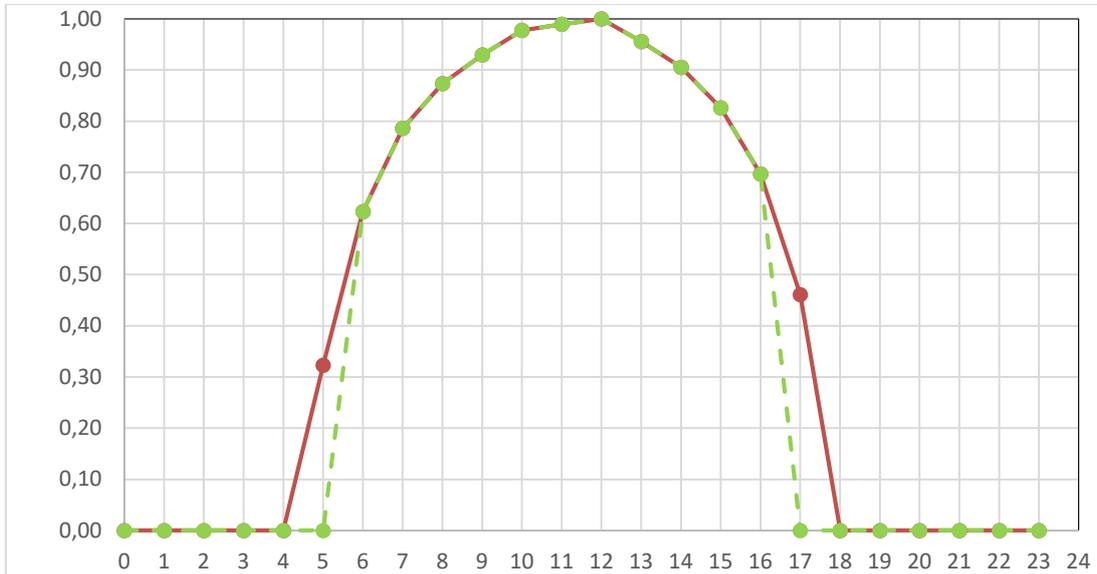


Figura 9 valori di evapotraspirazione oraria adimensionali - Spezzata Rossa: Irradianza globale adimensionale; Spezzata verde tratteggiata: evapotraspirazione oraria adimensionale

I dati così ottenuti sono stati implementati all'interno del modulo di E+ *Water Use: equipment*. Il modulo *Water Use: equipment* è un modulo generalizzato impiegabile per la simulazione di tutti gli usi finali dell'acqua inclusa la frazione evaporativa all'interno della zona termica. Dalle misurazioni di cui alla Tabella 1, è stato derivato il picco di flusso massimo ed è stato elaborato, sulla base dei profili orari per i 4 mesi di analisi, secondo la procedura appena descritta, lo *schedule* EvapoTraspirazione che descrive la frazione di calore latente sottratto all'aria ambiente.

Field	Units	Obj1
Name		EvapoTraspirazione
End-Use Subcategory		General
Peak Flow Rate	m3/s	0,000000353897
Flow Rate Fraction Schedule Name		
Target Temperature Schedule Name		
Hot Water Supply Temperature Schedule Name		
Cold Water Supply Temperature Schedule Name		
Zone Name		eSERRA
Sensible Fraction Schedule Name		Sensible Heat
Latent Fraction Schedule Name		EvapoTraspirazione

Figura 10 Il Modulo *Water Use: equipment* di E+

2.3. Costruzione del modello climatico

È nota nella comunità scientifica (12) (13) l'importanza di dataset climatici accurati nella determinazione delle previsioni di consumo e risparmio energetico nelle simulazioni in regime dinamico.

La maggior parte dei database climatici, oggi disponibili, si basano sul sistema dell'anno meteorologico tipo (TMY), introdotto da Hall (14), e che si basa sulla concatenazione di mesi tipo (TMM) per la creazione di un modello annuale. L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) ha creato modelli diversi basati su un anno tipico di riferimento (TRY), un anno climatico per le simulazioni

energetiche (WYEC), un anno internazionale climatico per le simulazione energetiche (IWECE), così come il National Solar Radiation Data Base (NSRDB) ha rilasciato il proprio TMY conosciuto come TMY2.

I modelli climatici esistenti entrano generalmente in crisi quando vengono utilizzati per progettare il comportamento resiliente degli edifici in risposta al cambiamento climatico.

O, al contrario, quando devono essere impiegati per validare un modello matematico in grado di simulare il reale comportamento di un edificio.

Per tale motivo, nonostante la banca dati JRS abbia recentemente aggiornato il database meteorologico introducendo nuovi datasets TMY riferiti al periodo di osservazione 2007-2016, tali dati, anche in relazione alle sostanziali variazioni del clima italiano rispetto alla decade precedente, risultano non efficaci per la validazione di un modello costruito a partire da misurazioni puntuali basate su un monitoraggio effettuato nell'anno 2020.

Partendo quindi dal file epw 2007-2016, elaborato da JRC per la località Casaccia Edificio F92 (lat 42.04; long 12.30), e ricavando i profili orari dalla piattaforma Olinda, sulla base delle misurazioni effettuate dai sensori posizionati in copertura dell'edificio e all'interno della zona della serra, è stato generato, attraverso l'applicativo *Elementor*, un nuovo file climatico, specifico per la località e relativo all'anno 2020 andando a sostituire al file epw i parametri relativi a:

Temperatura dell'aria	AT01_Avg
Umidità dell'aria	RH01_Avg
Radiazione Globale	GR01_Avg
Velocità media del vento	WS01_Mean
Direzione del vento	WD01_Vect
Radiazione fotosinteticamente attiva	PAR01_Avg

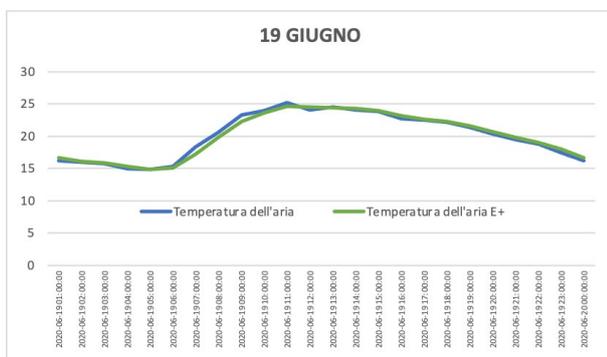
E realizzando quindi un nuovo file climatico che, limitatamente ai mesi in analisi (giugno, luglio, agosto, settembre) riproduce il reale profilo meteorologico della località in esame.

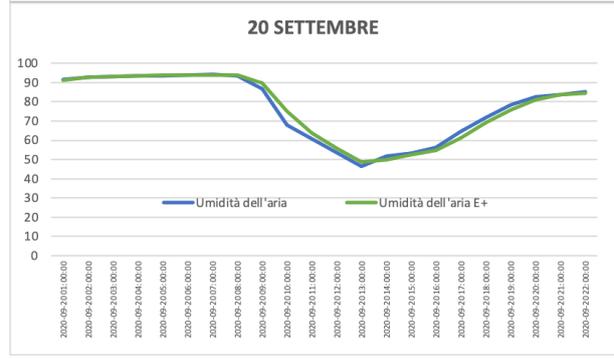
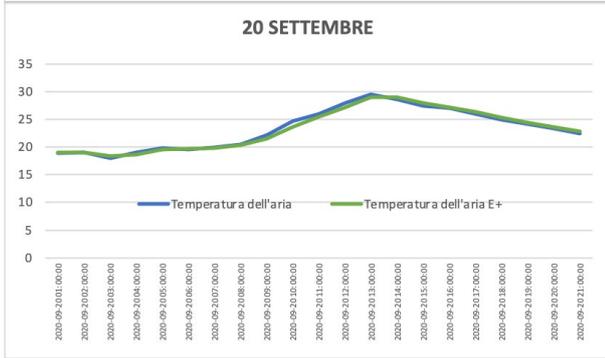
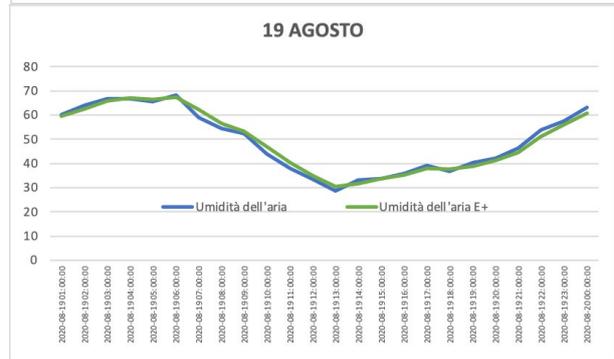
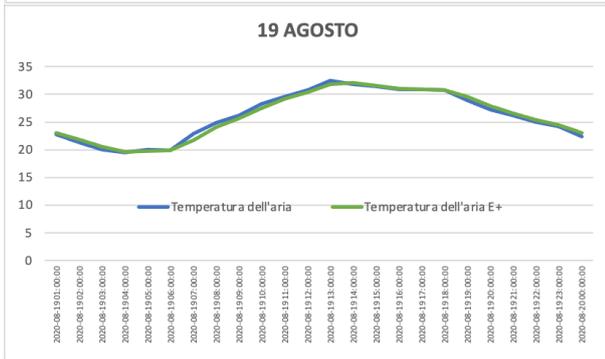
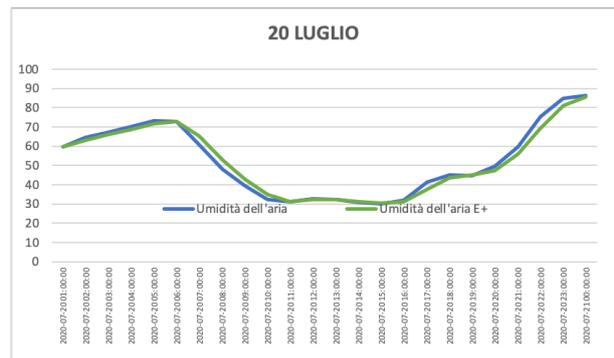
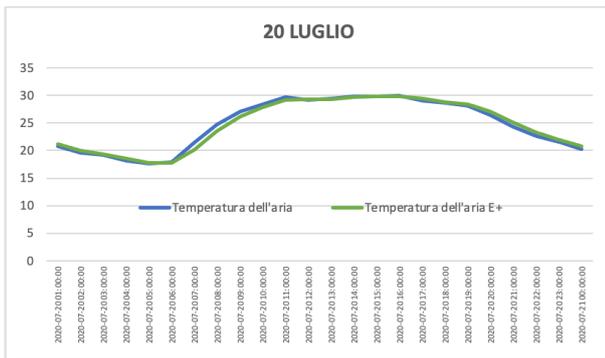
Tale file è stato utilizzato in E+ per la simulazione energetica.

2.4. Validazione del modello e risultati

Considerata la rilevanza del file climatico nella determinazione della qualità dei risultati della simulazione dinamica, si è provveduto a validare il modello climatico, andando a verificare, per i parametri di maggiore rilevanza ossia T dell'aria e Umidità relativa, che le due curve, reale (da monitoraggio) e virtuale, coincidessero. I risultati della validazione sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2 validazione del modello climatico. In azzurro i valori rilevati dal monitoraggio ENEA, in verde i valori elaborati dal file climatico epw utilizzato per la simulazione





Una volta definita la base corretta climatica per la simulazione, è stato necessario validare il modello geometrico-termo-igrometrico affinché fosse appunto in grado di rappresentare il reale comportamento dell'edificio in uso e di prevederne quindi, i consumi e i fabbisogni futuri.

Il comportamento dinamico del microclima all'interno di una serra è una combinazione di processi fisici che coinvolgono il trasferimento di energia (radiazione e calore) e il bilancio di massa (aria e vapore acqueo). Questi processi dipendono dalle condizioni ambientali esterne, dalla struttura della serra, dal tipo e dallo stato della coltura e dall'effetto degli attuatori di controllo (le finestre per la ventilazione, per modificare le condizioni di temperatura e umidità interne; l'ombreggiamento, per modificare la radiazione interna).

Il software Energy+ applica le equazioni di conservazione della energia e della massa, e poiché alcune delle caratteristiche termiche dell'edificio e dei suoi componenti non sono note alla scala di dettaglio richiesta dal software, il modello è stato generato con un margine di incertezza che ne ha resa più complicata la validazione e che necessita di un ulteriore affinamento.

I parametri ipotizzati risultano infatti determinanti del comportamento termo-igrometrico dell'edificio e la loro complessa interazione può portare, anche con variazioni minime dei singoli parametri, a sostanziali difformità nel comportamento complessivo dell'edificio.

In tale situazione di incertezza, si è provveduto a modificare puntualmente i parametri termici relativi ai componenti vetrati della zona serra (vetro e polycarbonato) e alle caratteristiche ottiche dell'elemento di schermatura (tenda solare), avendo queste maggiore incidenza sulla variazione dei livelli di temperatura e umidità all'interno della zona serra.

Partendo quindi dall'andamento e dal profilo orario delle temperature misurate sperimentalmente all'interno della serra dal sensore AT09 e dalla lettura in combinata dei livelli di irraggiamento misurati dal sensore GR(07), i valori di riflessione solare e trasmittanza all'infrarosso dei componenti vetrati e degli elementi schermanti sono stati modificati (a partire da dati di catalogo) fino a raggiungere una sostanziale sovrapposizione delle curve di T° del modello dinamico, rispetto al modello reale, come si evince dai grafici di Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14. Le umidità relative HR sono in generale un parametro di più difficile stima e perciò meno aderenti, come si nota dai grafici di Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18.

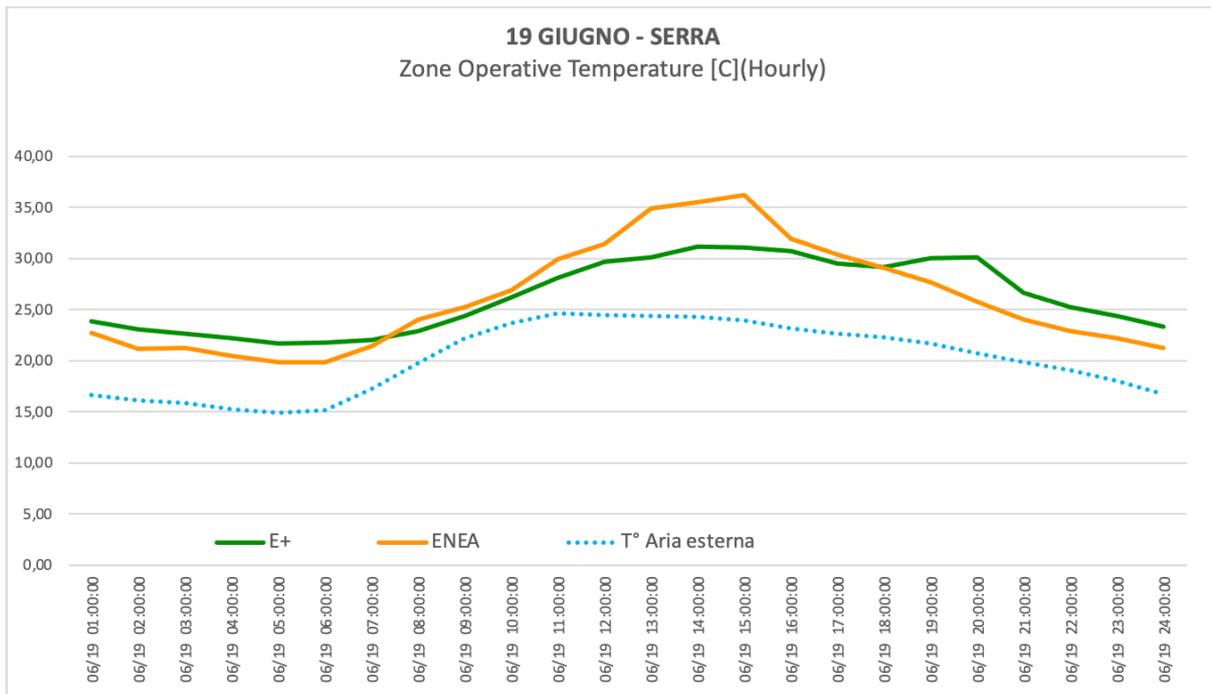


Figura 11 andamento della T° interna alla Serra nel modello dinamico e nel modello reale – giorno tipo 19 Giugno

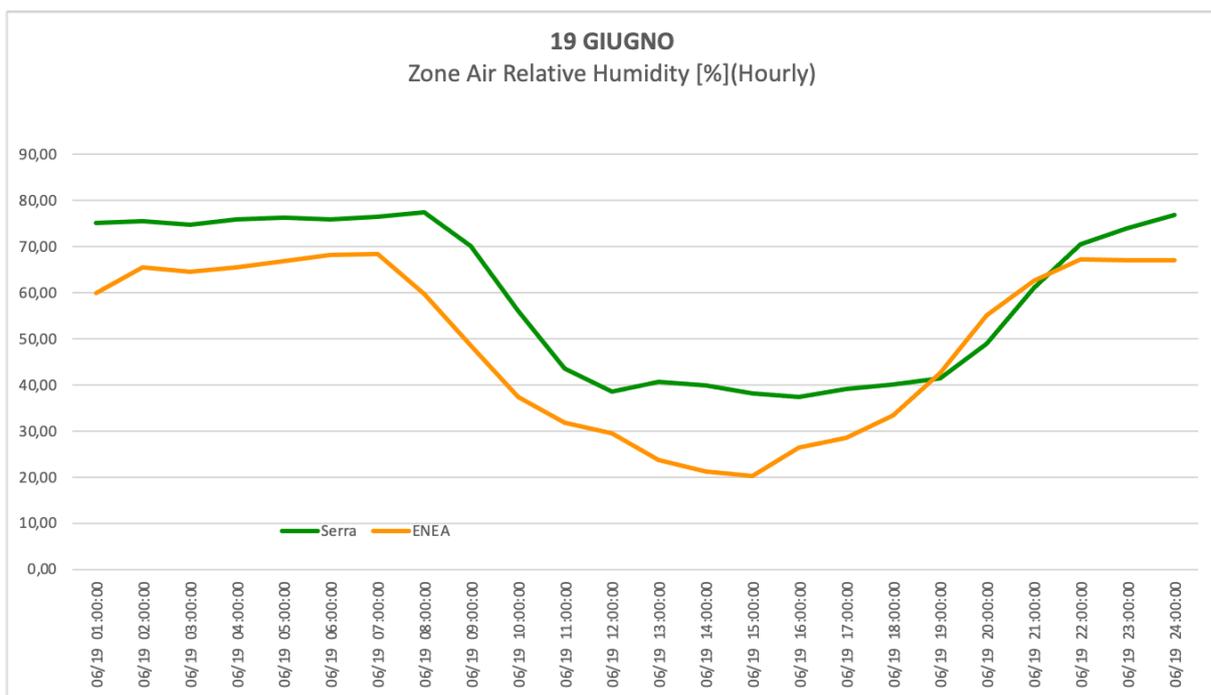


Figura 12 andamento della HR alla Serra nel modello dinamico e nel modello reale – giorno tipo 19 Giugno

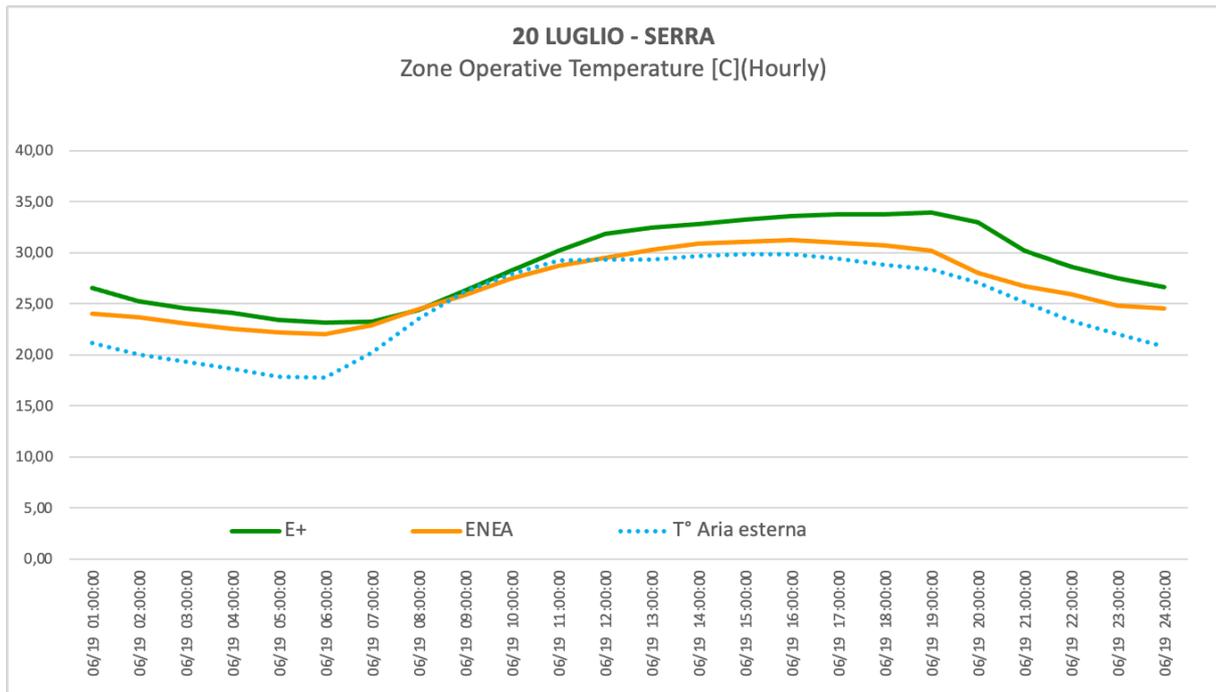


Figura 13 andamento della T° interna alla Serra nel modello dinamico e nel modello reale – giorno tipo 20 Luglio

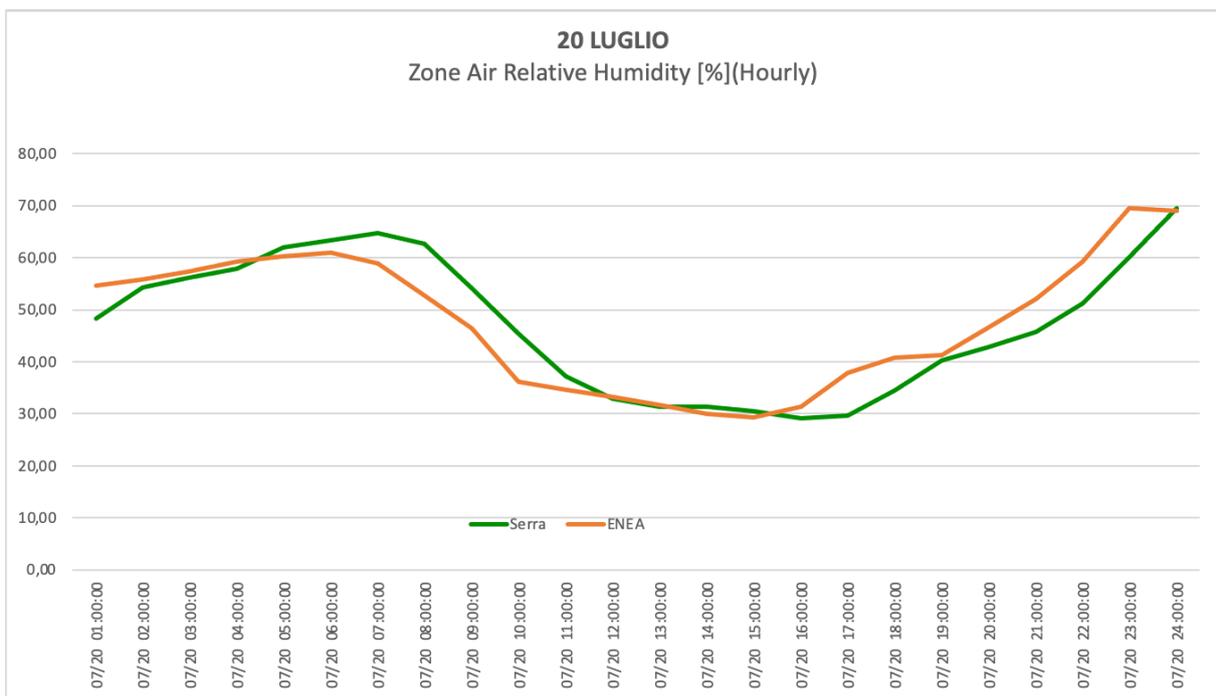


Figura 14 andamento della HR interna alla Serra nel modello dinamico e nel modello reale – giorno tipo 20 Luglio

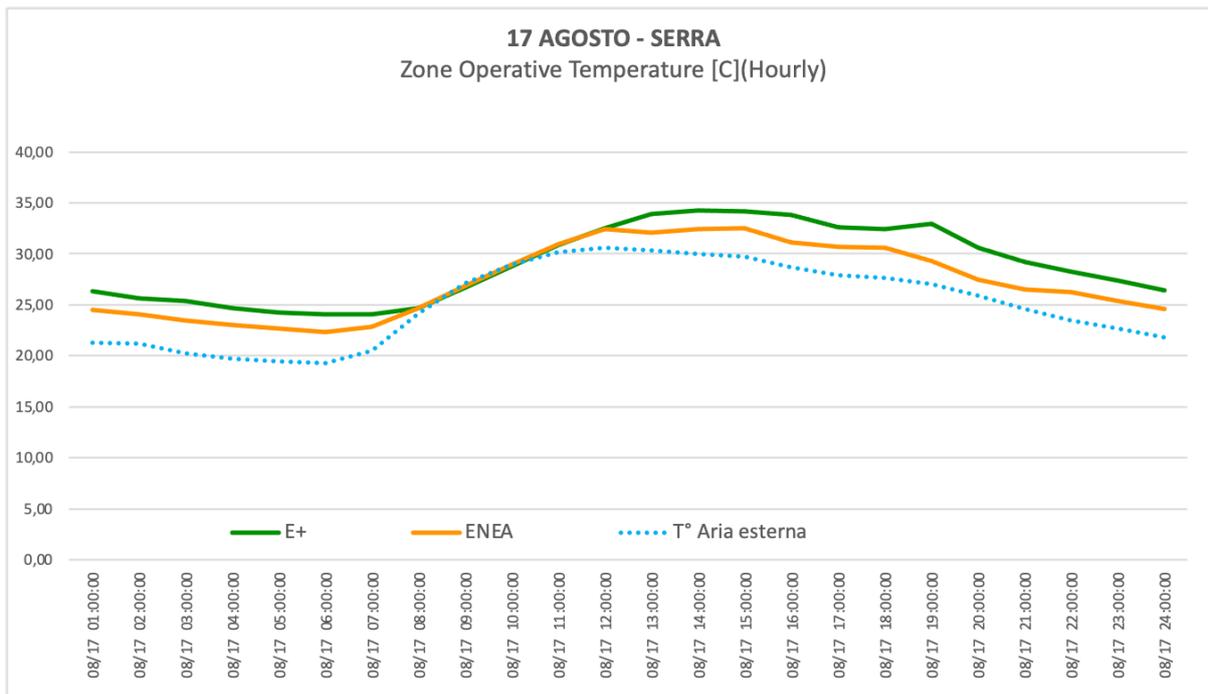


Figura 15 andamento della T° interna alla Serra nel modello dinamico e nel modello reale – giorno tipo 20 Agosto

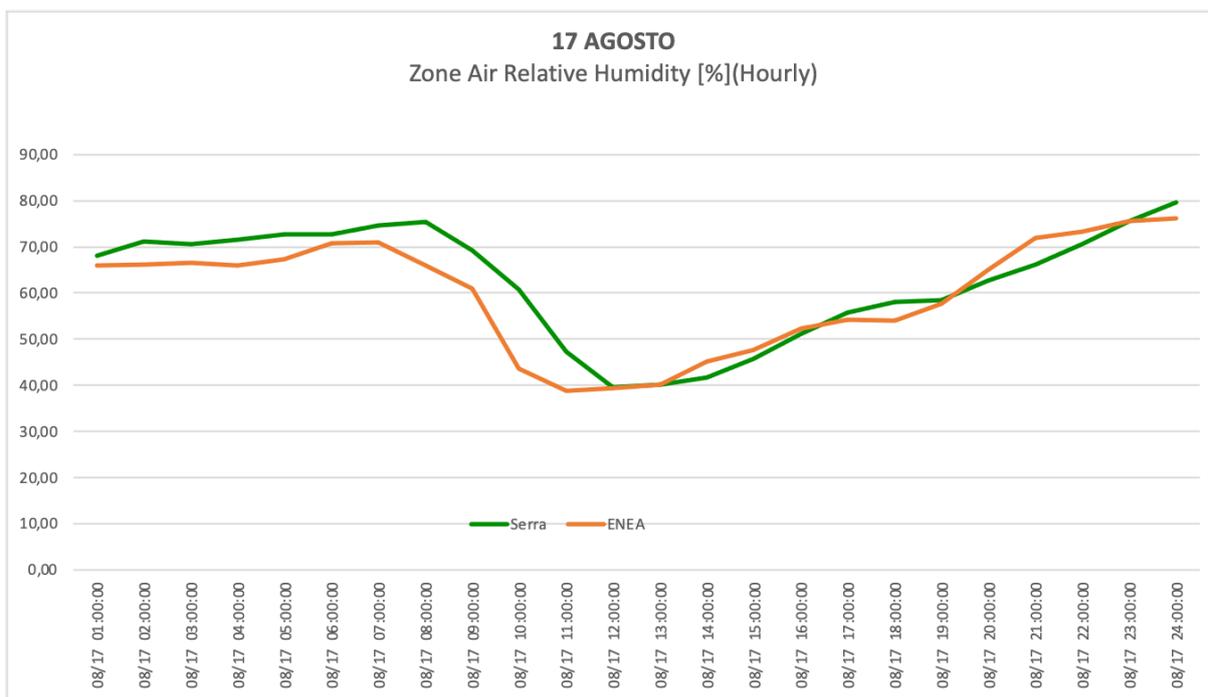


Figura 16 andamento della HR interna alla Serra nel modello dinamico e nel modello reale – giorno tipo 20 Agosto

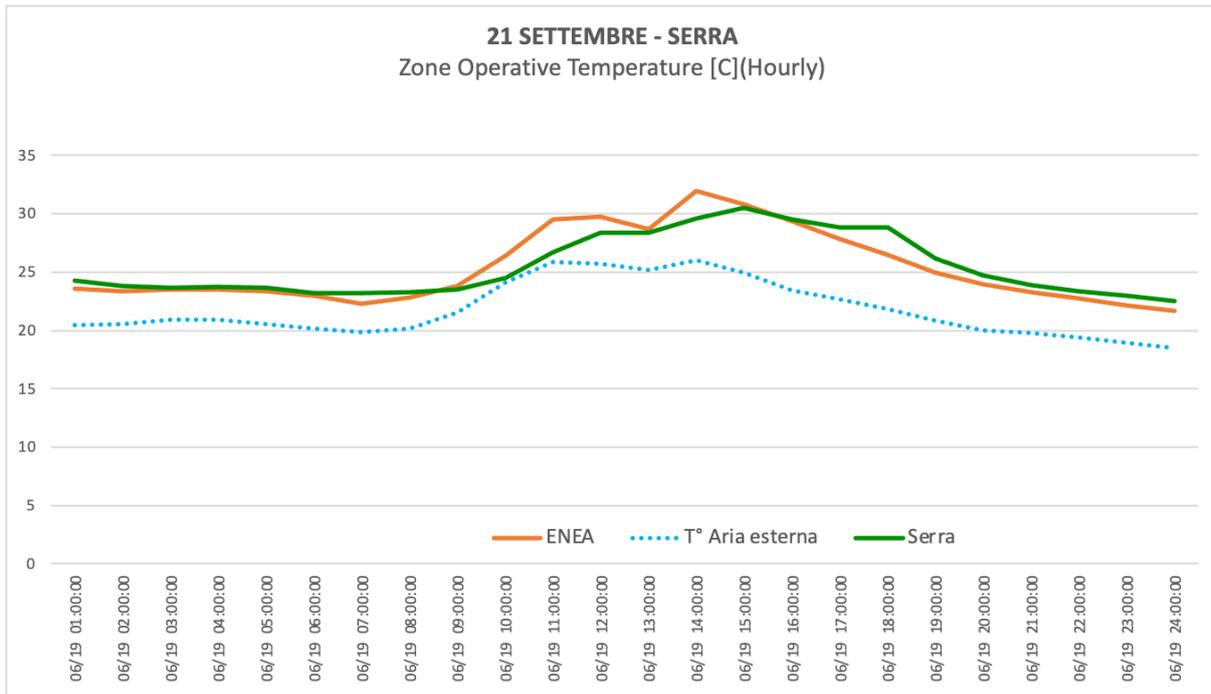


Figura 17 andamento della T° interna alla Serra nel modello dinamico e nel modello reale – giorno tipo 20 Settembre

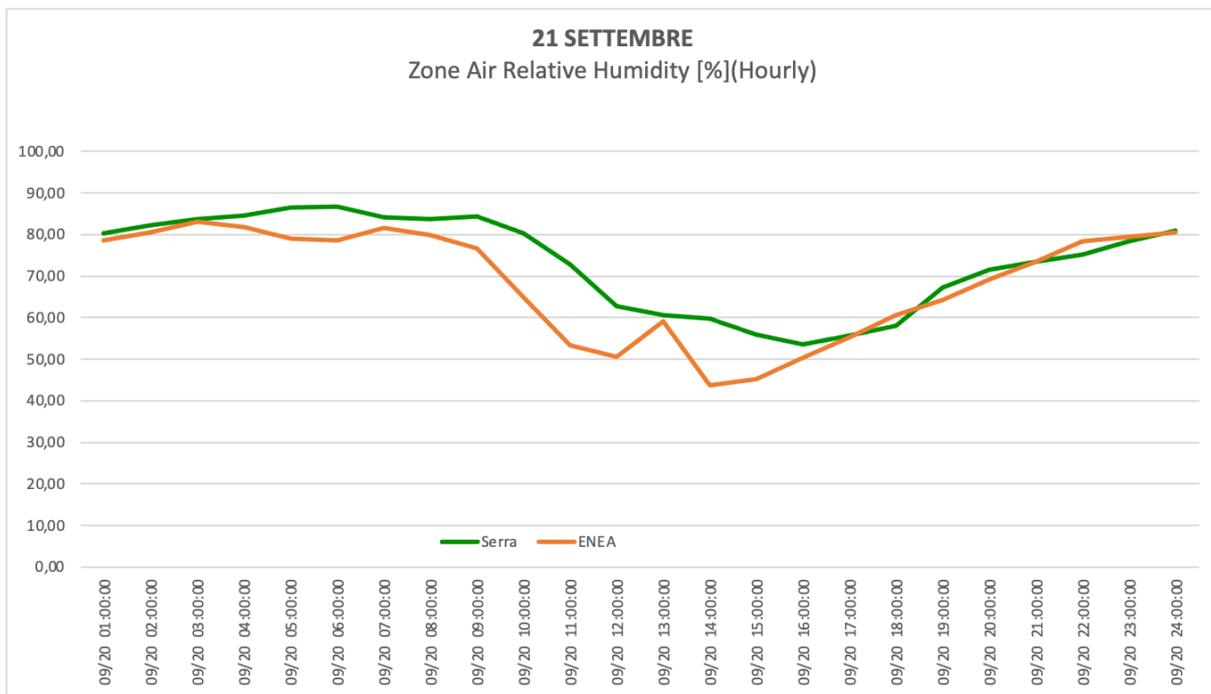


Figura 18 andamento della HR interna alla Serra nel modello dinamico e nel modello reale – giorno tipo 20 Settembre

I dati simulati tramite Energy+ generalmente sovrastimano l'umidità relativa. Questo dato è però da associare alla concomitanza di una leggera brezza che investe la parete finestrata (venti prevalenti di SW con velocità media 10-18 km/h) quasi sempre presente. Si dovranno quindi valutare attentamente i valori dei flussi di massa interni (vapore generato) e uscenti (dovuti alla ventilazione naturale) dalla serra durante le fasi diurne e notturne per cercare di calibrare i parametri del modulo *Natural Ventilation – Airflow Network*.

2.5. Simulazione del contributo evapotraspirativo: analisi critica

Una volta validato il modello, si è pertanto creato un secondo modello digitale, che, eliminata la presenza delle piante ma lasciati inalterati gli altri parametri di comportamento (apertura/chiusure tende, apertura/chiusura finestre e porte), potesse consentire una valutazione del contributo offerto dalla presenza degli elementi vegetali al controllo del microclima interno.

I risultati del confronto sono riportati in forma di grafici e istogrammi in Tabella 3, Tabella 4 e Tabella 5.

Tabella 3 Grafici a confronto dell'andamento della T° interna della serra in presenza o in assenza di elementi vegetali

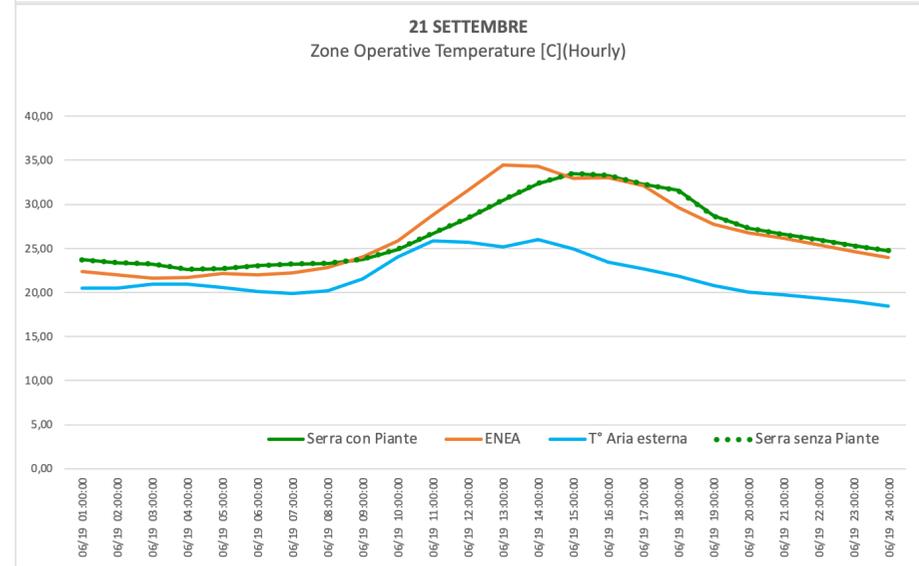
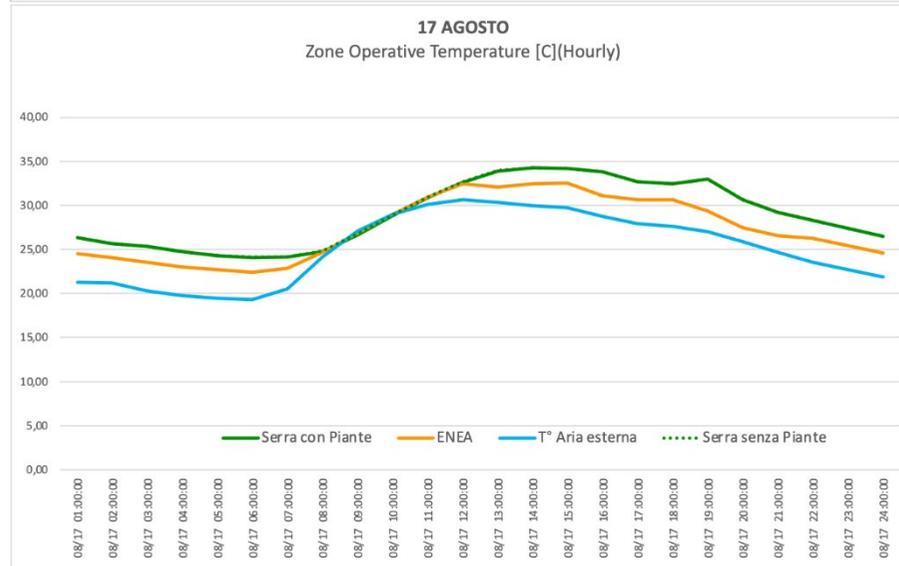
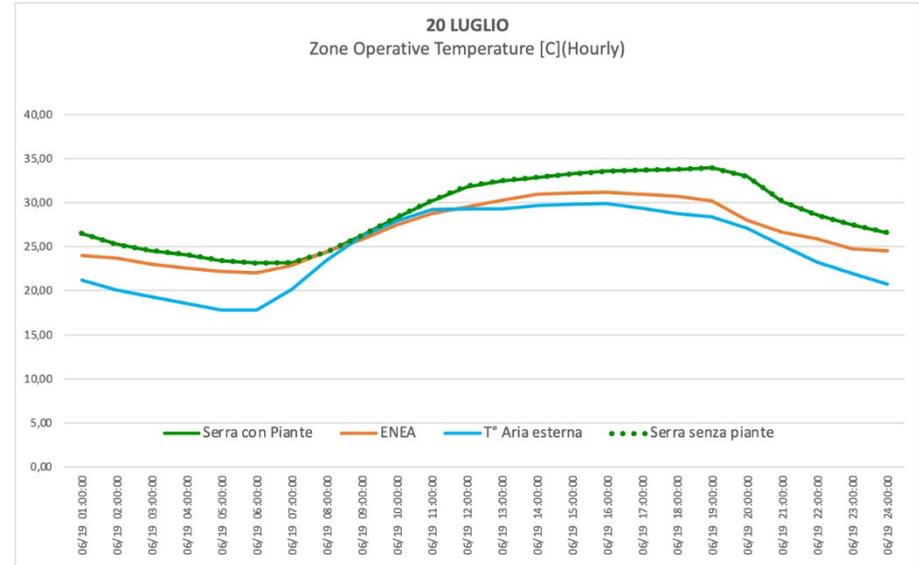
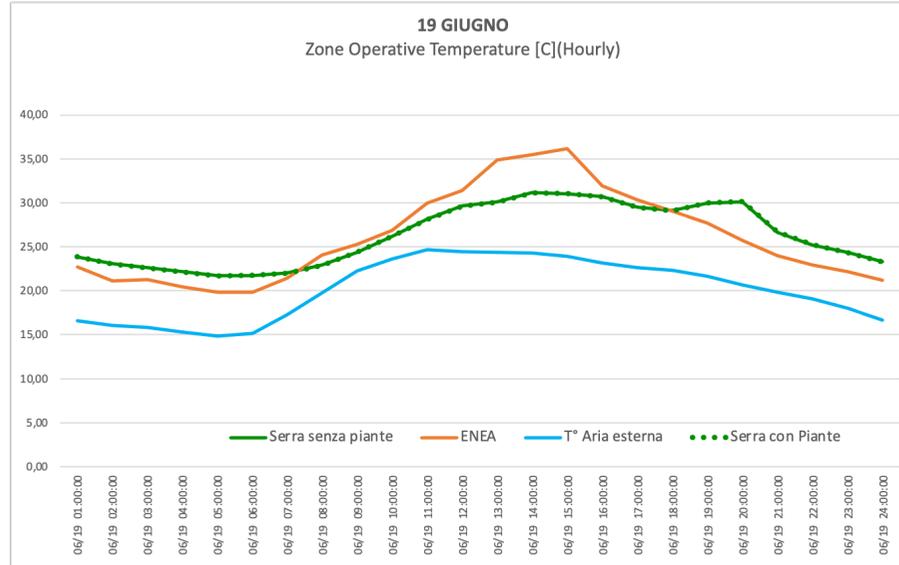


Tabella 4 Grafici a confronto dell'andamento della HR della serra in presenza o in assenza di elementi vegetali

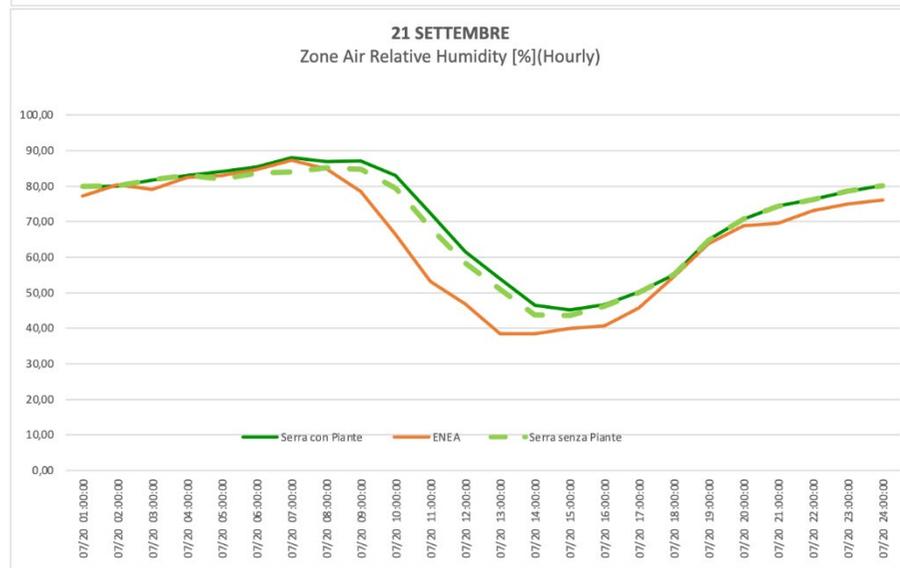
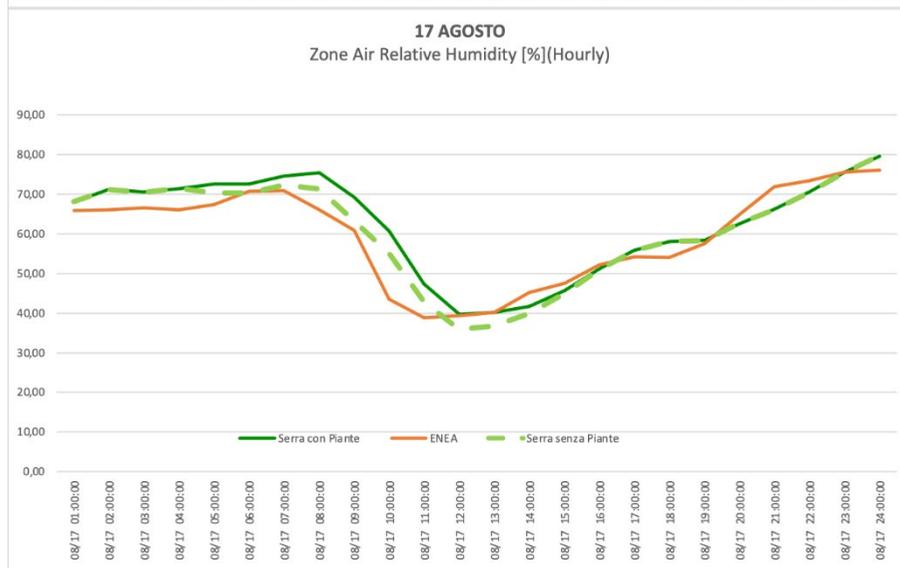
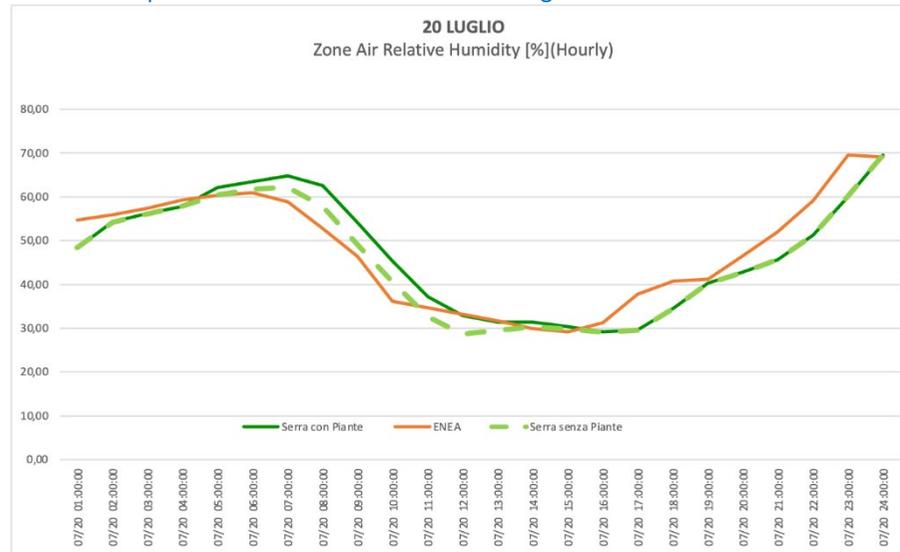
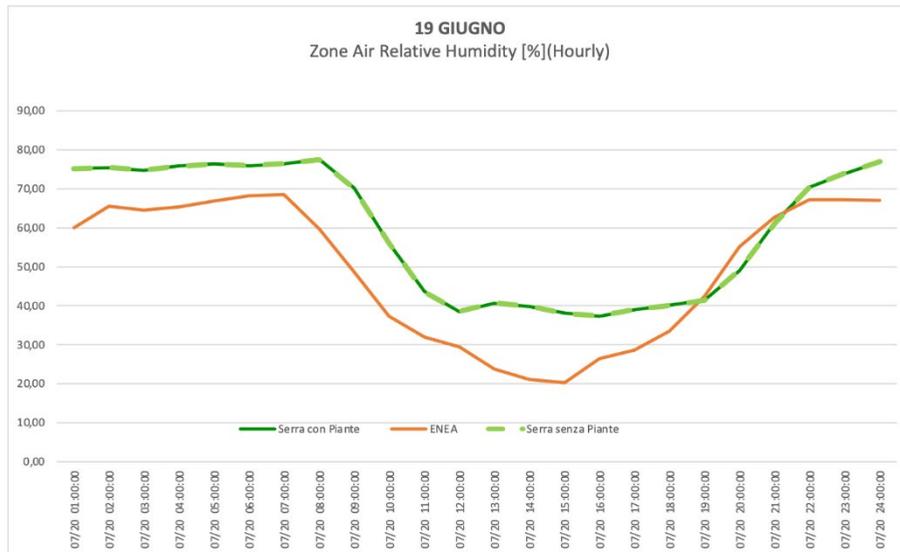
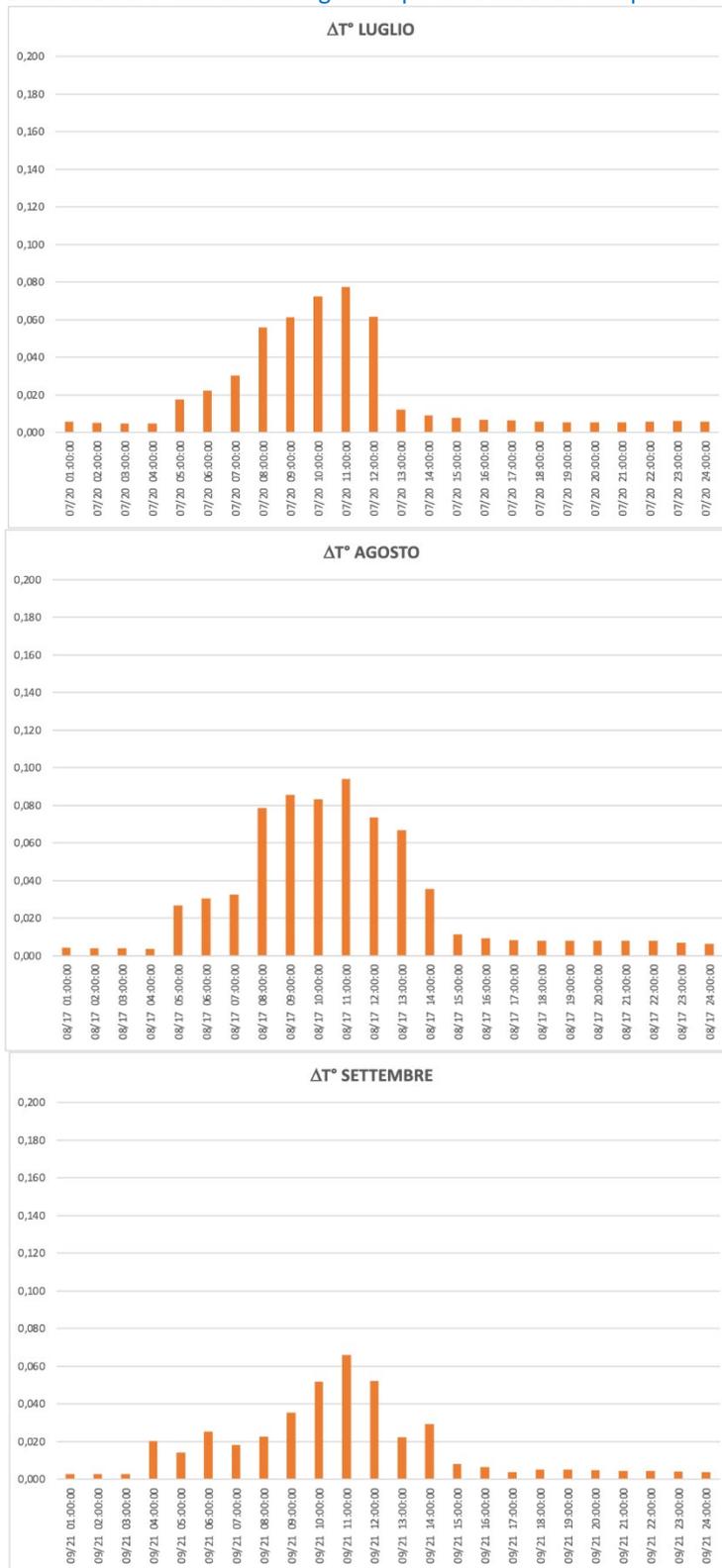


Tabella 5 Differenza di T° misurata nei giorni tipo tra il modello con piante e il modello senza piante



maggiore sviluppo dell'apparato fogliare. L'analisi comparativa delle simulazioni in presenza di piante ed in loro assenza mostra che il processo di evapotraspirazione è apprezzabile ma che, vista la sua modesta entità, l'effetto evapotraspirativo sul controllo della T° ambiente è trascurabile.

3. Conclusioni

Il modello creato per simulare il comportamento evapotraspirativo del sistema di piante in vaso, messe a dimora nella serra bioclimatica, ha dato risultati apprezzabili soprattutto per quanto riguarda la stima delle temperature e in misura minore delle umidità relative. Il modulo di Energy Plus denominato 'Water Use: equipment' è in grado di trasferire in modo semplice il fenomeno assai complesso della evapotraspirazione. Al contempo, l'aver impiegato per la simulazione del processo evaporativo un dato mediato, ricavato dalle pesature eseguite solo nella parte centrale della giornata durante il corso del monitoraggio, ha sicuramente limitato l'accuratezza del calcolo. Per poter inserire nel suddetto modulo un andamento sperimentalmente misurato della evapotraspirazione, sarebbe necessario effettuare le pesate a cadenza oraria. Tale operazione potrebbe essere evitata adottando per il calcolo della Evapotraspirazione l'equazione di Penman-Monteith attraverso l'inserimento nell'equazione del coefficiente correttivo Kc, della fisiologia specifica di ogni diversa specie vegetale, ma questa scelta comporterebbe una incertezza assai maggiore viste le limitate dimensioni della serra bioclimatica che contrastano con le ipotesi applicative della equazione stessa

Il modesto contributo al controllo microclimatico sembra anche dovuto ad un numero limitato di piante poste a dimora ed aventi un LAI (Leaf Area Index) non elevato, come si evince anche dalle immagini. Si auspica un maggior ricorso alla vegetazione, nel prosieguo di questo secondo anno, onde verificare se il fenomeno sia di fatto trascurabile rispetto al controllo del microclima della stanza prospiciente la serra o se, incrementando la superficie foliare e la copertura vegetale, si possa ottenere un risultato più significativo.

É altresì vero che la schermatura costante dell'interno della serra, con la tenda a copertura totale della vetrata trasparente inclinata e a copertura parziale (per metà) della vetrata verticale esposta a Ovest, hanno sensibilmente limitato l'attività fotosintetica da un lato e, dall'altro, influenzato la dispersione del calore accumulato durante le ore diurne verso l'ambiente notturno più fresco.

Analogamente, l'apertura costante delle finestre durante il giorno e la notte, per un periodo continuativo dal 14 Luglio al 25 Settembre, quindi direttamente esposte ai venti prevalenti di SW (velocità media 10-18 km/h) può aver condizionato i normali processi evapotraspirativi.

Di conseguenza, il modello di fatto non rappresenta uno scenario d'uso comune e si auspica pertanto di poter costruire nella seconda fase del progetto uno schema di comportamento che, da un lato rappresenti una situazione reale di uso in ambiente ufficio (es. con apertura chiusura delle finestre, apertura chiusura delle tende in relazione allo svolgimento delle attività lavorative), dall'altra possa consentire un rilevamento più preciso del processo evaporativo attraverso pesature multiple, a coperta dell'intero periodo di analisi.

4. Riferimenti bibliografici

1. A. Priarone et al., "Energy demand hourly simulations and energy saving strategies in greenhouses for the Mediterranean climate", *Journal of Physics: Conference Series*, 796, (2017)
2. Fabrizio E 2012 "Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection", *Energy and Buildings*, 53, pp 57-63
3. N.Y Dahlan, A. Amiruddin, N. Duc Luong , S. Z. Sakimin, "Energy and Climate Analysis of Greenhouse System for Tomatoes Cultivation using CFD and Open Studio Energy Plus Software", *International Journal of Engineering & Technology*, 7, (2018) pp 183-186

4. Taehwan Ha, In-bok Lee, Kyeong-seok Kwon, Se-Woon Hong, "Computation and field experiment validation of greenhouse energy load using building energy simulation model", *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 8 No.6 , December, 2015
5. F. Léveillé-Guillemette, D. Monfet, "Comparison of different mechanical systems models for a passive solar greenhouse with two thermal zones", *Conference eSim2016*, May 2016
6. Md Shamim Ahamed, Huiqing Guo, Karen Tanino, "A quasi-steady state model for predicting the heating requirements of conventional greenhouses in cold regions", *Information Processing In Agriculture 5*, 2018, pp 33–46
7. M. Taki, A. Rohani, M. Rahmati-Joneidabad, "Solar thermal simulation and applications in greenhouse", *Information Processing In Agriculture 5*, 2018, pp 83–113
8. A. M. Abdel-Ghany,^{1,2} I. M. Al-Helal,¹ and M. R. Shady, "Effect of the Evaporative Cooling on the Human Thermal Comfort and Heat Stress in a Greenhouse under Arid Conditions", *Advances in Meteorology Volume 2013*, Article ID 361471
9. C. Baglivo, D. Mazzeo, S. Panico, S. Bonuso, N. Matera, P. M. Congedo, G. Oliveti, "Data from a dynamic simulation in a free-floating and continuous regime of a solar greenhouse modelled in TRNSYS 17 considering simultaneously different thermal phenomena", *Data in Brief 33*, 2020
10. C. Baglivo, D. Mazzeo, S. Panico, S. Bonuso, N. Matera, P. M. Congedo, G. Oliveti, "Complete greenhouse dynamic simulation tool to assess the crop thermal well-being and energy needs", *Applied Thermal Engineering*, 2020
11. N. Choab, A. Allouhi, A. El Maakoul, T. Kousksou, S. Saadeddine, A. Jamil, "Review on greenhouse microclimate and application: design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies", *Solar Energy 191*, 2019, pp109–137,
12. D. Ramon, K. Allacker, N. P. M. van Lipzig, Frank De Troyer, "Future Weather Data for Dynamic Building Energy Simulations: Overview of Available Data and Presentation of Newly Derived Data for Belgium", *Energy Sustainability in Built and Urban Environments*, 2019, pp.111-138
13. V. Nik, "Making energy simulation easier for future climate – Synthesizing typical and extreme weather data sets out of regional climate models (RCMs)", *Applied Energy* n. 177, September 2016, pp 204-226
14. I. J. Hall, R. R. Prairie, H. E. Anderson, and E. C. Boes, 'Generation of a typical meteorological year', Sandia Labs., Albuquerque, NM (USA), SAND-78-1096C; CONF-780639-1, Jan. 1978.
15. C. Bibbiani, F. Fantozzi, C. Gargari. Studio di un prototipo di serra bioclimatica per l'efficienza e la sostenibilità energetica. Report RdS/PAR2017/095
16. Caiqing Yang, Bin Zhao, "Research on Flow Resistance Characteristics with Different Window/Door Opening Angles", *HVAC&R RESEARCH* Volume 16 n. 6, November 2010