



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile**

**VALUTAZIONE SPERIMENTALE DI SISTEMI WATER  
MIST PER LA MITIGAZIONE DELL'ISOLA DI CALORE**

*Experimental evaluation of water mist systems  
for heat island mitigation*

*Relatore:*

Prof. Ing. Arch. Marco D'Orazio

*Candidata:*

Lucrezia Lazzarini

*Correlatori:*

Prof. Ing. Costanzo Di Perna

Prof.ssa Ing. Elisa Di Giuseppe

**ANNO ACCADEMICO 2020/2021**



## Indice

|   |     |
|---|-----|
| 1. Introduzione .....   | 5   |
| 2. Stato dell'arte .....  | 7   |
| 2.1 Il surriscaldamento globale .....   | 7   |
| 2.2 “Isola di Calore” e surriscaldamento urbano .....                           | 10  |
| 2.3 Il raffrescamento evaporativo come strategia di adattamento .....           | 12  |
| 3. Fasi, Materiali e Metodi .....   | 31  |
| 3.1 Fasi.....   | 31  |
| 3.2 Materiali.....  | 32  |
| 3.2.1 Struttura sperimentale .....  | 32  |
| 3.2.2 Impianto di raffrescamento .....  | 37  |
| 3.2.3 Impianto fotovoltaico .....   | 44  |
| 3.2.4 Sensori.....  | 54  |
| 3.3 Metodi.....   | 65  |
| 3.3.1 Raccolta e analisi dei dati.....  | 65  |
| 3.3.2 Valutazione del comfort tramite questionari.....                          | 71  |
| 3.3.3 Test statistici.....  | 80  |
| 4. Risultati.....   | 84  |
| 4.1 Impatto sul microclima locale in relazione alle variabili progettuali ..... | 84  |
| 4.1.1 Sintesi sull'efficienza delle configurazioni .....                        | 85  |
| 4.1.2 Configurazioni in cui varia il tipo di controllore .....                  | 87  |
| 4.1.3 Configurazioni in cui varia l'altezza degli ugelli .....                  | 100 |
| 4.1.4 Configurazioni in cui variano i teli di schermatura.....                  | 118 |
| 4.1.5 Configurazioni in cui varia l'interasse degli ugelli .....                | 127 |
| 4.2 Analisi dei dati climatici nei giorni dei questionari .....                 | 136 |
| 4.3 Analisi dei dati personali dei questionari.....                             | 139 |
| 4.3.1 Genere .....  | 139 |
| 4.3.2 Gravidanza .....  | 140 |
| 4.3.3 Altezza.....  | 140 |
| 4.3.4 Peso .....  | 141 |
| 4.3.5 Età .....   | 142 |
| 4.3.6 Stato di salute .....   | 142 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.3.7 Attività.....  | 142 |
| 4.3.8 Abbigliamento.....                                     | 143 |
| 4.3.9 Tempo speso all'aria aperta.....                       | 145 |
| 4.4 Analisi globale dei risultati dei questionari .....      | 146 |
| 4.4.1 TVS .....  | 147 |
| 4.4.2 Sudore .....   | 148 |
| 4.4.3 Umidità.....   | 149 |
| 4.4.4 CVS .....  | 150 |
| 4.4.5 Soddisfazione .....                                    | 151 |
| 4.4.6 Contatto tra le particelle di nebbia e la pelle.....   | 152 |
| 4.5 Analisi dei voti di comfort tenendo conto del tempo..... | 153 |
| 4.5.1 TSV .....  | 154 |
| 4.5.2 Sudore .....   | 155 |
| 4.5.3 Umidità.....   | 157 |
| 4.5.4 CSV .....  | 158 |
| 4.5.6 Soddisfazione .....                                    | 160 |
| 4.6 Differenze del campione tra maschi e femmine .....       | 160 |
| 4.6.1 TSV .....  | 161 |
| 4.6.2 Sudore .....   | 162 |
| 4.6.3 Umidità.....   | 163 |
| 4.6.4 CSV .....  | 164 |
| 4.6.5 Soddisfazione .....                                    | 165 |
| 4.6.6 Contatto Particelle-Pelle.....                         | 166 |
| 5. Conclusioni .....   | 168 |
| Bibliografia.....  | 171 |



# 1. Introduzione

La temperatura media della Terra sta aumentando velocemente e questo provoca grandi cambiamenti nel clima di ogni parte del mondo.

Il calore è una delle principali minacce climatiche ed è rilevante in maniera specifica per le città; l'aumento della temperatura nelle aree urbane più densamente popolate si sta muovendo più rapidamente rispetto alle zone rurali.

Questa tesi presenta uno studio sperimentale finalizzato a valutare una strategia di adattamento al surriscaldamento basata sul raffrescamento evaporativo, per il miglioramento del comfort e della vivibilità degli individui in ambienti urbani all'aperto durante tipiche calde giornate estive.

Nella città di Ancona, nei pressi del polo di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, è stata realizzata una struttura dotata di un insieme di ugelli nebulizzanti acqua (sistema "water-mist"), che può essere impiegata in aree di permanenza quali pensiline, zone di accesso a musei, parchi pubblici, pergolati di bar e ristoranti. L'effetto benefico delle particelle d'acqua a contatto con la pelle è dato dalla sensazione di fresco, ottenuta senza elevare considerevolmente i livelli di umidità, dato il piccolo diametro degli ugelli e conseguentemente delle particelle d'acqua.

Gli obiettivi di questa tesi sono: valutare l'efficacia del sistema water-mist realizzato, anche in diverse configurazioni progettuali studiate; e registrare le sensazioni di comfort di un campione di individui nell'ambiente naturale indisturbato e in quello nebulizzato, in termini di temperatura, umidità, sudorazione e soddisfazione globale per il sistema. In relazione al primo obiettivo, durante due mesi estivi del 2021, si sono investigate sette diverse configurazioni, misurando le grandezze climatiche dell'ambiente indisturbato e di quello nebulizzato, e in particolare: temperatura  $T$  [ $^{\circ}C$ ] e umidità relativa  $RH$  [%], radiazione solare media  $I_g$  [ $W/m^2$ ] e velocità del vento  $w_s$  [ $m/s$ ]. A proposito della valutazione del comfort, a cinquantatré soggetti è stato richiesto di permanere un certo lasso di tempo in entrambi gli ambienti e sono stati sottoposti questionari per valutare lo stato di benessere in relazione ai dati microclimatici registrati.

La presente tesi si articola come di seguito.

Inizialmente è stato studiato quanto disponibile in letteratura sull'argomento. All'interno del *capitolo 2 – “Stato dell'Arte”* sono stati inquadrati in maniera generale i problemi relativi ai cambiamenti climatici e al riscaldamento globale. Inoltre, è stata condotta una rassegna degli articoli scientifici sul tema del water-mist, che hanno contribuito a definire le modalità di prova della sperimentazione realizzata.

Il *capitolo 3 – “Fasi, materiali e metodi”* descrive i passaggi che hanno reso possibile l'intera sperimentazione: l'ordine in cui si è deciso di operare, il set-up di tutta la struttura e i metodi che sono stati scelti per realizzare i test e successivamente analizzare i dati.

Il *capitolo 4 – “Analisi dei risultati”* mostra come sono stati analizzati i dati e quali risultati sono stati ottenuti. Si divide principalmente in due parti: la prima è relativa al confronto tra i vari layout operativi, attraverso il quale si cerca di trovare la soluzione migliore in termini di raffrescamento. La seconda parte è relativa ai questionari posti agli utenti per la valutazione del comfort, l'analisi dei voti espressi ha permesso di capire se la soluzione di mitigazione dell'isola di calore proposta è efficace in termini di miglioramento del comfort.

All'interno del *capitolo 5 – “Conclusioni”* si trova una sintesi di quanto osservato in questa sperimentazione, individuando i punti di forza e i punti di debolezza, così da creare nuovi spunti per il futuro.

## 2. Stato dell'arte

### 2.1 Il surriscaldamento globale

I cambiamenti climatici sono un serio problema di questo XXI secolo. Non è la prima volta che il nostro Pianeta è soggetto al “riscaldamento globale”, ma in questo ultimo periodo non parliamo di lenti processi naturali, in quanto la grande crescita della popolazione e la tendenza all'urbanizzazione hanno un grande impatto sui nostri ecosistemi urbani. [1]

Secondo l'ultimo rapporto del Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC), pubblicato lunedì 9 agosto 2021, gli scienziati rilevano cambiamenti nel clima della Terra in ogni regione e in tutto il sistema climatico. Molti di questi cambiamenti sono senza precedenti e irreversibili in migliaia di anni.

Il rapporto fornisce nuove stime sulla possibilità di superare il livello di riscaldamento globale di 1,5°C nei prossimi decenni e prevede la necessità di limitare subito le riduzioni delle emissioni di gas serra.

Dalle analisi del rapporto emerge che nei prossimi decenni è atteso in tutte le regioni un aumento dei cambiamenti climatici. Con 1,5°C di riscaldamento globale, ci si affaccia a stagioni calde più lunghe e stagioni fredde più brevi. Se il riscaldamento globale arrivasse a 2°C, si arriverebbe a temperature critiche per l'agricoltura e la salute.

La temperatura non sarà l'unico problema a cui andremo incontro. I cambiamenti climatici stanno intensificando il ciclo dell'acqua, stanno influenzando gli andamenti delle precipitazioni. Nelle aree costiere ci si attende un continuo aumento del livello del mare, che causerebbe inondazioni costiere più frequenti ed erosione delle coste. [2]

Il calore minaccia prepotentemente il nostro clima, soprattutto quello delle città, dove alcuni aspetti dei cambiamenti climatici possono risultare amplificati, in quanto la temperatura delle zone urbane più densamente popolate sta crescendo più velocemente rispetto alle zone rurali. Questo effetto viene chiamato Urban Heat Island (UHI) (isola di calore urbana).

I gas serra sono gas naturalmente presenti nella nostra atmosfera in piccole quantità che trattengono una parte dei raggi solari riflessi dalla superficie terrestre e di conseguenza anche una parte di calore. Il più importante gas serra naturale è il vapore acqueo atmosferico, che è in gran parte responsabile del clima favorevole del pianeta che altrimenti sarebbe di circa 18 K più fresco. Una concentrazione pari a circa 305 ppm di gas serra nell'atmosfera è considerata normale, in quanto permette di avere una temperatura media terrestre confortevole per l'essere umano. L'effetto serra sarebbe pertanto un meccanismo "naturale", se non fosse che negli ultimi 200 anni, con la diffusione delle industrie, delle automobili e del riscaldamento delle abitazioni, è aumentato l'uso di combustibili fossili. Questi ultimi, carbone, petrolio e derivati, quando vengono bruciati emettono gas serra come anidride carbonica  $\text{CO}_2$  e metano  $\text{CH}_4$ , che vanno ad aggiungersi a quelli già presenti nella nostra atmosfera (portando la concentrazione oltre le 400 ppm) rendendola più densa: così la Terra trattiene più calore del necessario e ne deriva un aumento della temperatura.

L'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) è il più importante gas a effetto serra. La principale fonte di  $\text{CO}_2$  è la combustione di combustibili che contengono carbonio fossile. Nel processo di combustione, questo carbonio viene rilasciato nell'atmosfera sotto forma di  $\text{CO}_2$ . Tra il 30-40% delle emissioni globali di  $\text{CO}_2$  legate ai combustibili fossili provengono direttamente dalle aree urbane, e oltre il 70% sono causati dalle esigenze energetiche della popolazione urbana. [3]

Non tutti i combustibili hanno la stessa efficienza energetica; i carboni, seguiti dalla benzina, producono le più alte emissioni di  $\text{CO}_2$ , mentre quando si brucia gas naturale si hanno meno emissioni. I fattori di emissione cambiano anche in base alla posizione geografica e alla raffinatezza con la quale viene trattato. Il gas idrogeno ad oggi è l'unico combustibile "pulito", la sua combustione non genera  $\text{CO}_2$  ma solo vapore acqueo.

Il metano  $\text{CH}_4$  è il secondo gas serra più rilevante nell'atmosfera. Il 70% di tutte le emissioni antropogeniche di  $\text{CH}_4$  è causato da processi biogenici che avvengono nelle risaie, nel bestiame, nelle discariche e negli impianti di trattamento delle acque reflue. Il restante 30% proviene da fonti non biogeniche quali per esempio l'estrazione e la combustione di combustibili fossili. A livello globale il consumo di  $\text{CH}_4$  è più che raddoppiato rispetto all'era preindustriale e una buona percentuale è direttamente

attribuibile ai processi nelle città. Wunch et al. (2009) [4] hanno preso in considerazione le emissioni di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> di Los Angeles, per suggerire che il contributo urbano alle emissioni globali di metano antropico può essere del 12-34%.

Le emissioni dirette di metano nelle aree urbane possono essere attribuite a tre cause: le perdite nelle reti di distribuzione urbana di gas naturale (che contiene l'80% di metano); la combustione di benzina, gas naturale, petrolio e carbone; la respirazione microbica anaerobica (nelle discariche e negli impianti di depurazione).

A livello globale, le emissioni di CH<sub>4</sub> provenienti dalle discariche e dalle acque reflue rappresentano attualmente circa il 90% delle emissioni del settore dei rifiuti, ossia circa il 18% delle emissioni globali di CH<sub>4</sub> di origine antropica.

Altri gas a effetto serra responsabili del Cambiamento Climatico Globale sono il protossido di azoto (N<sub>2</sub>O), che viene emesso nelle città come sottoprodotto della combustione del carburante, principalmente da veicoli con convertitori catalitici, ma anche dall'uso di fertilizzanti in spazi urbani verdi; l'ozono (O<sub>3</sub>), che è strettamente associato alle emissioni veicolati nelle città e composti alogenati (CFC, HFC) che provengono da fonti industriali e di consumo.

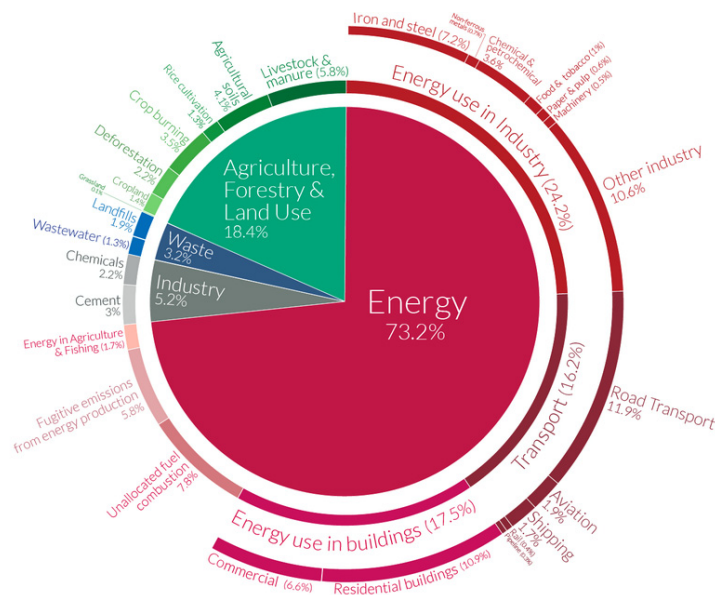


Fig.1 - Ripartizione delle emissioni totali di gas serra su scala planetaria, con riferimento al 2016. [Pubblicazione grafico: Our World in Data]

## 2.2 “Isola di Calore” e surriscaldamento urbano

Anni di ricerche hanno dimostrato come nelle città le temperature siano quasi sempre più elevate rispetto all’ambiente circostante. Questo fenomeno è denominato “Isola di Calore Urbano” (Urban Heat Island – UHI) ed è uno degli esempi di come il clima cambia involontariamente a causa dell’uomo. [3]

Le temperature all’interno dell’UHI sono superiori e possono raggiungere picchi di 7-12°C in più rispetto l’ambiente indisturbato [5]. Questa differenza di temperatura dipende proprio dalla morfologia dell’ambiente urbano che è costituito prevalentemente da edifici, strade e superfici pavimentate; elementi che, oltre a ostacolare il vento e a sottrarre spazio alle aree verdi, assorbono gran parte della radiazione solare durante il giorno e la riemettono durante la notte non permettendo il raffrescamento della città nelle ore notturne.

Le cause di fondo della UHI sono i cambiamenti che lo sviluppo urbano apporta al bilancio energetico del sito preurbano su cui è costruita la città.

Esistono diversi tipi di UHI, ciascuno dei quali è temporalmente e spazialmente dinamico; ciascuno di essi risponde a un diverso insieme di scale, è causato da una diversa miscelazione di processi e richiede diversi schemi di monitoraggio per misurarlo e modelli per simularlo. Pertanto, non si dovrebbe vagamente fare riferimento alle UHI come se si trattasse di un fenomeno unitario, ma piuttosto identificare quale tipo viene misurato, descritto, interpretato o modellato.

Le differenti tipologie di UHI sono:

- Isola di calore atmosferica (atmospheric UHI - AUHI), ulteriormente distinta in:
  - Boundary Layer Urban Heat Island (BLUHI), che interessa lo strato limite urbano (UBL), situato al di sopra dell’altezza media degli edifici
  - Canopy Layer Urban Heat Island (CLUHI), che riguarda lo strato della copertura urbana (UCL), ubicato sotto l’altezza media degli edifici
- Isola di calore di superficie (Surface UHI – SUHI)
- Isola di calore del sottosuolo (subsurface UHI).

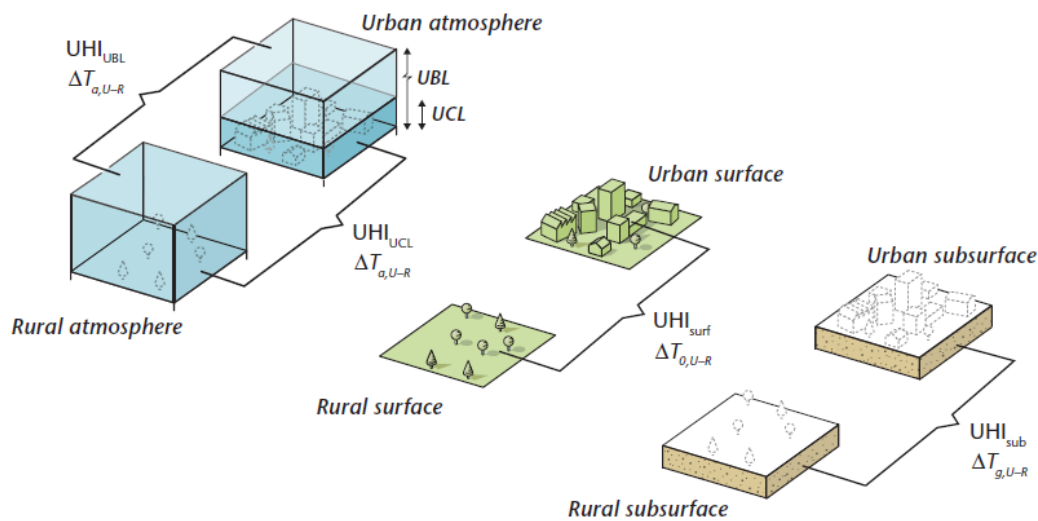


Fig. 2 - Illustrazione delle differenze di temperatura che formano i quattro tipi di UHI. [3]

Il maggior assorbimento della radiazione solare dell'ambiente urbano rispetto a quello rurale è originato dai materiali di rivestimento degli edifici e dall'asfalto delle strade che sono caratterizzati da una maggiore inerzia termica, da un basso coefficiente di albedo e da un basso fattore di vista con il cielo. A questi fattori bisogna aggiungere il calore antropico cioè quello derivante dalle attività umane soprattutto legate ai veicoli e agli impianti ad aria condizionata.

L'esistenza dell'UHI influisce dunque sulle esigenze di riscaldamento e raffreddamento. Tutto questo aumenta le sollecitazioni termiche sull'uomo durante gli eventi delle ondate di calore, spingendo una notevole ricerca sui modi per mitigare gli aspetti delle UHI nelle città attraverso misure di progettazione urbana. Le soluzioni che possono essere adottate sono molteplici: incrementare le aree verdi nell'ambiente urbano così da ripristinare in parte l'equilibrio naturale; utilizzare i "Cool Material", ovvero materiali ad alta riflettanza solare ed emissività termica nell'infrarosso che riducono lo scambio termico tra superfici e aria esterna. [6]

La soluzione proposta in questa sperimentazione riguarda l'installazione di impianti di raffrescamento evaporativo.

## 2.3 Il raffrescamento evaporativo come strategia di adattamento

Gli impianti di raffrescamento evaporativo fanno parte delle tecnologie per la mitigazione delle UHI water-based, ovvero impianti basati sulla nebulizzazione di acqua in particelle dal diametro microscopico. L'utilizzo di acqua rappresenta uno dei metodi più antichi per contrastare il caldo e nel tempo sono stati sviluppati svariati impianti sempre più complessi ed efficienti. [7]

Le tecnologie basate sull'uso di acqua raggiungono la più significativa riduzione della temperatura locale attraverso un processo di raffreddamento per evaporazione [8]. Ulpiani et al. nella loro ultima sperimentazione [9], affermano come la nebulizzazione sia una metodologia particolarmente efficiente per il raffrescamento. Secondo gli autori il calo di temperatura potrebbe essere di 7-10 °C in un giorno in cui la temperatura è superiore a 30 °C.

Gli impianti water-mist sono stati utilizzati per creare zone più fresche durante mostre internazionali in città come Osaka (1970), Siviglia (1992), Aichi (2005), e Shanghai (2010). Come mostrano numerosi progetti (l'installazione urbana TVK in Place de la Republique [10], il progetto di rivitalizzazione della città di Atene [11] e lo studio microclimatico in piazza Khan Antoun Bey [12]), l'irrorazione d'acqua ha progressivamente attirato l'attenzione ed è stato considerato un efficace mitigatore dello stress termico.

La tecnica del raffrescamento evaporativo deriva dalla pratica giapponese del XVII secolo di "Uchimizu", che consisteva nello spruzzare acqua piovana/acqua grigia sull'asfalto riscaldato per raffreddare l'aria circostante. La spruzzatura di acqua fine (detta micro-nebbia o nebbia secca) garantisce un'evaporazione rapida e immediata dopo l'iniezione, con minimi consumi di acqua e bassissimi rischi di bagnatura a livello pedonale. Infatti, le goccioline più piccole trascorrono più tempo nell'aria a causa delle forze di attrito, e quindi evaporano più velocemente [13], tendono a rimbalzare piuttosto che a rompersi, senza aderire [14].

La rimozione del calore mediante sistemi di nebulizzazione si basa in gran parte sul cambiamento di fase e solo marginalmente, sul trasferimento di calore convettivo del fluido in movimento (processo simile a quello di umidificazione adiabatica). Per dare una



misura degli ordini di grandezza in gioco, una gocciolina di raggio di 20  $\mu\text{m}$  impiega circa 2 s per evaporare e circa 4 s per produrre un decremento di 5 °C in un ambiente caldo e secco [15].

L'efficienza di questa tecnologia non dipende solo dalla sua progettazione ma anche ovviamente dal contesto climatico in cui si trova: per esempio ha grande importanza la velocità del vento ( $w_s$ ). In generale, l'effetto di raffreddamento è più evidente e facilmente misurabile in condizioni di aria calma, soprattutto nel caso di micro-nebulizzazione, data la facilità con cui l'acqua polverizzata viene intrappolata nel flusso d'aria. La tipologia e la disposizione dell'iniezione dell'ugello devono essere accuratamente selezionate, in modo che le goccioline abbiano una dimensione tale da produrre un calo di temperatura senza effetti sgradevoli di bagnatura. [16]

Per questa tesi innanzitutto sono state lette molteplici pubblicazioni scientifiche sull'argomento, partendo dalla *Review di Giulia Ulpiani* [16]: una revisione sistematica della letteratura sull'uso della nebulizzazione come metodo di mitigazione dell'isola di calore. L'autrice ha raccolto 28 articoli in lingua inglese degli ultimi 20 anni (1999-2019, anno di pubblicazione) sull'utilizzo dei sistemi a spruzzo di nebbia per il raffreddamento dell'aria esterna, consultando quattro database principali: Scimedirect, Scopus, Google Scholar e Web of Science. Ogni studio viene descritto secondo il metodo di indagine, secondo i risultati in termini di raffreddamento, umidificazione e comfort ottenuti, poi viene descritta la novità progettuale.

Gli studi rivisti dimostrano come il raffrescamento a spruzzo si integri in modo efficiente e semplice nelle infrastrutture urbane esistenti o nei progetti di ristrutturazione, in quanto produce elevati impatti locali in modo economicamente efficiente. Unendo tutti i dati sono emerse tre criticità: risulta necessario usare dei protocolli standardizzati per costruire una casistica coerente del potenziale di raffrescamento dei sistemi a spruzzo ed è inoltre necessario ampliare ulteriormente la ricerca per capire quali sono le alternative funzionali e geometriche migliori.

Per quanto riguarda la configurazione del sistema si è arrivati fino all'utilizzo di 136 ugelli, con disposizione prevalentemente verticale, con apertura rivolta verso il basso. L'altezza dal suolo negli studi analizzati variava tra 2,00 e 25,00 m, mediamente venivano

installati a 2,70 m di altezza. L'interasse tra gli ugelli è stato fatto variare da 0,4 a 3,00 m, ma il suo ruolo non è mai stato analizzato.

I risultati raccolti in questa review permettono di tracciare alcune regole preliminari di ottimizzazione del sistema: i sistemi ad alta pressione (~ 3 MPa) dovrebbero essere scelti per generare gocce d'acqua sotto 40 µm di diametro; l'iniezione dovrebbe essere sospesa quando la temperatura ambiente è inferiore a 30°C, umidità relativa superiore al 70% e velocità del vento oltre 3 m/s; dovrebbero esserci dei sistemi di schermatura del vento in modo da avere una brezza dominante di 1 m/s; la logica di controllo dovrebbe essere obbligatoria nei climi umidi e infine il raffreddamento deve essere regolato (modificando la portata o il numero degli ugelli) per poter avere un'ottima azione del sistema.

Nel 2011 *Chen Huang, Dafa Ye, Huizhong Zhao, Tao Liang, Zhifen Lin, Hang Yin, Yang Yang* [17] prevedono e analizzano l'effetto della tecnologia water-mist all'Expo mondiale di Shanghai. La durata dell'Expo va dal 1° Maggio al 31 ottobre 2010, dunque durante il periodo estivo, che a Shanghai è molto caldo e molto umido. Il sistema di raffreddamento a nebbia è stato previsto per l'Expo Axis, un'area di attesa all'aperto alta 10,00 m finalizzata al controllo di sicurezza; in questo modo grazie allo spray gli utenti potranno stare in attesa in una situazione più fresca e confortevole. Nell'estate del 2007 viene scelto un padiglione residenziale da allestire per simulare gli effetti della tecnologia water-mist. Vengono installati 20 ugelli distanti dal suolo 2,50 m e con un interasse tra loro di 0,40 m. Il sistema viene attivato dalle 13:40 alle 14:10, con condizioni ambientali tipiche come: temperatura dell'aria esterna 35°C, umidità relativa 45% e velocità del vento che varia tra 0 e 1,5 m/s. Le misurazioni prese a 1,00 m di distanza dagli ugelli mostrano che dopo soli 15 minuti di attivazione dello spray, la temperatura scende di 6°C e l'umidità cresce del 20%. Vengono misurati punti via via sempre più distanti dagli ugelli, che mostrano come più si è vicini e più l'effetto di raffrescamento è percepito. Successivamente nel 2010 gli esperimenti vengono eseguiti proprio all'Expo di Shanghai; vengono fatte due prove una il 18 luglio e una il 13 agosto. L'Expo Axis è protetto dalla radiazione solare con delle tende da sole e le condizioni climatiche nei due giorni sono rispettivamente: temperatura dell'aria esterna 34 e 37°C, umidità relativa 32 e 36%. Vengono installate quattro colonne di nebulizzazione con 34 ugelli ciascuna, disposte a formare un quadrato di 11,00 m di lato. Sono disposti diversi sistemi di controllo e misurazione delle variabili, posti all'interno dell'area a varie distanze dagli ugelli e

all'esterno dell'area nebulizzata a 40,00 m di distanza dalle colonne, ma sempre sotto la schermatura solare del padiglione. La velocità del vento varia tra 2 a 4 m/s nei due giorni di misurazione. Durante la prova, all'interno dell'area sperimentale nebulizzata la temperatura diminuisce e l'umidità relativa aumenta. Più si è vicini alle colonne con gli ugelli migliore sarà l'effetto di raffrescamento, per esempio a 1,00 m di distanza dallo spray la temperatura cala di 6°C, mentre spostandosi a 3,00 m di distanza si raggiunge una differenza massima di 4°C. Gli autori concludono il loro articolo sostenendo che già dalla simulazione (2007/2008) è possibile prevedere l'effetto benefico del sistema di raffreddamento a spruzzo durante l'expo mondiale del 2010. Durante la simulazione i risultati sperimentali mostrano come la temperatura dell'aria nei punti di misurazione ha raggiunto cali di 5/6°C mentre l'umidità si mantiene entro il 70%. I dati sperimentali ottenuti durante l'Expo mostrano che la caduta di temperatura è 6/12°C al massimo entro 1,00 m di distanza dalla colonna di nebulizzazione, 1,5/4°C a 3,00 m di distanza e 0,5/1,5°C a 7,00m (dati rispettivamente distinti per 18 luglio e 13 agosto).

Gli autori *Jeong-Ho Kim, Myung-Hun Lee, Yong-Han Yoon* nel 2015 presentano un articolo che descrive uno studio mirato alla verifica dell'abbassamento della temperatura dovuto a sistemi di nebulizzazione [18]. La sperimentazione ha avuto luogo presso il dipartimento di "green fusion technology" dell'università di Kunkuk situato in Chunju, Chungbuk, da giugno a novembre del 2014. Sono stati installati 20 ugelli, distribuiti in 4 tubi a formare una croce, su un sostegno che li ha posti a 3,00 m di altezza dal suolo. Gli autori affermano come sia importante misurare l'intensità e la pressione con cui l'ugello va a spruzzare le particelle di acqua nebulizzate, al fine di ottenere un risultato migliore in termini di raffrescamento. Viene misurata la radiazione solare, attraverso un sistema posto lontano dal sistema spray e anche la temperatura dell'aria esterna viene misurata a 10,00 m di distanza dall'area. Gli ugelli sono stati messi in funzione dalle 10:00 alle 16:00 e sono stati messi 4 sensori di rilevazione della temperatura, posti tra un tubo e l'altro degli ugelli e altri 4 posti a diverse distanze dalla zona spray (1-3-5-7 m). Sono state analizzate tre diverse condizioni di spruzzatura: 0,16 l/min, 0,32 l/min e 0,48 l/m, confrontando poi i risultati ottenuti si arriva alla soluzione migliore dal punto di vista del raffrescamento. In tutti tre i casi, la fascia oraria con la maggior differenza di temperatura risulta essere la fascia 12:00-14:00, dove la variazione di temperatura oscilla tra 3,5°C (per 0,16 l/min) e 4,7°C (per 0,48 l/min). I risultati vengono confrontati tra le varie

configurazioni, mostrando come le differenze più ampie siano tra la condizione 0,16 l/min e 0,48 l/m. Gli autori dimostrano anche come la differenza di temperatura e quindi l'effetto di raffrescamento via via diminuisca allontanandosi dagli ugelli e dalla nebbia: mentre a 1,00 m di distanza viene rilevata un calo di temperatura di 4,5°C (per 0,48 l/min), a 7,00 m (nella stessa condizione) si raggiungono solo 1,7°C di differenza, che diminuiscono ulteriormente per 0,16 l/min dove sono solo 0,2°C. In conclusione, si può affermare come il raffrescamento prodotto dal sistema water-mist sia verificato e sia più percepito con maggiori quantità di nebbia immessi e a distanze più ravvicinate al sistema.

Nel 2017 *H. Montazeri, Y. Toparlak, B. Blocken, J.L.M. Hensen* propongono una simulazione degli effetti di raffreddamento dei sistemi water-mist nei paesaggi urbani attraverso uno studio di fluidodinamica computazionale a Rotterdam [19]. Gli autori ritengono ci sia bisogno di sistemi sostenibili per ridurre lo stress termico nelle aree urbane e per questo promuovono l'utilizzo di sistemi water-mist. Nel loro documento viene presentata una simulazione CFD ad alta risoluzione per valutare il potenziale di raffreddamento di un sistema di nebulizzazione con 15 ugelli a cono cavo. Le simulazioni CFD sono convalidate sulla base delle misurazioni in galleria del vento di un processo di raffreddamento evaporativo e sulle misurazioni sul campo delle temperature superficiali. Il sistema viene implementato numericamente in un cortile a Rotterdam e operato durante il periodo che ha visto un'ondata di calore a luglio del 2006. Gli ugelli vengono posti a 3,00 m di altezza al centro del cortile e distanziati tra loro 0,50 m, su un'unica linea orizzontale. Gli autori sostengono che l'altezza del sistema è importante e può influenzare le prestazioni di raffreddamento e l'effetto di bagnatura. In questo articolo vengono presentati i risultati per altezze pari a 3,00, 4,00 e 5,00 m e si conclude che l'evaporazione delle particelle avviene in tutti i casi, senza fenomeno di bagnatura, ma aumentando l'altezza del sistema il fenomeno di raffrescamento diminuisce. I risultati mostrano inoltre come per determinati valori di portata e per 3,00 m di altezza la temperatura si riduce di 5/7°C ad altezza pedonale (1,75m); inoltre si osserva un miglioramento del comfort termico misurato con l'indice UTCI (Universal Thermal Climate Index).

Nel 2019 gli autori *Giulia Ulpiani, Elisa Di Giuseppe, Costanzo Di Perna, Marco D'Orazio, Michele Zinzi* [9] hanno pubblicato un articolo su una sperimentazione fatta nelle città di Ancona e Roma. Hanno ideato, installato e monitorato una rete personalizzata di nebulizzatori in due ambienti urbani italiani (nella città di Ancona prima

e poi nella capitale, Roma), diversi per complessità (per tenere conto dei diversi livelli di UHI e fattori scatenanti), cornice climatica e utenti tipici (per tenere conto della biodiversità). Gli scopi di questa indagine erano:

- confrontare il livello di comfort all'interno e all'esterno della zona nebulizzata per cercare di identificare il layout più raffinato (altezza, densità degli ugelli, etc.);
- identificare la categoria di utenti più appropriata (gruppo di età, sesso, dimensione, livello di attività, etc.);
- acquisire informazioni sui molteplici modi in cui la nebbia d'acqua altera le sensazioni e le preferenze verso i singoli fattori ambientali (temperatura, umidità, sole, vento).

L'obiettivo finale era definire la configurazione ottimale per uno strumento potente e facilmente implementabile contro il surriscaldamento urbano.

Il sistema era composto da 24 ugelli a cono cavo distanziati di 1 m disposti in 4 corde parallele, questi ad Ancona sono stati posti ad un'altezza pari a 3,30 m da terra, mentre a Roma distavano dal suolo 2,80 m. Sotto lo spray sono stati installati dei sensori di rilevazione di temperatura e umidità posti a 1,10 m di altezza (ISO 7726) e gli ugelli erano attivi in due modalità, con una logica di controllo di tipo fuzzy, oppure con un controllore temporizzato che prevedeva 20 secondi di attivazione e 10 di spegnimento. Per valutare il comfort sono stati distribuiti dei questionari di valutazione. La prima parte di questi questionari è caratterizzata sulle informazioni personali delle persone: attività (ASHRAE 55-2004), indumenti (ASHRAE 55-2004), eventuale stato di gravidanza, altezza, tempo di ingresso e uscita dal sistema. La seconda parte riguarda il comfort termoigrometrico e i voti erano espressi per il Thermal Sensation Vote secondo la scala simmetrica ASHRAE 7 punti (-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3) e per le considerazioni in merito a sole, vento e umidità con la scala McIntyre 2 poli (-1, 0, +1). Infine, è stato chiesto se l'esperienza è risultata: confortevole, accettabile o scomoda. Nell'ultima parte vi è uno spazio relativo ai commenti personali.

Appendix B

Questionnaire structure (example of the one distributed in Rome).

### Outdoor Thermal Comfort Questionnaire

Date: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Entrance time in spray zone: \_\_\_\_:\_\_\_\_

Exit time from spray zone: \_\_\_\_:\_\_\_\_

Questionnaire start time: \_\_\_\_:\_\_\_\_

Gender: M/F Pregnant? Y/N How tall are you? \_\_\_\_ metres

Health status: Do you suffer from body temperature altering illnesses?  
 No,  Fever,  Metabolic disorders  
 or  \_\_\_\_\_ (Please specify)

Age:  <10,  11-20,  21-35,  36-50,  51-65  
 66-80,  >80

---

Activity: while passing under the water spray, you were:  
 Attending seated,  Attending standing,  Strolling,  
 Running,  Playing, or  \_\_\_\_\_ (Please specify)

Activity: half an hour earlier, you've been mainly:  
 Attending seated,  Attending standing,  Strolling,  
 Running,  Playing, or  \_\_\_\_\_ (Please specify)

---

Clothing: please tick the clothes you are wearing at this moment (multiple choices):  
 T-shirt (short sleeves),  T-shirt (long sleeves),  
 Shorts OR short skirt,  Long pants OR long skirt,  Vest  
 Sport skirt,  Jacket, or  \_\_\_\_\_ (Please specify)

---

Please rate your thermal sensation:

|  |                          |                          |                          |                         |                          |                          |                          |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|  | <input type="radio"/> -3 | <input type="radio"/> -2 | <input type="radio"/> -1 | <input type="radio"/> 0 | <input type="radio"/> +1 | <input type="radio"/> +2 | <input type="radio"/> +3 |
|  | cold                     | cool                     | slightly cool            | neutral                 | slightly warm            | warm                     | hot                      |

Currently \_\_\_\_\_  
 Under the spray \_\_\_\_\_

---

Please tick your feeling about the following weather conditions:

|                 |                               |                                   |                                 |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
|                 | HUMIDITY                      |                                   |                                 |
| Currently       | <input type="checkbox"/> Weak | <input type="checkbox"/> Pleasant | <input type="checkbox"/> Strong |
| Under the spray | <input type="checkbox"/> Weak | <input type="checkbox"/> Pleasant | <input type="checkbox"/> Strong |

Please tick your preference about the following weather conditions:

|                 |                                |                                   |                                 |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
|                 | HUMIDITY                       |                                   |                                 |
| Currently       | <input type="checkbox"/> Drier | <input type="checkbox"/> Unvaried | <input type="checkbox"/> Damper |
| Under the spray | <input type="checkbox"/> Drier | <input type="checkbox"/> Unvaried | <input type="checkbox"/> Damper |

|                 |                                 |                                   |                                   |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                 | WIND                            |                                   |                                   |
| Currently       | <input type="checkbox"/> Weaker | <input type="checkbox"/> Unvaried | <input type="checkbox"/> Stronger |
| Under the spray | <input type="checkbox"/> Weaker | <input type="checkbox"/> Unvaried | <input type="checkbox"/> Stronger |

|                 |                                 |                                   |                                   |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                 | SUN                             |                                   |                                   |
| Currently       | <input type="checkbox"/> Weaker | <input type="checkbox"/> Unvaried | <input type="checkbox"/> Stronger |
| Under the spray | <input type="checkbox"/> Weaker | <input type="checkbox"/> Unvaried | <input type="checkbox"/> Stronger |

---

Please rate your overall environmental sensation:

|  |  |                                     |                                      |
|--|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
|  | <input type="checkbox"/> Uncomfortable | <input type="checkbox"/> Acceptable | <input type="checkbox"/> Comfortable |
|--|--|-------------------------------------|--------------------------------------|

Currently \_\_\_\_\_  
 Under the spray \_\_\_\_\_

---

How often do you come to outdoors in this season?  
 Seldom,  1 or 2 times per week,  Once a day  
 Twice a day, or  \_\_\_\_\_ (Please specify)

How much time have you spent in Rome today?  
 <15 min,  15-30 min,  30-60 min,  >1 hour

Why did you choose this place?  
 Thermal comfort,  Convenience (close to home, shop, bus stop, ...),  Functionality,  Quietness,  Air quality  
 Beauty,  Safety, or  \_\_\_\_\_ (Please specify)

---

Questionnaire end time: \_\_\_\_:\_\_\_\_

Comments and suggestions (higher/lower, stronger/weaker spray, higher/lower nozzle density, higher/lower impact under weak/strong wind, ...):

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Fig. 3 – Questionario proposto da Ulpiani et al. [9]

La sperimentazione è stata condotta senza alcun tipo di ombreggiatura, il tempo di permanenza sotto il sistema era compreso tra 5 e 7 minuti, mentre per il questionario vi erano 3-4 minuti di tempo.

Tra i principali risultati di questa analisi, troviamo sicuramente una miglior condizione di comfort sotto l'ambiente spray, apparentemente, coloro che si trovavano a 1,20-1,50 m dal getto hanno risentito in maniera positiva sia del raffreddamento che dell'attenuazione solare, l'umidità non si è dimostrata un problema, nonostante nell'ambiente spray vi sia un effettivo innalzamento dovuto all'immissione di particelle di acqua nebulizzata. Le

condizioni migliori per il funzionamento del sistema sono risultate con una velocità del vento pari a 1-2 m/s.

Nel 2020 *Wonseok Oh, Ryoza Ooka, Junta Nakano, Hideki Kikumoto, Osamu Ogawa* hanno pubblicato un articolo su uno studio che mira a valutare un ambiente nebulizzato all'aperto e il suo effetto in termini di sensazioni termiche e temperatura della pelle [20]. In questa sperimentazione, condotta dal 23 luglio al 4 agosto 2018 presso l'Istituto di Scienze Industriali dell'università di Tokyo, il sistema water mist è proposto in quattro modalità diverse in base alla quantità di spray e alla presenza o meno di un comando di soffiaggio dell'aria. I voti che sono stati analizzati sono di tre tipi: voto di sensazione termica modificato, più adatto a rappresentare la sensazione termica del popolo giapponese (mTSV), voto di sensazione termica (TSV) e voto di sensazione di comfort (CSV). I fattori ambientali sono stati confrontati tra ambiente esterno e nebulizzato ed è stata misurata la temperatura della pelle (T-skin) durante la prova. È stata fatta poi una correlazione tra T-skin e le sensazioni termiche. Gli ugelli sono stati posti a 3,00 m di altezza, la dimensione della gocciolina di nebbia era fissata a 9-11  $\mu\text{m}$  in modo che le particelle di nebbia potessero evaporare completamente quando erano sospese nell'aria e i sensori per le misurazioni dei dati all'interno del sistema spray erano a 1,10 m (punto mediano di un corpo umano eretto). Temperatura dell'aria, radiazione, umidità e velocità dell'aria sono state misurate sia dentro che fuori l'ambiente nebulizzato.

Hanno preso parte allo studio sperimentale compilando i questionari 65 soggetti: età media 26,6 anni; peso 59,6 kg; altezza 1,67 m; indice di massa corporea (BMI) 21,1. Sensazioni termiche e di comfort (TSM, mTSV, CSV) sono state valutate con la scala sette punti ASHRAE (-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3); mentre la temperatura della pelle è stata misurata con delle termocoppie attaccate alla superficie cutanea con nastro chirurgico e la temperatura cutanea complessiva è stata calcolata come la media ponderata di testa, tronco, avambraccio, mano, coscia, gamba e piede. La durata test era di 20 minuti, i primi 10 esposti in ambiente esterno, poi sotto il sistema nebulizzato.

I risultati hanno dimostrato che la temperatura dell'aria all'interno dell'ambiente di nebulizzazione è diminuita quando il sistema di nebulizzazione è stato azionato con una maggiore quantità di acqua di spruzzatura e con la presenza di un ventilatore. L'umidità come previsto è aumentata per via delle particelle di acqua immesse nell'ambiente. I

risultati dell'indagine sui 65 soggetti hanno suggerito che l'mTSV cambiava da una condizione ambientale all'altra da “leggermente caldo” a “neutro”, il TSV cambiava da “caldo” a “neutro”, e il CSV cambiava da “leggermente scomodo” a “leggermente confortevole”. La temperatura cutanea complessiva è diminuita di circa 0,53 °C dalla modalità operativa di base. Gli autori suggeriscono che se fosse presente un metodo di ombreggiatura si avrebbe un effetto migliore, sarebbe alleviato maggiormente lo stress termico e migliorato il comfort.



**お願い実験参加者調査票**  
(Survey questionnaire)

・実施日 年 月 日午前・午後  
Participation Date(DD/MM/YYYY)

被験者番号(ID)

- ・お名前 \_\_\_\_\_  
Name
- ・性別 男 (Male) 女 (Female)  
Gender
- ・年齢 \_\_\_\_\_ 歳(years old)  
Age
- ・体重 \_\_\_\_\_ kg \_\_\_\_\_ lb  
Weight
- ・身長 \_\_\_\_\_ cm \_\_\_\_\_ ft  
Height
- ・出身地 \_\_\_\_\_  
Hometown
- ・前日の睡眠時間  
How long did you sleep yesterday?  
\_\_\_\_\_ 時間(hours)
- ・暑がりですか、寒がりですか？ (該当するもの全てを選んでください。)  
Are you sensitive to hot and cold conditions? (multiple answers allowed)  
暑さに強い 暑さに弱い 寒さに弱い 寒さに強い いずれでもない  
Tolerant of heat Sensitive to heat Sensitive to cold Tolerant of cold None of the above
- ・今日の体調はいかがですか？  
How is your health conditions today?  
とても良い 良い 普通 悪い とても悪い  
Very well Well Fair Poor Very poor

**ケース 1：被験者実験の主観評価シート**  
CASE1: Questionnaires

・ 1 回目：グリーンエアコンに「入る前」 / 2 回目：グリーンエアコンに「入った後」  
Questionnaire1: Before entering the mist spraying system / Questionnaire2: After 3 minutes from entering the mist spray system

- 1) 今のあなたの自身の暑さ、寒さはどの程度ですか？  
How do you feel at the moment?  

|           |      |               |         |              |     |          |
|-----------|------|---------------|---------|--------------|-----|----------|
| -3        | -2   | -1            | 0       | 1            | 2   | 3        |
| 非常に寒い     | 寒い   | やや寒い          | どちらでもない | やや暑い         | 暑い  | 非常に暑い    |
| Very Cold | Cold | Slightly Cold | Neutral | Slightly Hot | Hot | Very Hot |
- 2) 今の暑さ、寒さがどうあれば、あなたにとってよいですか？  
How would you like the environment to be?  

|             |          |             |
|-------------|----------|-------------|
| -1          | 0        | 1           |
| 今より涼しいほうがよい | このままでよい  | 今より暖かいほうがよい |
| Cooler      | As it is | Warmer      |
- 3) 今の暑さ、寒さをあなたは受け入れることができますか？  
Is the present thermal environment acceptable?  

|              |                     |                    |            |
|--------------|---------------------|--------------------|------------|
| -2           | -1                  | 1                  | 2          |
| 受け入れられない     | どちらかという<br>受け入れられない | どちらかという<br>受け入れられる | 受け入れられる    |
| Unacceptable | Barely unacceptable | Barely acceptable  | Acceptable |
- 4) 汗による今の肌や衣類のぬれは、あなた自身にとってどうですか？  
How is the wettedness of your cloth and skin due to sweat?  

|         |              |       |          |
|---------|--------------|-------|----------|
| 0       | 1            | 2     | 3        |
| ぬれていない  | ややぬれている      | ぬれている | 非常にぬれている |
| Not Wet | Slightly Wet | Wet   | Very Wet |
- 5) 今の肌や衣類のぬれ具合をあなたは受け入れられますか？受け入れられませんか？  
Is the wettedness of your cloth and skin acceptable?  

|              |                     |                    |            |
|--------------|---------------------|--------------------|------------|
| -2           | -1                  | 1                  | 2          |
| 受け入れられない     | どちらかという<br>受け入れられない | どちらかという<br>受け入れられる | 受け入れられる    |
| Unacceptable | Barely unacceptable | Barely acceptable  | Acceptable |
- 6) 今の状態は総合的に考えて、あなたにとって快適ですか？不快ですか？  
In total, do you feel your present condition to be comfortable?  

|                    |               |                        |         |                      |             |                  |
|--------------------|---------------|------------------------|---------|----------------------|-------------|------------------|
| -3                 | -2            | -1                     | 0       | 1                    | 2           | 3                |
| 非常に不快              | 不快            | やや不快                   | どちらでもない | やや快適                 | 快適          | 非常に快適            |
| Very Uncomfortable | Uncomfortable | Slightly Uncomfortable | Neutral | Slightly Comfortable | Comfortable | Very Comfortable |
- 7) 今のあなたの自身の温冷感ほどの程度ですか？  
How do you feel at the moment?  

|      |      |               |         |               |      |     |
|------|------|---------------|---------|---------------|------|-----|
| -3   | -2   | -1            | 0       | 1             | 2    | 3   |
| 寒い   | 涼しい  | やや涼しい         | どちらでもない | やや暖かい         | 暖かい  | 暑い  |
| Cold | Cool | Slightly Cool | Neutral | Slightly Warm | Warm | Hot |

Fig. 4 – Questionario proposto da Oh et al. [20]

Una pubblicazione del 2021 di *Ming Zhang, Congbao Xu, Li Meng, Xi Meng* tratta una sperimentazione fatta simulando una stazione dell'autobus, con applicato il sistema di nebulizzazione per migliorare il comfort termico umano nelle aree di attesa dei trasporti urbani [21]. Il test sperimentale prevedeva l'uso di questionari per valutare la variazione del livello di comfort.

L'esperimento è stato condotto nella città cinese di Qingdao dal 15 al 17 agosto 2020. Il sistema di nebulizzazione è stato installato nel modello della stazione degli autobus di dimensione 4,00x1,20x2,60 m. Gli ugelli erano distanziati l'uno dall'altro di 0,80 m e attraverso essi veniva espulsa l'acqua nebulizzata, capace di evaporare rapidamente e assorbire il calore, riducendo così la temperatura dell'aria locale e migliorando l'ambiente termico esterno. Sono stati costruiti due modelli di stazione dell'autobus: uno con e uno senza sistema spray, così da rendere possibile una comparazione.

Visto che il sistema prevede abbassamenti di temperatura ma anche aumenti di umidità, i sensori installati misuravano entrambi i parametri ed erano posizionati a tre altezze: 1,40 m, 1,55 m e 1,70 m dal suolo, corrispondenti rispettivamente all'altezza del torace, della cavità nasale e della testa. Sono state misurate anche la radiazione solare e la velocità del vento; ogni misurazione è stata registrata ad intervalli di 5 minuti.

I partecipanti che si sono sottoposti alla sperimentazione hanno compilato un questionario in cui sono state valutate: sensazione termica, sensazione relativa al sudore, sensazione di umidità e comfort termico. Secondo l'ASHRAE 55-1992 è stata utilizzata una scala a sette punti per la sensazione termica (+3 molto caldo, +2 caldo, +1 leggermente caldo, 0 neutro, -1 leggermente freddo, -2 freddo, -3 molto freddo) e per la sensazione di comfort (+3 molto confortevole, +2 confortevole, +1 leggermente confortevole, 0 neutro, -1 leggermente sgradevole, -2 sgradevole, -3 molto sgradevole), una scala a quattro punti (0, -1, -2, -3) per i voti legati al sudore e all'umidità e infine una scala a cinque punti per rispondere a una domanda relativa all'accettabilità del sistema water mist.

**Table 2**

Questionnaire on cooling effect of mist spray system.

**Table 2 Questionnaire on cooling effect of mist spray system.  
Questionnaire on cooling effect of mist spray system**

| 1. Personal information   |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
|---|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Gender:   | <input type="checkbox"/> Male | <input type="checkbox"/> Female | Age: _____               | Height: _____ cm         | Weight: _____ kg         |                          |                          |
| 2. Please fill in the following questions in the outdoor environment.     |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
| <i>(1). How do you feel at this moment?</i>                               |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
|   | Cold (-3)                     | Cool (-2)                       | Slightly cool (-1)       | Neutral (0)              | Slightly hot (1)         | Hot (2)                  | Very hot (3)             |
| 3min  | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6min  | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9min  | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <i>(2). How much are your sweating at this moment?</i>                    |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
|   | Very much (-3)                | Much (-2)                       | Slight (-1)              | No (0)                   |                          |                          |                          |
| 3min  | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          |
| 6min  | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          |
| 9min  | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          |
| <i>(3). Do you feel your present condition to be comfortable (conf.)?</i> |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
|   | Very unconf. (-3)             | Unconf. (-2)                    | Slightly unconf. (-1)    | Neutral (0)              | Slightly conf. (1)       | Conf. (2)                | Very conf. (3)           |
| 3min  | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6min  | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9min  | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3. Please fill in the following questions in the mist spray system.       |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
| <i>(4). How do you feel at this moment?</i>                               |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
|   | Cold (-3)                     | Cool (-2)                       | Slightly cool (-1)       | Neutral (0)              | Slightly hot (1)         | Hot (2)                  | Very hot (3)             |
| 12min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 15min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 18min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <i>(5). How much are your sweating at this moment?</i>                    |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
|   | Very much (-3)                | Much (-2)                       | Slight (-1)              | No (0)                   |                          |                          |                          |
| 12min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          |
| 15min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          |
| 18min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          |
| <i>(6). How much do you feel moist due to the mist spray system?</i>      |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
|   | Very moist (-3)               | Moist (-2)                      | Slightly moist (-1)      | No moist (0)             |                          |                          |                          |
| 12min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          |
| 15min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          |
| 18min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          |
| <i>(7). Do you feel your present condition to be comfortable (conf.)?</i> |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
|   | Very unconf. (-3)             | Unconf. (-2)                    | Slightly unconf. (-1)    | Neutral (0)              | Slightly conf. (1)       | Conf. (2)                | Very conf. (3)           |
| 12min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 15min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 18min   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <i>(8). Is the mist spray system acceptable(accept.)?</i>                 |                               |                                 |                          |                          |                          |                          |                          |
|   | Unaccept. (-2)                | Slightly unaccept. (-1)         | Neutral (0)              | Slightly accept. (1)     | Accept. (2)              |                          |                          |
|   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |
|   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |
|   | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |                          |

Fig. 5 – Questionario proposto da Zhang et al. [21]

Le modalità di esecuzione del test prevedevano che i partecipanti sostassero dieci minuti seduti all’ombra, per poi spostarsi dieci minuti in ambiente naturale e compilare il questionario a 3, 6, 9 minuti e infine concludere con dieci minuti sotto il sistema spray rispondendo alle domande del questionario a 12, 15 e 18 minuti dall’ingresso in ambiente naturale. Hanno preso parte alla sperimentazione 50 persone, 5 persone alla volta dalle 14:00 alle 16:00 per un totale di 30 minuti a gruppo, divise in funzione dell’età e ponendo

attenzione ai partecipanti obesi (indice BMI). I risultati mostrano infatti le differenze di percezione del comfort sia per quanto riguarda il genere che l'indice di massa corporea.

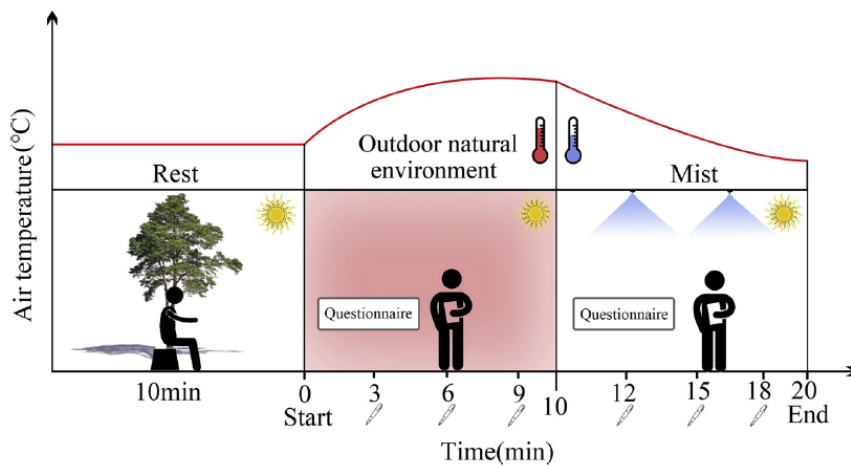


Fig. 6 – Schema riassuntivo del test sperimentale di Zhang et al. [21]

I risultati della sperimentazione cinese mostrano come la temperatura dell'aria si è abbassata e sono aumentati il comfort termico e la sensazione termica sotto il sistema di nebulizzazione. Studiando le differenze tra i generi, le donne sono risultate più sensibili all'aumento del comfort e della sensazione termica, così come i soggetti con un BMI elevato. Gli autori concludono che il sistema potrebbe essere ampiamente usato nella pratica per via della grande accettabilità (76%).

Gli autori *Aimee Desert, Emanuele Naboni, David Garcia* descrivono nel loro articolo uno studio sperimentale cileno per esplorare l'impatto delle semplici tecnologie dei sistemi water mist sul comfort esterno [22]. È stato costruito un impianto nella città di Antofagasta (Cile), caratterizzata da elevata umidità e forte radiazione solare. La città ha pochi spazi pubblici e aree verdi limitate, e l'ambiente urbano ha grandi aree asfaltate scure che assorbono il calore durante il giorno e creano un'isola di calore urbano [23]. Sono state monitorate le condizioni climatiche ambientali e con l'utilizzo di questionari di comfort sono stati valutati i livelli di comfort raggiunti.

Il prototipo è stato assemblato presso la scuola di architettura del campus Universidad Católica del Norte nel sud Antofagasta per poi essere installato in un'area della città che sperimenta l'effetto UHI. Sono state misurate all'interno e all'esterno dell'apparato sperimentale temperatura, temperatura media radiante, umidità e luce; i dati sono stati

registrati a intervalli regolari durante tutta la giornata e la sperimentazione è stata completata da indagini qualitative da parte degli occupanti che hanno valutato la loro percezione di comfort.

A differenza delle altre sperimentazioni, in quest'ultima gli ugelli erano posti orizzontalmente su dei telai verticali, non spruzzavano solo dall'alto; erano distanti tra loro meno di 0,60 m, con possibilità di rotazione di 90° o bloccati, ed avevano un diametro di 0,3/0,4 mm. Le misurazioni sono state effettuate in punti fissi attorno al telaio e, attraverso un sistema a griglia, all'interno del prototipo.



*Fig. 7 – Prototipo sperimentazione cilena [22]*

La percezione termica è stata misurata con la scala a sette punti ASHRAE. L'indagine ha anche chiesto ai partecipanti come avrebbero modificato il loro ambiente per migliorare il loro comfort (ricerca del piacere del clima). Nell'ultima parte del questionario è stato lasciato uno spazio di descrizione con 3-5 parole delle proprie sensazioni in termini di: umidità, sole, vento, temperatura, luce diurna.

I partecipanti hanno trascorso almeno 10 min in ambiente a riposo, prima di entrare nel sistema, per poi passare da 2 a 10 minuti sotto lo spray. Essendo nei pressi dell'università il campione è risultato relativamente giovane, escludendo giovanissimi e anziani.

## CONSTRUCTING ATMOSPHERES

### An investigation into comfort in humid environments

Age: \_\_\_\_\_

Gender: \_\_\_\_\_

Residency:  resident

visitor

How sensitive to cold/hot environments are you?

Not at all

Very sensitive

Clothing:

short sleeves / t-shirt

shorts/skirt

long sleeve shirt

long trouser

jumper

jacket

Activity level: standing / sitting / walking

sitting

walking

standing

dancing

Time spend in control conditions:

\_\_\_ minutes

Time spend under mist:

\_\_\_ minutes

How many hours to you spend outside on a typical day?

\_\_\_ hours

Are these mainly in the ...

morning

afternoon

midday

evening

#### BEFORE MIST



How would you improve the comfort of this environment?

|           |            |
|-----------|------------|
| Shadier   | Sunnier    |
| Drier air | Wetter air |
| less wind | More wind  |
| Cooler    | Hotter     |

Overall how would you rate your level of comfort

Uncomfortable \_\_\_\_\_ Comfortable

Please rank the following according to their influence on your comfort:

- \_\_\_ humidity
- \_\_\_ solar shading
- \_\_\_ wind
- \_\_\_ temperature
- \_\_\_ daylight

Please use 3-5 words to describe your thermal sensation:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_
4. \_\_\_\_\_
5. \_\_\_\_\_

#### AFTER MIST



How would you improve the comfort of this environment?

|           |            |
|-----------|------------|
| Shadier   | Sunnier    |
| Drier air | Wetter air |
| less wind | More wind  |
| Cooler    | Hotter     |

Overall how would you rate your level of comfort

Uncomfortable \_\_\_\_\_ Comfortable

Please rank the following according to their influence on your comfort:

- \_\_\_ humidity
- \_\_\_ solar shading
- \_\_\_ wind
- \_\_\_ temperature
- \_\_\_ daylight

Please use 3-5 words to describe your thermal sensation:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_
4. \_\_\_\_\_
5. \_\_\_\_\_



Aimee L. Desert  
 aide1851@edu.kadk.dk  
 The Royal Danish Academy of Fine Arts  
 Architecture & Extreme Environments MA

Fig. 8 – Questionario proposto da Desert et al. [22]

L'esperimento ha dimostrato come l'aumento di umidità generato dal sistema non ne comprometta la funzionalità, si ha comunque una significativa riduzione della temperatura dell'aria, fino a un effetto di raffrescamento di 15°C. L'indagine sostiene che gli occupanti possono provare sensazioni di piacere termico e alliestesia termica (piacevole sensazione percepita quando il corpo è esposto a condizioni che si oppongono alla sua temperatura interna).

Sempre nel 2020 *Jennifer K. Vanos, Mary K. Wright, Alana Kaiser, Ariane Middel, Harrison Ambrose, David M. Hondula* prendono in considerazione uno studio condotto nel clima estivo caldo e secco di Tempe, in Arizona, fatto per quantificare l'influenza dei sistemi water mist sull'ambiente termico nei ristoranti all'aperto e per comprendere le motivazioni che spingono i business manager ad utilizzare i sistemi di nebulizzazione [24]. Durante i mesi di giugno e luglio del 2016, sono state condotte interviste audio (per poi essere trascritte) in 11 ristoranti di Tempe, e sono stati raccolti dati micrometeorologici (ogni 10 secondi) in 5 di questi. Sono state misurate: temperatura dell'aria, velocità del vento, umidità relativa, temperatura media radiante, indice climatico universale (UTCI) e temperatura fisiologica equivalente (PET). Ogni ristorante aveva posti a sedere interni ed esterni e sono state testate quattro condizioni: sole, con e senza mist e ombra, con e senza mist.

Sono stati posti dei questionari ai titolari dei ristoranti per capire se l'effetto dei nebulizzatori era incoraggiante o meno (Scala Likert 5 punti: -2 fortemente sgradevole, +2 molto incoraggiante). Le interviste sono state fatte chiedendo pareri sulle sensazioni di comfort dei clienti, sul fattore estetico degli impianti di nebulizzazione, costo del sistema, costi di manutenzione, costi energetici e costo dell'acqua.

I risultati mostrano come la combinazione di nebbia e piena ombra (situazione di una veranda) sia stata maggiormente efficace per migliorare il comfort termico all'aperto. I proprietari dei ristoranti hanno identificato il comfort del cliente e l'aumento della capacità di posti a sedere come fattori principali per l'uso dei sistemi water spray e hanno dato meno importanza ai costi.

Nel 2015 *Hikmet Esen e Omer Tuna* presentano uno studio svolto in Turchia, dove un sistema di nebulizzazione è stato stabilito in un pergolato di 24 mq [25]. Il sistema genera l'elettricità necessaria con un modulo fotovoltaico che alimenta la pompa dell'acqua pressurizzata attraverso un inverter e la memorizza in una batteria per l'uso quando non c'è luce solare. Gli ugelli sono installati a 2,40 - 3,00 m (per un raffreddamento ottimale) e il sistema ha un controllore temporizzato che accende e spegna la pompa ogni 20 secondi. Lo studio utilizza una tecnologia efficiente, e spiega che i sistemi di nebulizzazione sono utilizzati perché la nebbia che viene prodotta è talmente fine che non

vi è possibilità di “effetto bagnato” nelle zone circostanti (si afferma che una persona può bagnarsi solo stando a circa 15 cm dall’ugello).

A conclusione del loro articolo, gli autori scrivono che il sistema provoca un abbassamento della temperatura e un aumento dell’umidità; il raffreddamento è eseguito utilizzando energia fotovoltaica (ritorno sull’investimento per un sistema di nebulizzazione alimentato con fotovoltaici: 3,7 anni); inoltre sono da considerare i costi di investimento iniziali e le emissioni di CO<sup>2</sup> che potrebbero essere ridotti.

*Craig Farnham, Jihui Yuan, Md Ashraful Alam* nel 2016 scrivono un articolo scientifico sul water mist per il raffreddamento evaporativo locale di spazi di lavoro in Giappone, dove lo standard per il lavoro in ambienti caldi (basato sulla norma ISO 7243) richiede lunghe pause di lavoro o grandi costi per l’aria condizionata standard. [26]

Un sistema di nebulizzazione è stato testato in estate in una fabbrica di 40.000 m<sup>2</sup> in Giappone. Si tratta di un grande ventilatore a nebbia montato su una piattaforma a 2,50 m di altezza, con una testata circolare con 32 ugelli montata sulla circonferenza di uscita del ventilatore.



*Fig. 9 – Ventilatore a nebbia [26]*

I sensori di temperatura e umidità sono stati impostati a 1,20 m di distanza dal suolo in 10 punti, 8 all'interno dell'area irrorata e 2 all'esterno dell'area (uno vicino all'ingresso del ventilatore e uno a 15 m di distanza perpendicolare al flusso d'aria del ventilatore); questi registravano i valori a intervalli di 20 secondi.



Le prove sono state fatte il 21 e 22 settembre 2014 tra le 10:00 e le 04:00, quando l'attività lavorativa era ferma e le finestre chiuse. Un ciclo di prova di 30 minuti è stato ripetuto per 16 volte. La temperatura iniziale dell'aria nella fabbrica variava su 26-29 C e l'umidità da 30-45% durante i periodi di prova.

Gli autori concludono dicendo che il sistema water mist è un metodo di raffreddamento conveniente che ha già dimostrato di migliorare il comfort termico negli spazi esterni nelle calde giornate estive anche nel clima subtropicale del Giappone. L'effetto di umidificazione, tuttavia, lo rende non adatto all'uso interno per timore di portare l'aria a saturazione. In questo esperimento in realtà l'umidità media cresce solo del 5-10% su un periodo di 8 ore, mentre la temperatura cala di 0.2-0.5K su una base di media di tempo, con le cadute di picco di 1-3K mentre il flusso di nebbia investiva i sensori.

Uno studio meno recente (2014) di *N.H. Wong, Adrian Z.M. Chong* è ambientato a Singapore, dove il clima è caldo e umido tutto l'anno [27]. Sono state condotte misurazioni oggettive e soggettive in un impianto sperimentale situato presso la National University di Singapore (NUS) per valutare le condizioni e le sensazioni termiche provocate dall'uso di ventilatori a nebbia. A questo scopo, sono stati installati due layout simili a 10 m di distanza: da un lato c'era un ventilatore con annessa la nebulizzazione, dall'altro lo stesso ventilatore ma senza effetto nebbia.

L'esperimento è stato condotto dal 21 al 24 settembre 2009 e sono stati testati 80 studenti, divisi equamente tra maschi e femmine. Ogni giorno 10 partecipanti sostavano seduti sotto il ventilatore con nebbia mentre altre 10 stavano nella stessa condizione ma senza nebbia. Dopo 30 minuti dalla sosta sotto i ventilatori ogni partecipante ha compilato un questionario relativo al comfort termico. Le misurazioni oggettive sono state prese attraverso dei sensori posti a 1,00 m di distanza dal suolo. I parametri ambientali monitorati sono stati: temperatura dell'aria, temperatura del globo, umidità relativa e velocità del vento. Oltre a questi sono stati considerati anche i fattori fisici che includono i valori di clo e i tassi metabolici (standard ASHRAE 55-2004) [28]. In questa sperimentazione viene utilizzato anche il software RayMan per il calcolo degli indici di equilibrio termico PET e SET.

I questionari seguono lo standard ASHRAE 55-2004, per i voti di sensazione termica si segue la scala ASHRAE, mentre per la sensazione di comfort i voti si basano sulla scala

Bedford. L'analisi comprende voti anche sulla sensazione di umidità e sul movimento dell'aria.

I risultati mostrano che il ventilatore con la nebbia riduce la temperatura a bulbo secco, mentre i voti di sensazione termica sono inferiori. Il sistema con water mist fornisce solo un raffreddamento localizzato e potrebbe richiedere un'elevata velocità dell'aria per essere più efficace. In conclusione, gli autori affermano che sono necessari ulteriori studi per comprendere a fondo i benefici e anche i difetti prodotti da questo genere di sistemi per la mitigazione dell'isola di calore.

Tutti gli articoli, in realtà, chiudono il capitolo delle conclusioni facendo presente che servono maggiori informazioni sul sistema. Già dal 2010 *Erik Johansson, Sofia Thorsson, Rohinton Emmanuel, Eduardo Krüger* affermano che vi è necessità di standardizzazione dei metodi nella loro revisione degli strumenti e dei metodi utilizzati negli studi del comfort termico esterno. [29]

Sulla base di quanto trovato e studiato in letteratura, si è scelta la metodologia da applicare a questa nuova campagna sperimentale, cercando di dare un contributo alla ricerca scientifica del settore. In particolare, si è deciso di prediligere una condizione di ombreggiatura e quindi fare un confronto tra condizione solo ombreggiata e ombreggiata con sistema water-mist. I soggetti che hanno preso parte alla sperimentazione sono stati seduti simulando la permanenza in un ristorante. Inoltre, dato il campo di applicazione della tecnologia che prevede il suo utilizzo in luoghi di permanenza e di sosta degli utenti, si è deciso di studiare come il comfort varia con il tempo, proponendo un questionario di valutazione al quale le persone dovevano rispondere ogni 3 minuti per un totale di 9 minuti di permanenza in ambiente solo ombreggiato e altri 9 minuti sotto la zona ombreggiata con la nebulizzazione. In questo modo è stato possibile osservare come variano sensazioni relative al comfort, alla percezione termica al sudore e all'umidità con il passare del tempo.

### **3. Fasi, Materiali e Metodi**

In questo capitolo sono illustrate le fasi operative della sperimentazione, il setup sperimentale e la metodologia di misura e di analisi dei risultati.

#### **3.1 Fasi**

Questa sperimentazione ha avuto modo di svolgersi grazie al susseguirsi di molteplici fasi operative, come di seguito elencate:

- I. Posa in opera la struttura sperimentale, compresa di pompa, impianto nebulizzante costituito da filari con ugelli e impianto fotovoltaico per l'alimentazione elettrica.
- II. Per prendere le opportune misurazioni delle condizioni microclimatiche sono stati installati nell'area sperimentale appositi sensori.
- III. Sono state studiate le configurazioni possibili, ottenute facendo variare le variabili del sistema: altezza ugelli (2,20 m, 2,60 m, 2,90 m), interasse ugelli (0,80 m, 1,00 m), presenza o assenza di schermatura vento, presenza o assenza di schermatura solare, tipologia di controllore (temporizzato o manuale). In funzione alle configurazioni è stato stilato un cronoprogramma.
- IV. Per studiare quanto il sistema water mist incide sul comfort delle persone è stato redatto un questionario di valutazione. All'interno del cronoprogramma sono stati selezionati 3 giorni (21, 22, 23 luglio 2021) in cui gli utenti si sono recati nel luogo della sperimentazione e si sono sottoposti a un test con annessa compilazione dei questionari di valutazione del comfort.
- V. Sono stati analizzati i risultati ottenuti, sia in termini climatici sia in termini di comfort. Sono stati prodotti grafici esplicativi e attuati due test statistici.
- VI. Infine, sono state tratte le conclusioni di questa sperimentazione, evidenziando punti di forza e limiti.

## 3.2 Materiali

### 3.2.1 Struttura sperimentale

La sperimentazione ha avuto luogo nei pressi del polo di Ingegneria dell'università Politecnica delle Marche di Ancona, precisamente tra i capannoni pesanti e la serra della facoltà di Agraria.

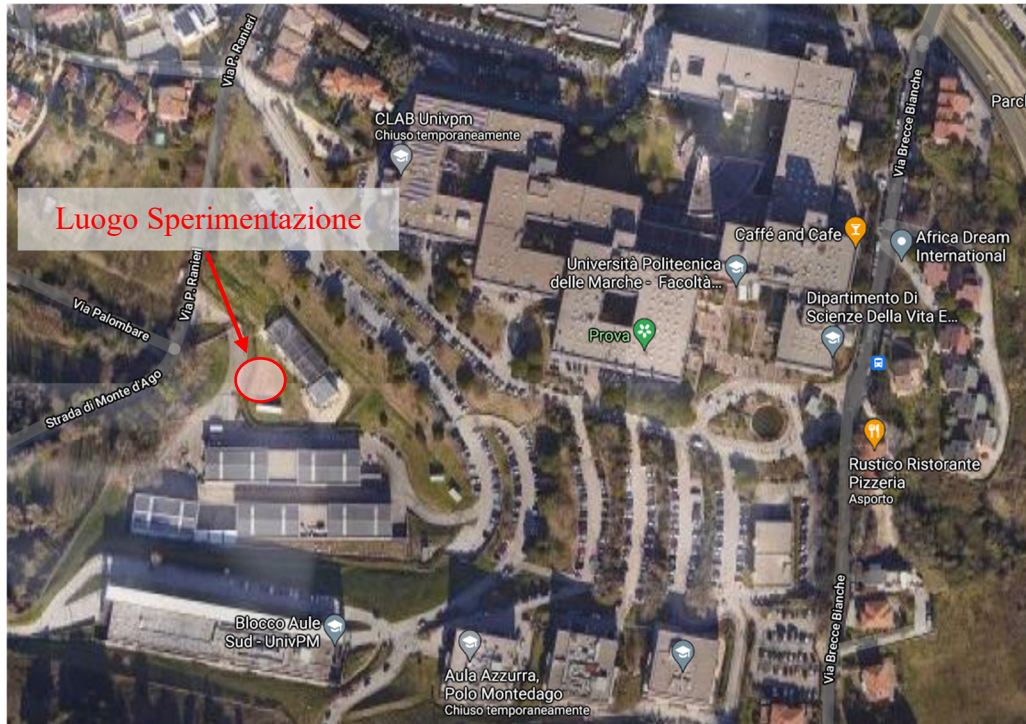


Fig. 10 – Immagine satellitare con indicazione del luogo adibito alla sperimentazione



*Figg. 11 e 12 – Area adibita alla sperimentazione*

Prima di procedere con l'installazione dell'impianto il terreno è stato opportunamente livellato; inoltre, poiché per far funzionare l'apparato servivano acqua ed energia elettrica è risultato necessario effettuare uno scavo che ha reso possibile il passaggio dei cavi elettrici e della tubazione per l'acqua.

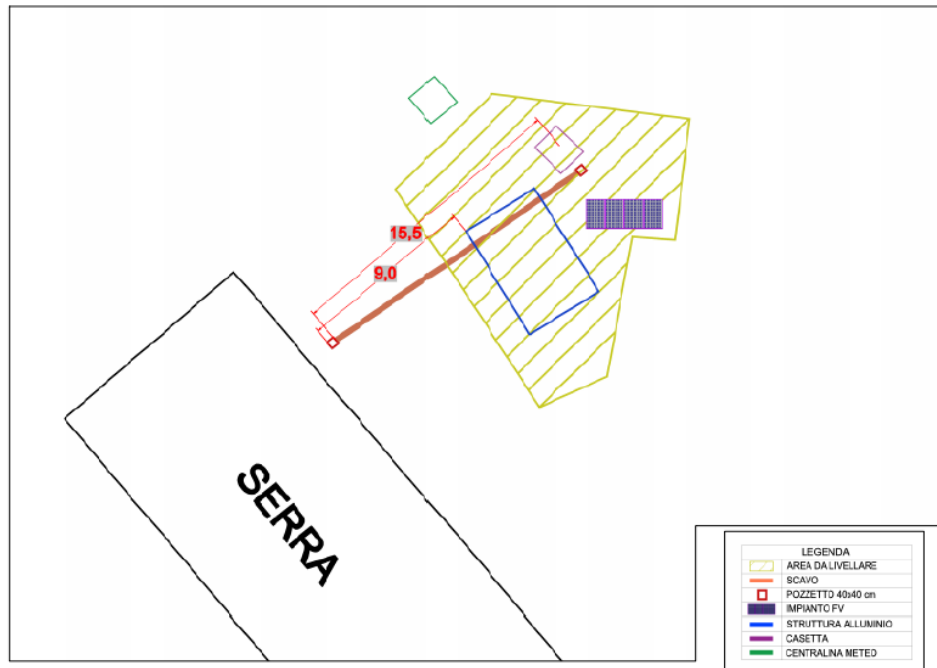
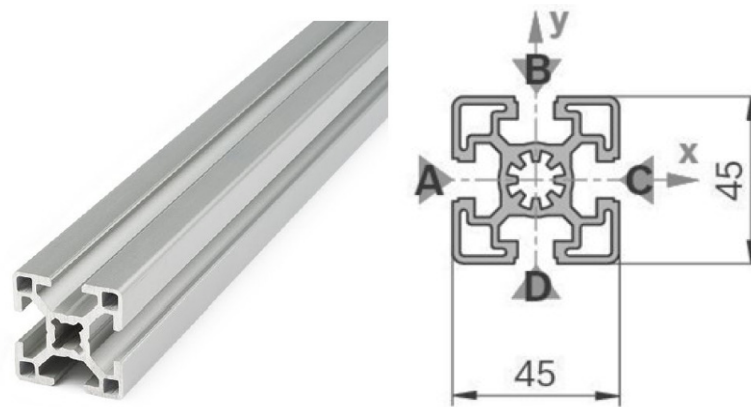


Fig. 13 – Rappresentazione Autocad dell'area sperimentale

La struttura per sostenere gli ugelli è stata realizzata con profili in alluminio e ancorata opportunamente con dei tiranti affinché fosse più stabile e resistente al vento.



Figg. 14 e 15 – Profilo in alluminio e propria sezione

La struttura in alluminio occupava un'area di 24 mq e si alzava fino a 3,00 m da terra. Alla struttura portante sono stati aggiunti 8 profili lunghi 2,00 m, questi sono stati installati in modo da poter essere spostati verticalmente permettendo di posizionare gli ugelli a diverse altezze (la sperimentazione ha previsto tre diverse altezze degli ugelli: 2,20 m, 2,60 m e 2,90 m).



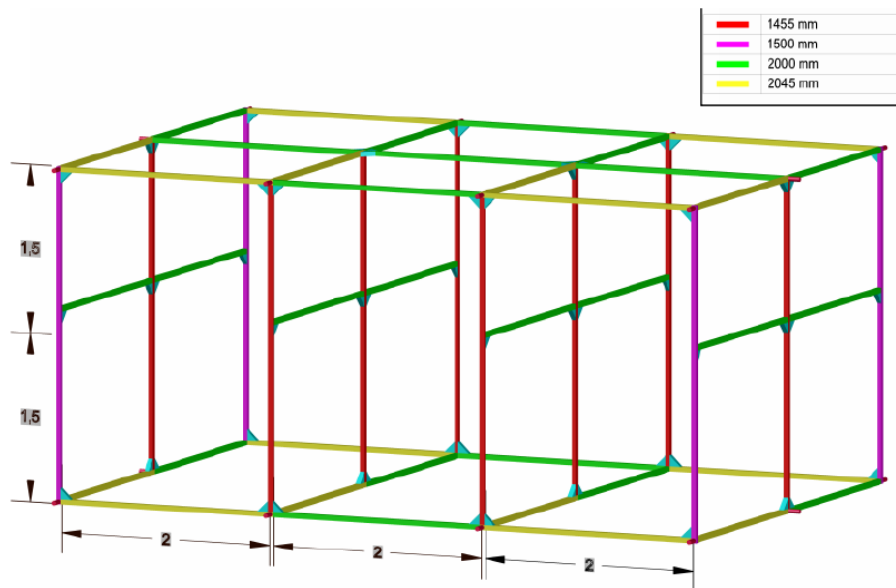


Fig. 16 – Immagine 3D della struttura

Sotto la struttura, per evitare il contatto diretto con il terreno è stato posto in opera un telo verde, così da limitare il problema del fango in caso di pioggia o effettiva bagnatura del terreno.



Fig. 17 – Foto della struttura

Per il montaggio degli ugelli sono stati utilizzati 4 tubi, disposti longitudinalmente e supportati da 4 cavi in acciaio fissati ai profilati attraverso degli anelli inseriti nelle scanalature. Questo sistema faceva sì che l'interasse delle tubazioni fosse variabile e ha permesso di valutare l'impianto in due situazioni: con interasse di 1,00 m e di 0,80 m.



*Fig. 18 – Tubi con ugelli*

Nella struttura potevano essere installate altre due componenti:

- Il telo per la schermatura del vento, posto tutto intorno alla struttura. Il vento ha un effetto importante sul sistema water mist, in quanto è in grado di trascinare le gocce di acqua nebulizzata disperdendole nell'aria.
- Il telo per la schermatura solare, posto superiormente alla struttura. Leggendo gli articoli disponibili in letteratura, si nota come l'ombreggiatura potrebbe favorire ulteriormente il sistema, in quanto combinerebbe il raffrescamento prodotto dallo spray con l'ombreggiatura solare.



### 3.2.2 Impianto di raffrescamento

L'impianto di raffrescamento è costituito dalla pompa e dagli ugelli.

È stata utilizzata una pompa Premium 70 Bar 3lt./min 230V 50Hz, con nanometro e carter coprimotore, completa di valvola di ingresso e scarico linea con pressostato inverso per la prevenzione del funzionamento a secco.

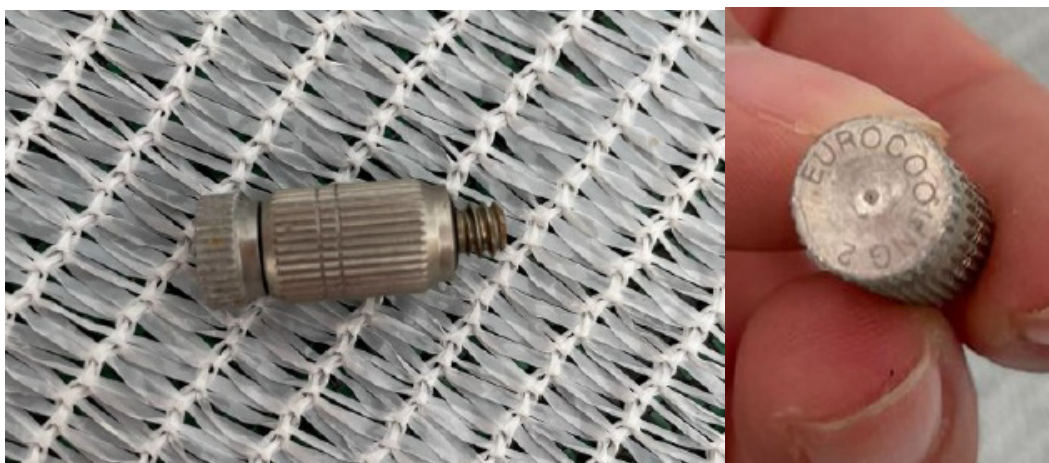


Fig. 19 – Immagine pompa

Alla pompa è collegato un sistema filtrante 1x9"-3/4" con cartucce in melt-blown da 5 micron completo di staffa, nipples, due tubi di carico e chiave di serraggio. Tra questi due elementi è stata posta una valvola di intercettazione a sfera.

Dalla pompa parte una tubazione in poliammide da 1/4" che poi si dirama nelle quattro tubazioni sulle quali sono montati gli ugelli. Per realizzare la rete di tubazioni sono stati utilizzati dei raccordi per tubo da 1/4" di due tipi: a "T" (quantità: 3) e a "L" (quantità: 4).

Poi sono stati montati 6 ugelli per ogni tubo, per un totale di 24 ugelli inox da 0,20 mm 10/24" con corpo in ottone nichelato pulibile e con sistema antigoccia.



Figg. 20 e 21 – Ugello e suo dettaglio

**PORTATA DEGLI UGELLI NEBULIZZATORI**  
Portata (LPH) (GPH) alle pressioni indicate (BAR) (PSI)

| Diametro foro     | BAR | 3    | 4    | 7    | 10   | 15    | 25    | 35    | 45    | 70    | 84    | 100   |
|-------------------|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | PSI | 42   | 56   | 100  | 142  | 213   | 355   | 500   | 640   | 1000  | 1200  | 1420  |
| 0,15 mm<br>0.006" | PGH | --   | --   | --   | --   | --    | 0,44  | 0,52  | 0,60  | 0,73  | 0,80  | 0,93  |
|                   | LPH | --   | --   | --   | --   | --    | 1,68  | 1,98  | 2,28  | 2,76  | 3,06  | 3,54  |
| 0,2 mm<br>0.008"  | PGH | --   | --   | --   | --   | --    | 0,77  | 0,92  | 1,05  | 1,25  | 1,55  | 1,60  |
|                   | LPH | --   | --   | --   | --   | --    | 2,88  | 3,41  | 3,86  | 4,72  | 5,88  | 6,06  |
| 0,3 mm<br>0.012"  | PGH | 0,37 | 0,43 | 0,55 | 0,68 | 0,78  | 1,03  | 1,23  | 1,41  | 1,74  | 2,52  | 2,63  |
|                   | LPH | 1,34 | 1,55 | 2,05 | 2,45 | 3,00  | 3,87  | 4,74  | 5,20  | 6,48  | 9,54  | 9,96  |
| 0,4 mm<br>0.015"  | PGH | 0,51 | 0,59 | 0,76 | 0,93 | 1,07  | 1,42  | 1,69  | 1,93  | 2,39  | 3,09  | 3,19  |
|                   | LPH | 1,81 | 2,13 | 2,81 | 3,36 | 4,12  | 5,32  | 6,29  | 7,14  | 8,90  | 11,70 | 12,06 |
| 0,5 mm<br>0.020"  | PGH | 0,69 | 0,80 | 1,03 | 1,26 | 1,46  | 1,93  | 2,31  | 2,63  | 3,26  | 4,23  | 4,36  |
|                   | LPH | 2,51 | 2,90 | 3,83 | 4,58 | 5,61  | 7,24  | 8,57  | 9,72  | 12,12 | 16,02 | 16,50 |
| 0,8 mm<br>0.032"  | PGH | 0,92 | 1,08 | 1,37 | 1,63 | 2,10  | 2,64  | 3,14  | 3,64  | 4,23  | 5,62  | 6,08  |
|                   | LPH | 3,51 | 4,10 | 5,20 | 6,18 | 7,99  | 10,01 | 11,90 | 13,78 | 16,03 | 21,30 | 23,02 |
| 1,0 mm<br>0.032"  | PGH | 1,28 | 1,47 | 1,88 | 2,32 | 2,77  | 3,64  | 4,35  | 4,88  | 6,12  | 7,98  | 8,48  |
|                   | LPH | 4,85 | 5,60 | 7,15 | 8,80 | 10,50 | 13,80 | 16,50 | 18,50 | 23,20 | 30,21 | 32,11 |

Test di laboratorio con acqua = 1 galone (circa 3,78 litri)

Tabella 1 – Portata degli ugelli nebulizzatori

**REPORT DIMENSIONE DELLE GOCCE**  
Nozzle Droplet Size Report

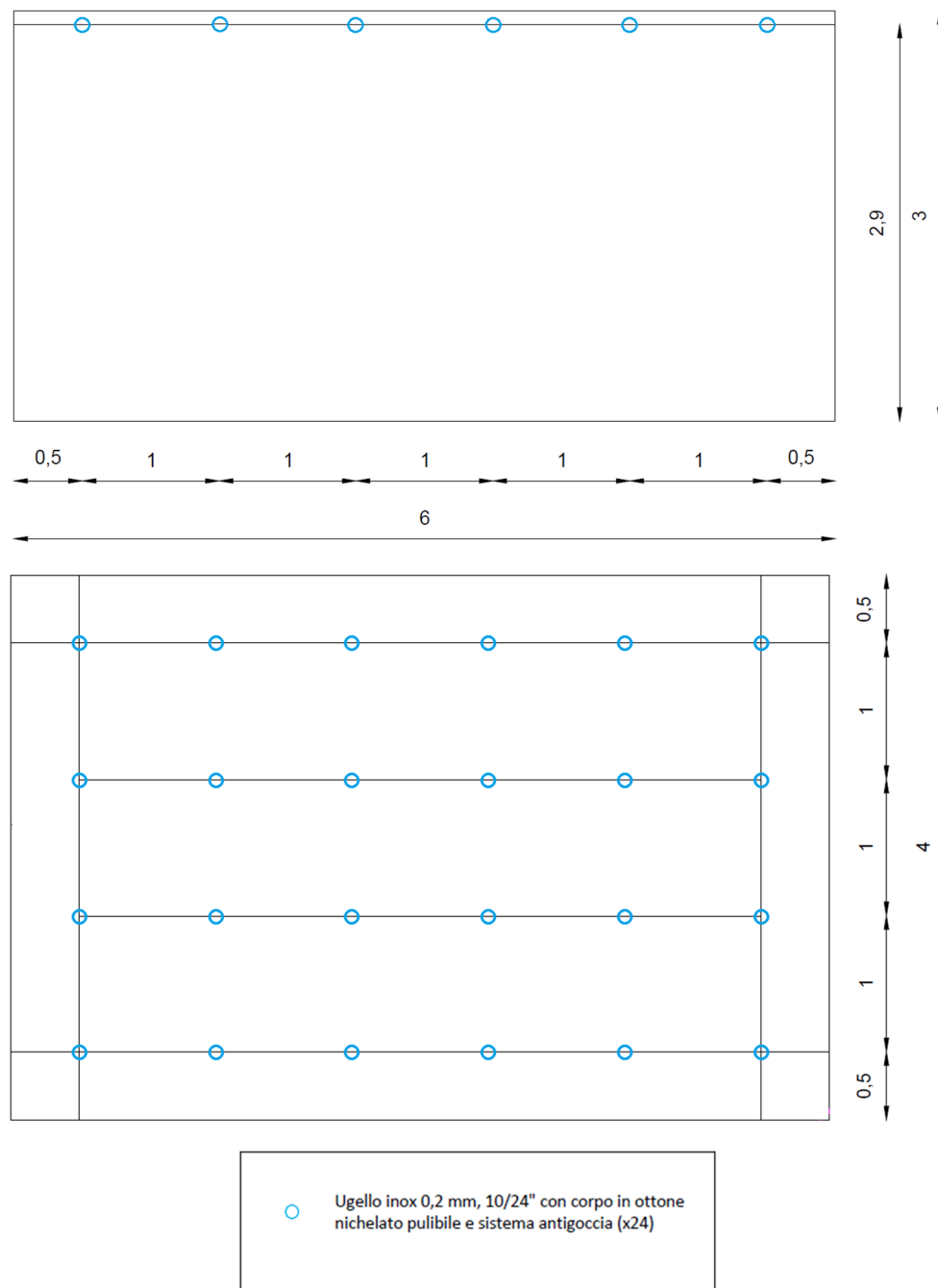
| Item     | Orifice    | Maximum of the smallest Droplet Size | Maximum of the biggest Droplet Size | Majority of the Droplet Size |
|----------|------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| EC130159 | 0,15/.006" | 6,40                                 | 27,10                               | 11,0 µm                      |
| EC130209 | 0,20/.008" | 7,00                                 | 27,30                               | 11,0 µm                      |
| EC130309 | 0,30/.012" | 7,16                                 | 33,13                               | 12,0 µm                      |
| EC130409 | 0,40/.016" | 8,00                                 | 37,50                               | 15,0 µm                      |
| EC130509 | 0,50/.020" | 8,90                                 | 41,70                               | 19,0 µm                      |
| EC130809 | 0,80/.032" | 9,40                                 | 55,00                               | 18,0 µm                      |
| EC130110 | 1,00/.040" | 10,40                                | 63,10                               | 22,0 µm                      |

All nozzles were tested at 1,000 PSI using water at 70°F (21.1°C).  
- The room humidity was between 40 and 50 % during the tests.  
- The patteration measurements were conducted using the SETscan OP600 patterator that can measure sprays up to a maximum diameter of 7 inches.

Tabella 2 – Dimensione delle gocce

Per montare gli ugelli sui rispettivi tubi, sono risultati necessari raccordi porta ugello a innesto rapido 1/4" x 10/24" di due tipi, diversi a seconda del posizionamento: lungo la linea con innesto su entrambe le estremità (20 pezzi) e in chiusura di linea con innesto unilaterale (4 pezzi).

Viene ora mostrata, attraverso elaborati realizzati su Autocad, la posizione degli ugelli, ricordando che la loro altezza e il loro interasse può essere modificato.



Figg. 22 e 23 – Sezione e Pianta Autocad rappresentative della disposizione degli ugelli

Il percorso che compie l'acqua per essere nebulizzata è il seguente: essa parte dalla linea di approvvigionamento, passa per il flussimetro, viene filtrata, attraversa la valvola di intercettazione e infine passa attraverso la pompa per arrivare agli ugelli.

Gli ugelli sono una parte molto importante all'interno dell'impianto di raffrescamento, poiché la dimensione delle particelle d'acqua dipende dalle loro caratteristiche. Il diametro degli ugelli deve essere tale da non permettere l'uscita di gocce d'acqua troppo grandi, che causerebbero un effetto bagnato sulle persone presenti nell'area, che poi si tradurrebbe in una sensazione sgradevole in termini di comfort. La dimensione degli ugelli deve essere scelta in funzione della potenzialità di raffrescamento e del prezzo. In particolare, per diametri superiori a 40  $\mu\text{m}$  il potenziale di raffreddamento diminuisce, fino a diventare trascurabile sopra 100  $\mu\text{m}$ . [16]

### 3.2.2.1 La pompa

La pompa utilizzata nell'impianto è di tipo assiale a tre pistoni, si tratta dunque di una macchina operatrice, volumetrica e idraulica. Macchina *operatrice* significa che richiede lavoro meccanico per conferire energia cinetica e di pressione ad un fluido. Macchina *volumetrica* perché sono presenti degli organi mobili che modulano la capacità di volumi nei quali il fluido viene immesso, espulso e resta chiuso ciclicamente durante le fasi di lavoro (perciò la portata è pulsante). Il lavoro meccanico deriva dall'azione delle forze che si scambiano il fluido e le pareti mobili responsabili della variazione volumetrica. Macchina *idraulica* indica che il fluido di lavoro è un liquido (in questa sperimentazione si tratta di acqua) e che la temperatura di quest'ultimo subisce variazioni modeste durante le fasi di compressione ed espansione.

Il compito della pompa è quello di fornire al fluido un lavoro meccanico ( $L_{\text{mecc}}$ ) sufficiente a vincere la prevalenza totale ( $g \cdot H_t$ ) che permetta di trasferire il fluido dal serbatoio di aspirazione a quello di mandata. Il lavoro meccanico non coincide in maniera diretta con la prevalenza totale, bensì è più elevato, in quanto bisogna contare l'energia che viene persa per le resistenze interne alla pompa ( $R_p$ ) e per le resistenze al moto esercitante dalla condotta ( $R_c$ ). Per questo l'equilibrio che deve essere soddisfatto è:

$$L_{\text{mecc}} = g \cdot H_t + R_p + R_c \quad (\text{J/kg})$$

La prevalenza totale che il fluido deve vincere è composta da tre fattori: il primo legato al salto geodetico, il secondo all'energia cinetica e l'ultimo al salto di pressione:

$$H_t = (z_B - z_A) + \frac{c_B^2 - c_A^2}{2 \cdot g} + \frac{p_B - p_A}{\gamma} \quad (\text{m})$$

Dove:  $z$  = altezza geodetica (m);

$c$  = velocità (m/s);

$g$  = accelerazione gravitazionale, 9,81 (m/s<sup>2</sup>);

$p$  = pressione (kPa);

$\gamma$  = peso specifico (N/m<sup>3</sup>).

Note la prevalenza che la pompa deve vincere e la portata di fluido che deve elaborare si può ricavare la potenza  $P$  della pompa:

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H_t}{1000 \cdot \eta_P} \quad (\text{kW})$$

In cui si ha:  $Q$  = portata (m<sup>3</sup>/s)

$\rho$  = densità del liquido, per l'acqua 1000 (kg/m<sup>3</sup>)

$\eta_P$  = rendimento della pompa, calcolato come il rapporto tra l'energia utile che la pompa cede al fluido e il lavoro meccanico speso per fornirla:

$$\eta_P = \frac{g \cdot H_t}{L_{mecc}}$$

Lo schema elementare di una generica pompa volumetrica è composto da un cilindro con due valvole (una di aspirazione e una di mandata) nel quale scorre uno stantuffo che può muoversi tra il punto morto superiore (PMS) e quello inferiore (PMI), collegato al motore attraverso un meccanismo biella-manovella.

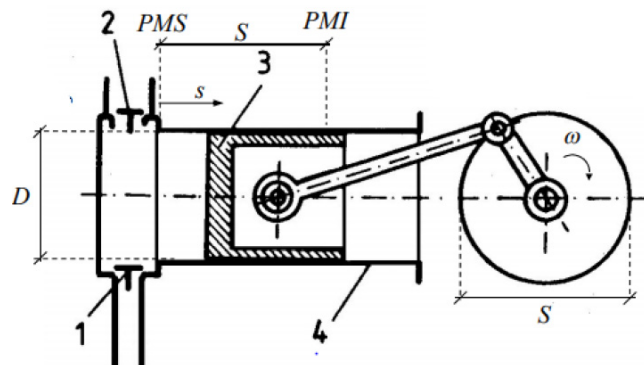


Fig. 24 – Pompa volumetrica a pistone [30]

Il ciclo realizzato dalle pompe volumetriche è costituito da quattro fasi, che differiscono leggermente tra loro per via delle differenze tra situazione ideale (fluido elaborato perfettamente incompressibile, assenza di perdite per attrito, apertura e chiusura delle valvole istantanea e assenza di fughe di fluido) e reale:

- *Compressione (1 → 2)*: nel caso ideale questa fase avviene a volume costante, mentre nella situazione reale avviene una piccola riduzione di volume e si raggiunge una pressione 2' (>2).
- *Scarico in mandata (2 → 3)*: durante questa fase il volume del fluido scaricato è minore del volume del cilindro perché il pistone arresta la sua corsa al PMS lasciando un volume (volume morto,  $V_m$ ) necessario per l'apertura e la chiusura delle valvole. Nella situazione ideale questa fase avviene a pressione costante, nel caso reale si ha una piccola riduzione della pressione.
- *Espansione (3 → 4)*: in questa fase il fluido intrappolato nel volume morto espande. Nel caso ideale avviene a volume costante, nella realtà si verifica un aumento di volume.
- *Aspirazione (4 → 1)*: durante quest'ultima fase il pistone risale dal PSM al PMI e viene introdotto il fluido all'interno del cilindro. Idealmente l'aspirazione avviene a pressione costante, realmente la pressione cresce leggermente.

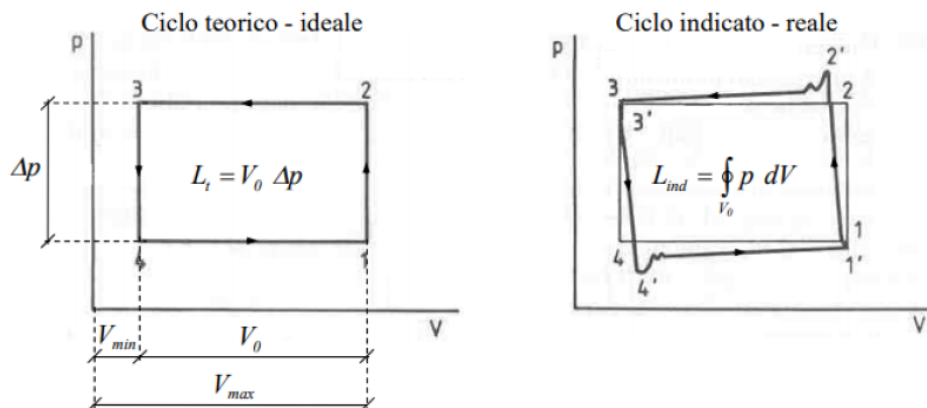


Fig. 25 – ciclo ideale e reale della pompa volumetrica [30]

Il fatto che la pompa lavora con un'alternanza delle fasi di aspirazione e scarico provoca un'irregolarità della portata in mandata. Le pulsazioni della portata sono spesso

indesiderate; quindi, sono stati studiati dei sistemi che potessero regolarizzarla. Ad esempio, si può dotare la pompa di una camera di aspirazione e una camera di scarico che compensano i momenti in cui il pistone esegue la corsa oppure possono essere utilizzate delle pompe multi-pistone come quella dell'impianto in esame.

### 3.2.2.2 Le valvole

Le valvole sono degli elementi di piping che permettono di regolare e/o controllare le condizioni di flusso del fluido che attraversa le tubazioni.

Esse vengono classificate secondo la norma UNI EN 736-1:2002 in base alla funzione che svolgono:

- *Valvole di intercettazione:* hanno il compito di impedire il passaggio del fluido a valvola chiusa; mentre, quando la valvola è aperta, il fluido passa subendo una piccola perdita di carico. Esse possono essere di tipologia diversa, quelle più usate sono valvole a farfalla, a sfera, a saracinesca o a tappo.
- *Valvole di regolazione:* permettono la modulazione controllata della portata di flusso e possono essere manuali o servozionate.
- *Valvole di riduzione:* regolano la pressione di gas o vapore.
- *Valvole di ritegno:* consentono il passaggio del fluido in un solo verso e, di conseguenza, impediscono il ritorno nella direzione opposta. Tra le più conosciute ci sono quelle a tappo e quelle a clapet.
- *Valvole di sicurezza:* sono necessarie per evitare il superamento di valori di pressione pericolosi per l'integrità della tubazione o delle apparecchiature ad essa collegate.

La valvola utilizzata nell'impianto di raffrescamento è una valvola di intercettazione a sfera.

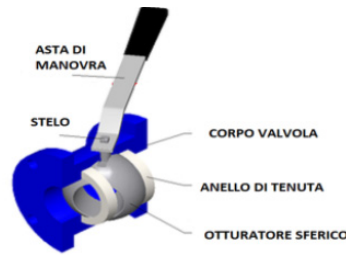


Fig. 26 – Valvola a sfera [31]

Il suo funzionamento prevede la rotazione di un otturatore sferico dotato di un foro centrale. In base alla posizione del foro e consequenzialmente della sfera, la valvola permette o meno il passaggio del fluido. Nel caso in cui l'asse del foro si trova perpendicolarmente alla condotta, il fluido viene intercettato e la valvola si dice chiusa; mentre nel caso in cui l'asse è disposto parallelamente alla condotta, il passaggio di fluido è permesso e la valvola si dice aperta. Le principali caratteristiche di questa tipologia di valvole sono: una rapida apertura e chiusura, un risparmio dell'energia di pompaggio (le perdite di carico sono basse) e un'indicazione visuale immediata della posizione della valvola tramite l'asta di manovra. Vengono utilizzate per reti di vapore, per impianti antincendio, idrocarburi liquidi, gas industriali, gas inerti, gas naturale, fluidi sporchi e slurry.

### 3.2.3 Impianto fotovoltaico

Per ridurre i consumi di energia elettrica e rendere l'impianto quanto più possibile autonomo, è stato installato un impianto fotovoltaico. Questo fa sì che se l'energia prodotta dai pannelli solari risulta sufficiente per alimentare il sistema, l'unico consumo sia quello idrico.

#### 3.2.3.1 Pannelli fotovoltaici

Le tecnologie fotovoltaiche sfruttano la natura corpuscolare della luce, quindi i fotoni. Una cella fotovoltaica è paragonabile a un diodo a semiconduttore che converte l'energia dei fotoni in energia elettrica.



La cella fotovoltaica converte l'energia luminosa incidente su di essa in maniera diretta. Le celle al silicio possono essere monocristalline (alto rendimento, alto costo), policristalline (rendimento 13-16%, costo minore), celle thin film a base di silicio.

I pannelli fotovoltaici di questo impianto sono dei moduli composti da celle in silicio monocristallino. In particolare, questi sono costituiti da: una copertura trasparente in vetro, uno strato di materiale inglobante (solitamente Etilene-Vinil-Acetano, EVA), celle fotovoltaiche, un altro strato inglobante, un black-sheet conduttivo e la scatola delle connessioni, il tutto racchiuso in un telaio solitamente in lega di alluminio anodizzato.

La radiazione solare una volta che ha attraversato lo strato di vetro trasparente e l'EVA raggiunge le celle fotovoltaiche, che sfruttano l'*effetto fotovoltaico* e trasformano l'energia solare in energia elettrica.

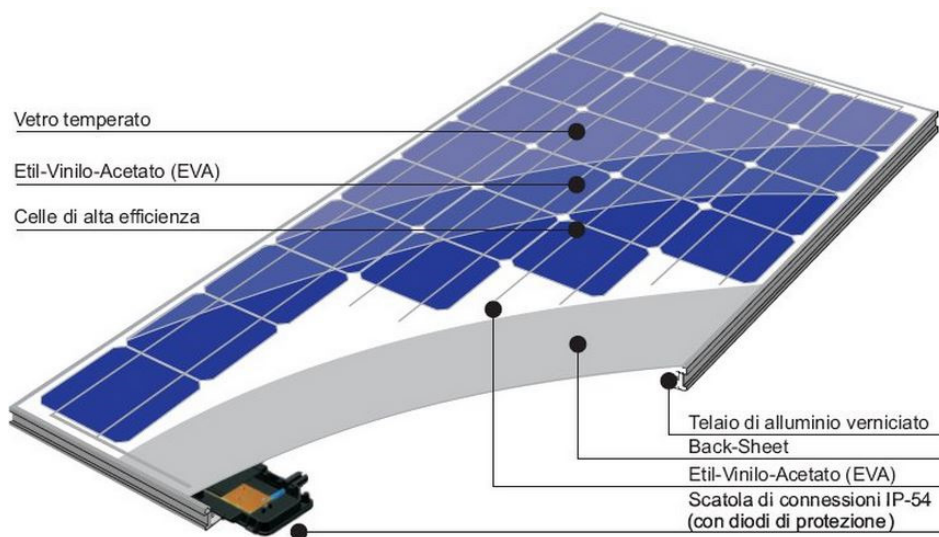


Fig. 27- Sezione generica di un pannello fotovoltaico [32]

Con effetto fotovoltaico si sintetizzano le modalità di produzione di energia elettrica di questo impianto. Nei semiconduttori come il silicio gli elettroni formano una serie di bande magnetiche: la banda superiore (con livelle energetico più alto) è detta banda conduttrice. La differenza tra il livello energetico di questa banda e la banda inferiore è detto gap energetico e corrisponde all'energia che l'elettrone deve assorbire per liberarsi (per il cristallo di Silicio si parla di 1,12 eV a 20°C di temperatura). Quando la radiazione solare colpisce la cella fotovoltaica, alcuni elettroni hanno energia sufficiente per liberarsi lasciando così nel reticolo alcune lacune. Gli elettroni dei livelli inferiori della banda di

valenza possono muoversi e occuparle, creando un moto di lacune ed elettroni. Per raccogliere l'energia elettrica ora è necessario ottenere un modo ordinato degli elettroni. Vengono così introdotte alcune particolari impurità nel reticolo cristallino del materiale semiconduttore, ovvero quest'ultimo viene *drogato*, per realizzare un campo elettrico interno alla cella. Il drogaggio consiste nell'aggiunta di atomi caricati positivamente (come il Boro) in una parte del cristallo e atomi caricati negativamente (come il fosforo) in un'altra parte. L'attrazione elettrostatica tra questi atomi crea un campo elettrico fisso che ostacola il trasferimento di elettroni in un verso e lo facilita nell'altro.

Infine, viene raccolta l'energia prodotta attraverso dei contatti metallici sui lati anteriore (contatto disposto a forma di griglia o con sottili ramificazioni) e posteriore della cella (contatto esteso su tutta la cella). [33]

Le celle fotovoltaiche sono prevalentemente di forma quadrata e di dimensioni ridotte. In questa sperimentazione si hanno delle dimensioni pari a 156 mm x 156 mm.

Per calcolare le loro prestazioni è necessario considerare due parametri [34]:

- L'efficienza  $\eta$ :

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{A \cdot P}$$

Dove:

$V_{oc}$  = tensione a circuito aperto;

$I_{sc}$  = corrente di corto circuito;

A = area cella;

P = potenza nominale specifica della cella ( $W/m^2$ )

FF = fill factor  $FF = \frac{V_{punto\ max\ rendimento} \cdot I_{punto\ max\ rendimento}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$

- L'MPP (Maximum Power Point), ovvero il punto in cui la potenza prodotta è massima, considerando la potenza elettrica erogabile il prodotto tra la tensione e la corrente ( $P = V \cdot I$ )

Calcolare l'MPP è difficile poiché dipende dalla temperatura alla quale è sottoposto l'impianto, dall'irradiazione spettrale incidente sul sistema e dall'uniformità dell'illuminazione.

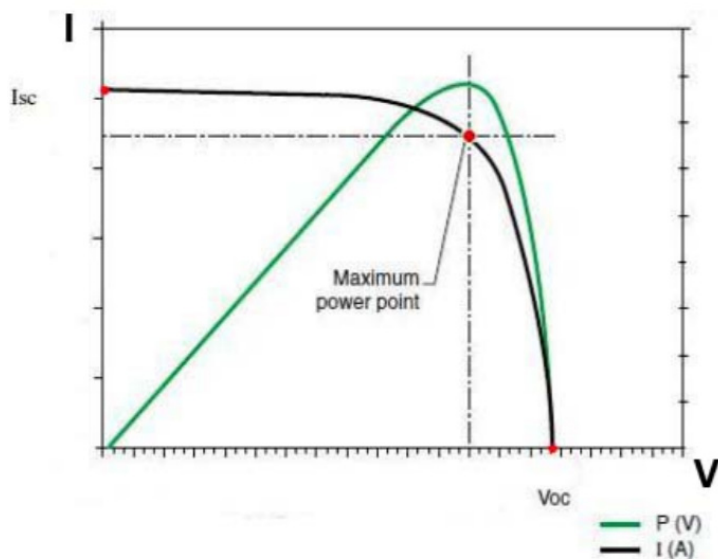


Fig. 28 - Curva tensione-corrente di una cella solare irradiata da luce

Nell'impianto di questa sperimentazione vi sono 4 pannelli fotovoltaici, tipologia: DXM6-60P/BF di Sun-Earth. Sono orientati a sud e inclinati di  $20^\circ$  per ottimizzare la produzione. Sono stati collegati in parallelo attraverso una morsetta bipolare, così la corrente dei quattro pannelli si somma, mentre la tensione in uscita è la stessa di un unico pannello.



Fig. 29 – Pannelli fotovoltaici della sperimentazione

| CARATTERISTICHE GENERALI:   |  |
|---|--|
| Eccellente resistenza alla nebbia salina e ambienti di lavoro estremi                     |  |
| Elevato livello di resistenza al fuoco (Classe 1 secondo UNI9177)                         |  |
| Elevata resistenza agli stress meccanici: carico neve 5400 Pa e carico a vento di 2400 Pa |  |
| Esente da PID (Power Induced Degradation)   |  |

Tab. 3 – Caratteristiche generali dei pannelli fotovoltaici

| CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE:                |  |
|---|--|
| Copertura frontale:                         | Vetro temprato anti riflesso/3,2 mm        |
| Celle:                                      | 60 celle monocristalline PERC 156 x 156 mm |
| Cornice:                                    | Lega di alluminio anodizzato/Colore nero   |
| Scatola di giunzione (grado di protezione): | IP67 con 3 Diodi Bypass                    |
| Cavi (lunghezza/sezione):                   | 1000 mm / 4 mm <sup>2</sup>                |
| Connettori (grado di protezione):           | IP67                                       |
| Dimensioni modulo (AxLxP):                  | 1642 x 992 x 35 mm                         |
| Peso:                                       | 18,0±3% kg                                 |

Tab. 4 – Caratteristiche costruttive dei pannelli fotovoltaici

| CARATTERISTICHE ELETTRICHE:                              |                         |
|--|-------------------------|
| Potenza Nominale (P <sub>nom</sub> ):                    | 300 W                   |
| Potenza Massima (P <sub>max</sub> ):                     | 300 W                   |
| Tensione a P <sub>max</sub> (V <sub>mp</sub> ):          | 32,7 V                  |
| Corrente nominale a P <sub>max</sub> (I <sub>mp</sub> ): | 9,17 A                  |
| Tensione a vuoto (V <sub>oc</sub> ):                     | 39,6 V                  |
| Corrente di cc (I <sub>sc</sub> ):                       | 9,66 A                  |
| Efficienza del modulo:                                   | 18,40%                  |
| Tensione massima di sistema:                             | 1000 VDC                |
| Sovracorrente massima:                                   | 16 A                    |
| Temperatura di esercizio:                                | -40°C ~ + 85°C, 85 % UR |

Tab. 5 – Caratteristiche elettriche dei pannelli fotovoltaici

| CARATTERISTICHE TERMICHE:   |             |
|---|-------------|
| Temperatura nominale di esercizio della cella:                        | 45 ± 2°C    |
| Coefficiente di temperatura di P <sub>max</sub> (γ P <sub>mp</sub> ): | -0,405 %/°C |
| Coefficiente di temperatura di V <sub>oc</sub> (β V <sub>oc</sub> ):  | -0,302 %/°C |
| Coefficiente di temperatura di I <sub>sc</sub> (α I <sub>sc</sub> ):  | +0,051 %/°C |

Tab.6 – Caratteristiche termiche dei pannelli fotovoltaici

### 3.2.3.2 Inverter

L'inverter è il dispositivo che converte la corrente continua prodotta dai pannelli fotovoltaici a corrente alternata (per l'utilizzo dell'energia elettrica). Esistono molte tipologie di inverter, il modello da utilizzare si sceglie in base al tipo di impianto; più precisamente in base all'esposizione dei moduli, in base alle scelte progettuali di manutenzione e i tempi di intervento in caso di guasto, ed infine in base ai costi e ai rendimenti.

L'inverter di un impianto fotovoltaico è provvisto di un dispositivo MPPT (Maximum power point tracker) che segue le variazioni delle caratteristiche elettriche e fa in modo di convertire la massima energia erogata dal campo.

Il rendimento dell'inverter varia per potenza convertita, per tensione del circuito in corrente continua e in base alla temperatura dell'inverter stesso.

L'inverter che è stato utilizzato in questa sperimentazione è un inverter EDISON solare fotovoltaico off-grid ad onda pura con regolatore di carica PWM integrato ad alta frequenza per impianti fotovoltaici stand-alone. Questo dispositivo può essere usato in diverse modalità: modalità con commutazione alla rete elettrica, modalità off-grid e modalità UPS. La modalità utilizzata per la sperimentazione è la prima citata, quella con commutazione da rete elettrica. In questo modo l'inverter per alimentare i carichi preleva energia dai pannelli fotovoltaici e la converte da continua ad alternata. Nel momento in cui l'energia prodotta dai pannelli non risulterà sufficiente, essa verrà prelevata alle batterie, e se nemmeno queste ultime sono in grado di fornire l'energia necessaria, l'inverter alimenterà le utenze attraverso la rete elettrica.

L'inverter in questione non è certificato CEI-021 quindi non può fornire energia alla rete elettrica ma può solo essere utilizzato per impianti stand-alone.



Fig. 30 – Dettagli inverter

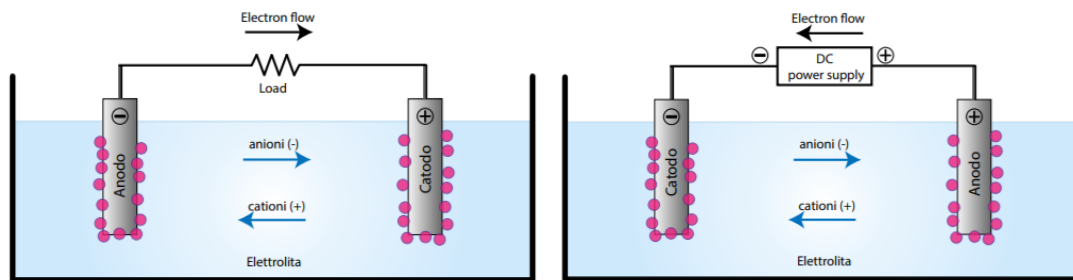
| CARATTERISTICHE GENERALI: |                    |
|---------------------------|--------------------|
| Potenza:                  | 3 kW               |
| Tensione in uscita:       | 230 V AC $\pm$ 5%  |
| Dimensioni:               | 100 x 285 x 334 mm |
| Peso:                     | 6,3 kg             |

Tab. 7 – Caratteristiche Inverter

### 3.2.3.3 Batterie

Le batterie sono un sistema di accumulo energetico di tipo elettrochimico.

Le batterie collegate agli impianti fotovoltaici permettono di accumulare l'energia generata dai pannelli e di fornirla poi nel caso in cui essi non ne producano a sufficienza. Il loro funzionamento si basa sulla cella elettrochimica: un elemento composto da due elettrodi immersi in una sostanza (elettrolita) che consente il movimento degli ioni da un elettrodo all'altro. La fase di scarica e carica della batteria consiste in un trasferimento di elettroni rispettivamente dall'anodo (elettrodo negativo) al catodo (elettrodo positivo) e viceversa [35].



*Figg. 31 e 32 – Fasi di scarica e carica della cella*

Tra i requisiti principali che devono possedere le batterie per garantire un ottimale funzionamento dell'impianto, vi sono:

- Un'elevata resistenza a numerosi cicli di carica/scarica poiché generalmente di giorno verranno caricate dal fotovoltaico, mentre di notte saranno scaricate dagli utilizzatori;
- Bassa auto-scarica: non devono scaricarsi da sole;
- Elevata capacità di accumulo C (Ah): alta quantità di carica elettrica che può essere immagazzinata e rilasciata dalla cella;
- Resistenza alle temperature, poiché i tempi di scarica dipendono dalla temperatura e più la loro resistenza è alta, più la scarica avverrà lentamente;
- Capacità di assorbire un elevato range di corrente perché essa dipende dall'intensità della radiazione solare (quindi è molto variabile).

Negli impianti fotovoltaici è possibile installare batterie al Piombo-Acido, batterie al Gel e batterie AGM.

In questa sperimentazione sono state utilizzate 4 batterie Prime di tipo AGM – deep cycle, unite attraverso un collegamento serie-parallelo per ottenere in totale una tensione di 24 V e un accumulo elettrico nominale di 7200 Wh.

Le batterie di tipo AGM – deep cycle resistono a numerosi cicli di scarica-carica, hanno una vita media molto lunga, resistono alle alte temperature, hanno bassa auto-scarica e sono veloci nella fase di carica. Hanno lo svantaggio di essere costose.

| CARATTERISTICHE GENERALI DI OGNI BATTERIA: |                  |
|--|------------------|
| Tipologia:                                 | AGM - DEEP CYCLE |
| Peso:                                      | 45 kg            |
| Capacità nominale:                         | 150 Ah           |
| Range di temperatura operativa Carica:     | 0 ~ 40 °C        |
| Range di temperatura operativa Scarica:    | -15 ~ +50 °C     |
| Immagazzinamento:                          | -15 ~ 40 °C      |
| Range di temperatura nominale:             | 25 ± 3 °C        |
| Max corrente di scarica:                   | 1500 A (5 s)     |
| Massima Tensione Ingresso PV:              | 30 V             |

*Tab. 8 – Caratteristiche delle Batterie*

In questo impianto fotovoltaico troviamo anche un Sezionatore SW60 – DC, dedicato all'isolamento e al controllo degli impianti fotovoltaici fino a 1000 V DC e installato tra i pannelli PV e l'inverter. La sua corrente d'impiego è pari a 60 A.

Inoltre, vi è un fusibile da 100 A installato sul cavo positivo che collega il sistema di batterie all'inverter.



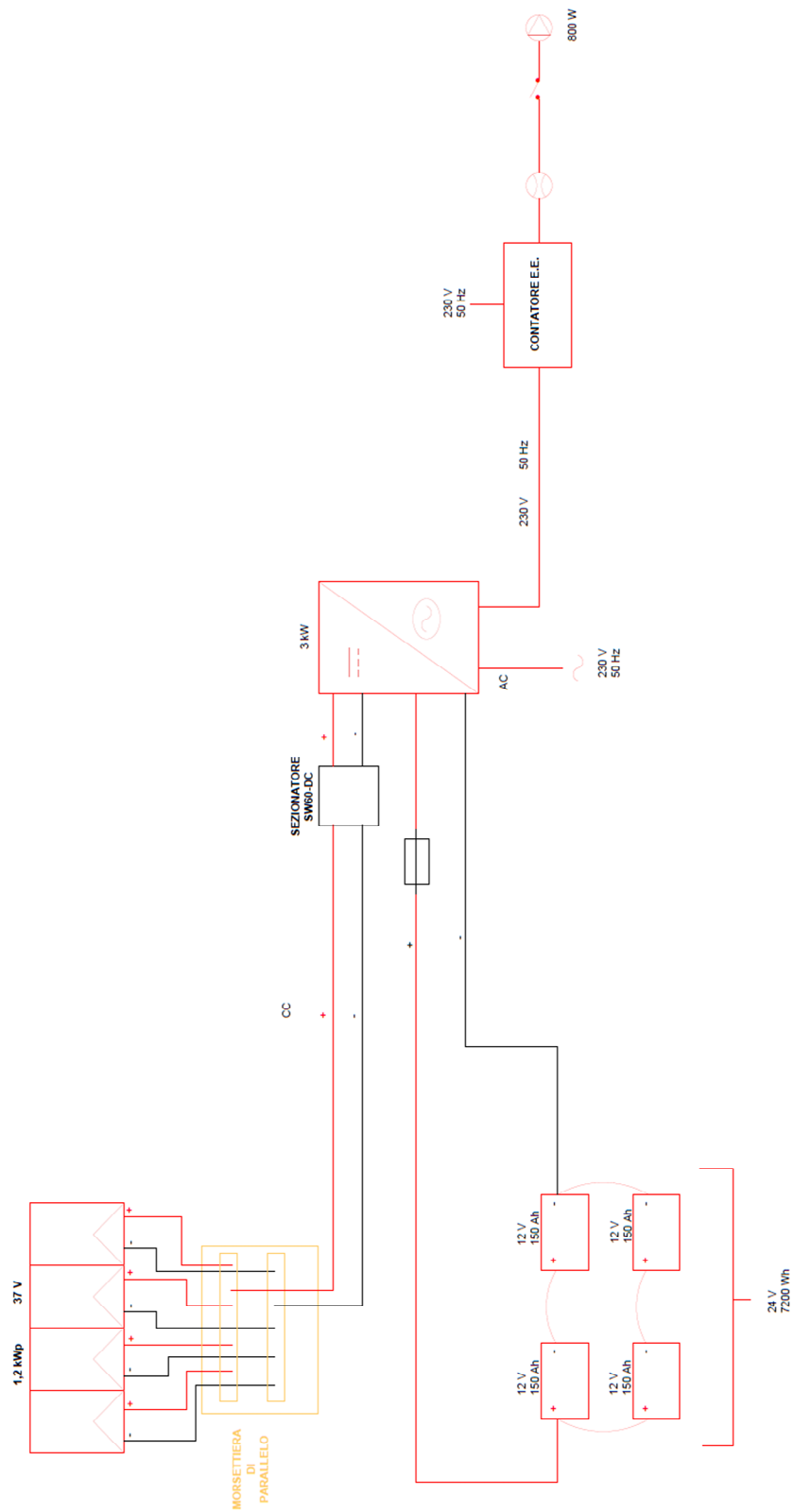


Fig. 33 – Schema logico impianto PV

### 3.2.4 Sensori

Per valutare l'impianto e la sua efficienza, sono stati installati numerosi sensori: sia all'esterno che all'interno della struttura con l'impianto di raffrescamento. Sono dunque stati analizzati i dati ottenuti monitorando tutta l'area sperimentale e tenendo conto di tutte le variabili che potevano influenzare il funzionamento e l'efficienza del raffrescamento.

Per quanto riguarda le caratteristiche dell'aria ambiente naturale (non raffrescato) i dati sono stati monitorati da una centralina meteo posizionata poco distante dalla struttura sperimentale.



*Fig. 34 – centralina meteo*

Questa centralina ha permesso di misurare:

- umidità relativa e temperatura dell'aria: attraverso un termohigrometro;
- radiazione orizzontale globale: attraverso un piranometro;
- direzione e velocità del vento: con un tacogonioanemometro a pale
- componenti diffusa e riflessa della radiazione solare: con un piranometro oscurato.

Per le misurazioni all'interno della struttura sperimentale in alluminio sono stati posizionati dei rilevatori di temperatura, umidità relativa e temperatura media radiante.

I dati relativi alla temperatura e all'umidità relativa sono stati raccolti da 4 sensori PCMINI52 prodotti dall'azienda Michell Instruments, montati su un'asta di supporto attraverso elementi di collegamento che ne permettono anche la regolazione.



*Fig. 35* – Sensore di temperatura e umidità relativa



*Fig. 36* – Sensore di temperatura e umidità relativa, dettaglio

Considerando che la radiazione solare, colpendo i sensori, avrebbe potuto influenzare le misurazioni e comprometterne la precisione, i dispositivi sono stati opportunamente schermati. Ogni sensore è stato posizionato verticalmente all'interno dell'apparato di schermatura. L'altezza dei sensori era regolabili, tuttavia è stata mantenuta a 1,10 m.

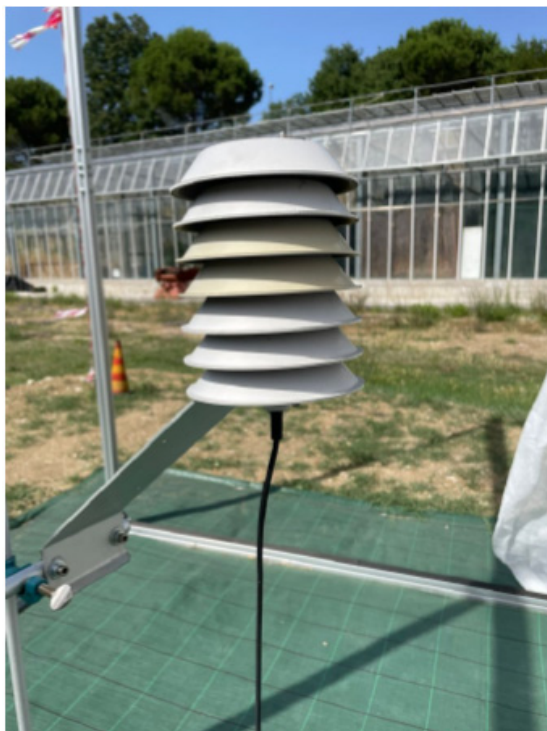


Fig. 37 – Sensore schermato

| CARATTERISTICHE GENERALI PCMINI52:      |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Materiale:                              | Polimero plastic                    |
| Conessione:                             | Connettore da 12 mm con cavo da 5 m |
| Cappuccio di protezione:                | in HDPE da 13 mm                    |
| Range di misura per la temperatura:     | -20 ~ +80 °C                        |
| Range di misura per l'umidità relativa: | 0 ~ 100 %                           |
| Accuratezza per la temperatura:         | ± 0,2 °C                            |
| Accuratezza per l'umidità relativa:     | < ± 2 % (10-90%)                    |
| Tempo di risposta:                      | < 10 sec (per 90% di step change)   |
| Segnale in uscita:                      | 0 ~ 10 V                            |
| Voltaggio di alimentazione:             | 14 ~ 35 V DC                        |

Tab. 9 – Caratteristiche sensori PCMINI52

Per misurare la temperatura media radiante sono stati disposti due globotermometri contenenti due termoresistenti (RTD). Queste ultime sono dei misuratori di temperatura realizzate con metalli ad alta conducibilità elettrica come il nickel, il rame e il platino. Il loro principio di funzionamento si basa sul fatto che la resistenza elettrica,  $R$  ( $\Omega$ ), dei

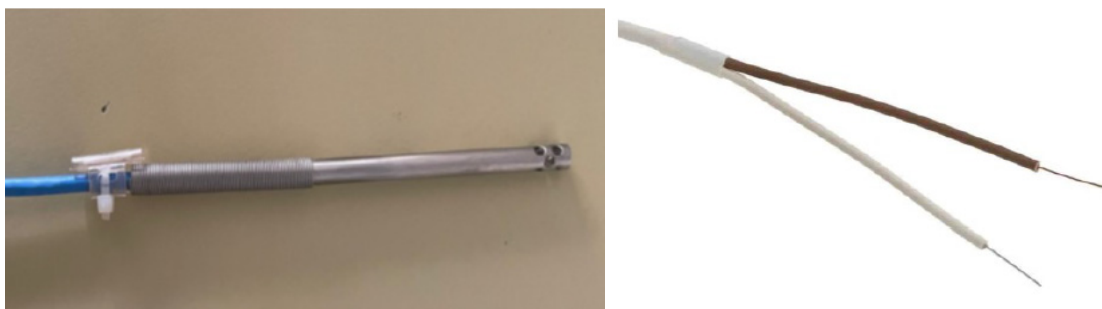
conduttori metallici dipende dalla temperatura; in particolare un aumento della temperatura provoca un aumento della resistenza.

Anche questi dispositivi sono installati su un supporto, con altezza fissa a 1,80 m da terra.



*Fig. 38 – Globotermometro*

Per realizzare una mappa della temperatura nell'area interessata al raffrescamento, sono state installate 10 termocoppie di tipo "T", realizzate in rame-costantana.



*Figg. 39 e 40 – Sonda termocoppia e filamenti termocoppia di tipo T*

Le termocoppie sono degli strumenti di misura della temperatura che sfruttano l'effetto termoelettrico, sono composte da due conduttori metallici diversi uniti in modo da formare un circuito.



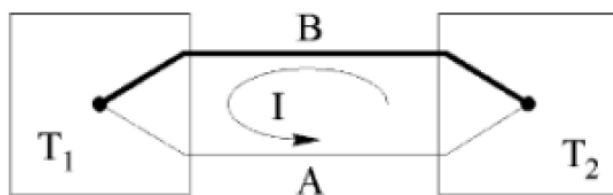


Fig. 41 – Circuito termocoppia [36]

Il loro funzionamento è basato sull'*effetto Seebeck*, che consiste nella generazione di una tensione, che a sua volta produce un flusso di corrente, dovuta alla differenza di temperatura tra i due giunti che collegano i conduttori. La corrente,  $I$ , circolante nel sistema è proprio proporzionale alla differenza di temperatura  $\Delta T = T_1 - T_2$ .

Le termocoppie sono state installate su un supporto a forma di croce e posizionate sotto un ugello, tra i due globotermometri.

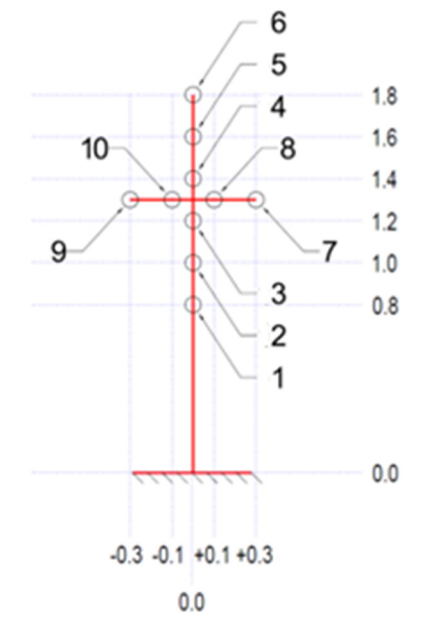
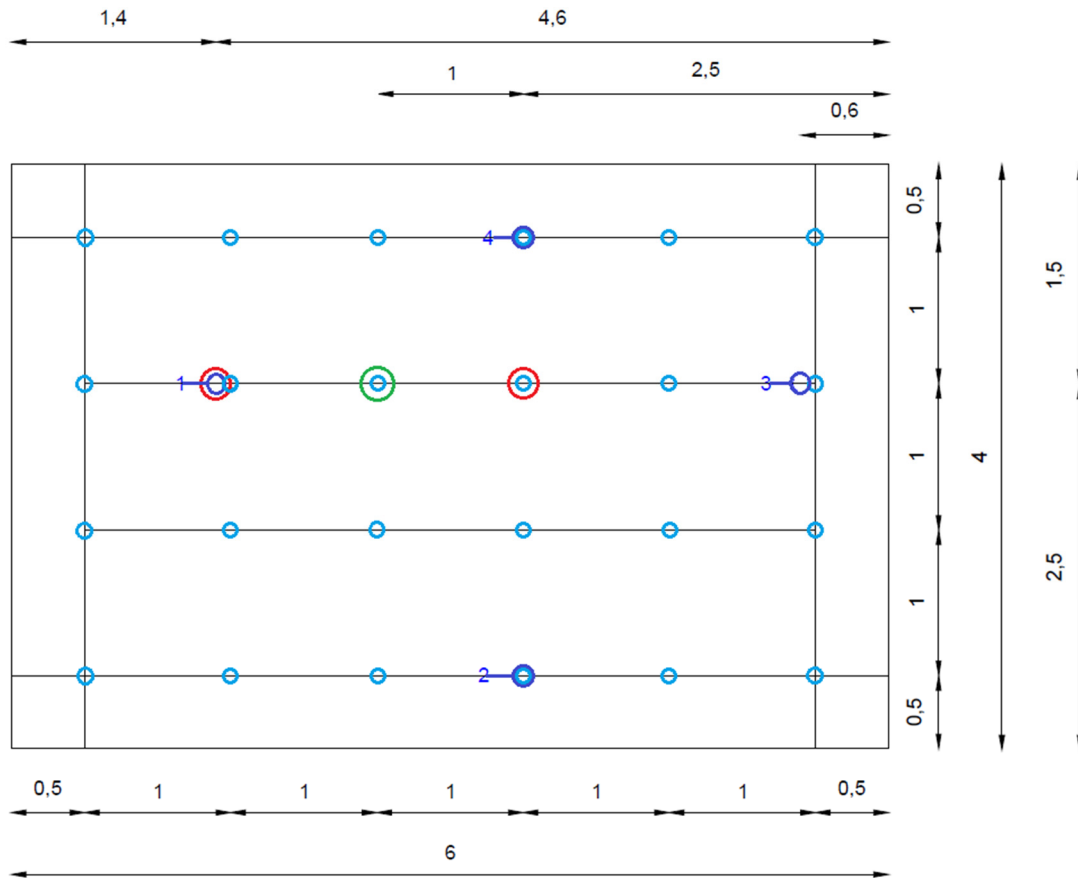


Fig. 42 – Rappresentazione delle termocoppie sul supporto (Autocad)

| CARATTERISTICHE TERMOCOPPIE:        |                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Sensibilità:                        | 48,2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| Range di misura per la temperatura: | -200 ~ +400 $^\circ\text{C}$      |

Tab. 10 – Caratteristiche Termocoppie

Attraverso rappresentazioni Autocad viene mostrata la posizione dei sensori rispetto agli ugelli.







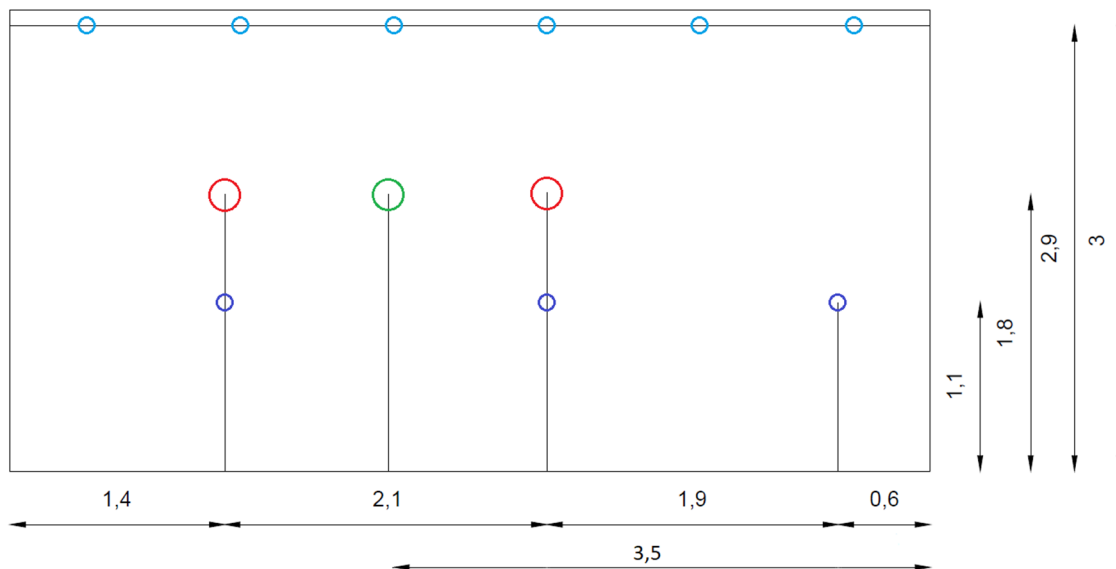
| Legenda   |   |
|---|---|
|  | Ugello inox 0,2 mm, 10/24" con corpo in ottone nichelato pulibile e sistema antigoccia (x24)      |
|  | Sensore di umidità relativa e temperatura miniaturizzato della Michell Instruments: PCMINI52 (x4) |
|  | Globotermometro contenente una termoresistenza (x2)   |
|  | Termocoppie di tipo T (x 10) su supporto  |

Fig. 43 – Pianta rappresentativa della posizione dei sensori e degli ugelli (Autocad)







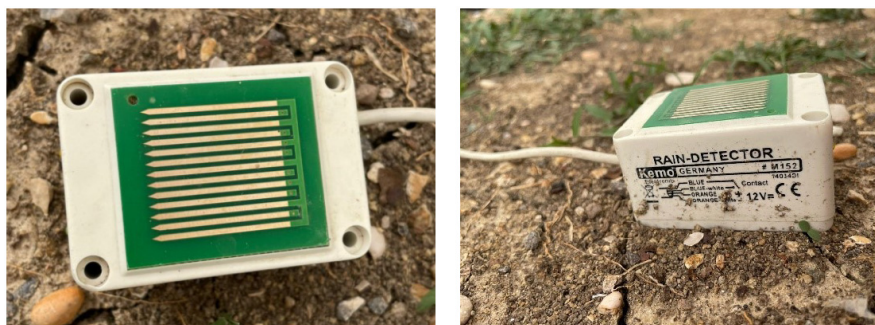
| Legenda   |   |
|---|---|
|    | Ugello inox 0,2 mm, 10/24" con corpo in ottone nichelato pulibile e sistema antigoccia (x24)      |
|  | Sensore di umidità relativa e temperatura miniaturizzato della Michell Instruments: PCMINI52 (x4) |
|  | Globotermometro contenente una termoresistenza (x2)   |
|  | Termocoppie di tipo T (x 10) su supporto  |

Fig. 44 – Sezione rappresentativa della posizione dei sensori e degli ugelli (Autocad)

L'impianto, inoltre, è stato dotato anche di altri sensori collegati alla pompa quali:

- Un sensore di pioggia che, se bagnato, entra in azione bloccando la pompa e di conseguenza interrompendo il raffrescamento;



Figg. 45 e 46 – Sensore pioggia e dettagli



- Un flussimetro necessario per la misurazione della portata istantanea e dei litri consumati;
- Un relè per la pompa;
- Un contatore di energia elettrica che permette di misurare la quantità di energia assorbita dalla pompa stessa.

### 3.2.4.1 Monitoraggio e controllo del sistema

Un buon sistema di controllo è fondamentale per l'acquisizione dei dati misurati dai sensori. In questa sperimentazione sono stati utilizzati due programmi specifici:

- **LabVIEW** nel quale è stato realizzato un VI nel front panel che è collegato sia ai sensori per la misurazione delle condizioni meteorologiche che ai sensori della pompa. Le schede collegate ai sensori sono:
  - NI 9401 - Relè pompa e Water flow sensor;
  - NI 9219 - Rain detector;
  - NI 9216 - Globotermometri;
  - NI 9205 - 4 sensori UR e T;
  - NI 9214 - termocoppie;
  - Collegamento VISA RS485 per la stazione Meteo.

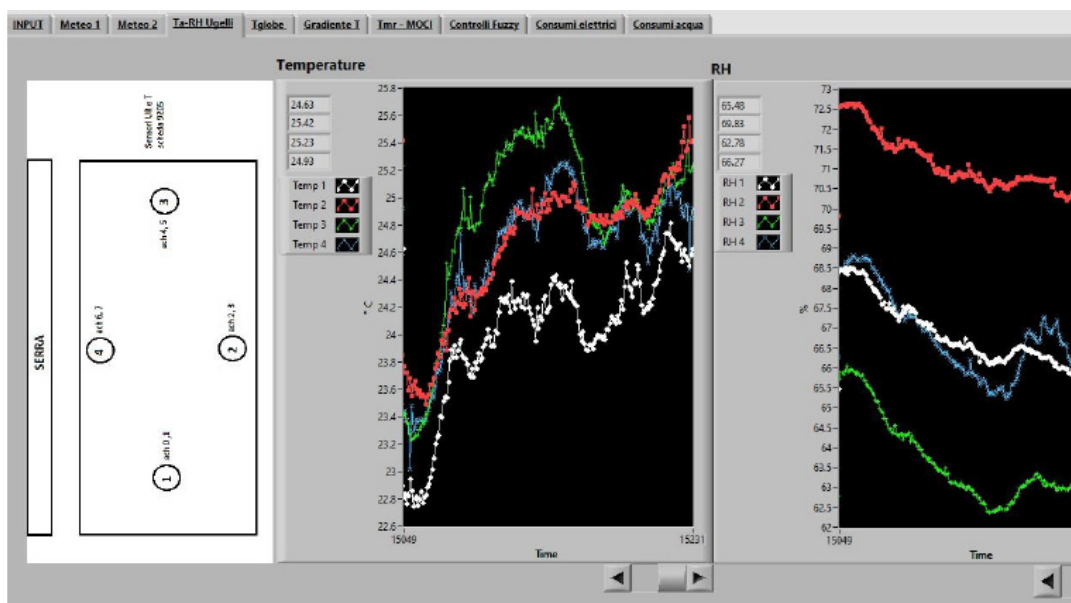


Fig. 47 – Schermata LabVIEW

- “Watch Power”, software che monitora i dati relativi all’impianto fotovoltaico. È importante monitorare se l’impianto preleva energia dalla rete o se lavora autonomamente, e per questo vengono acquisite le informazioni nel pannello “Basic Information”.

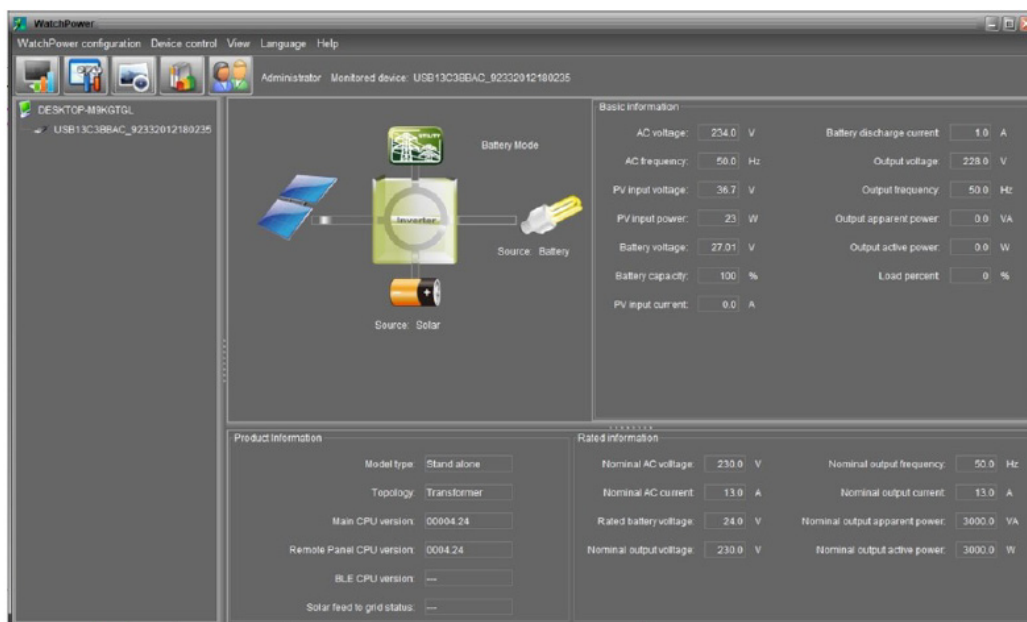
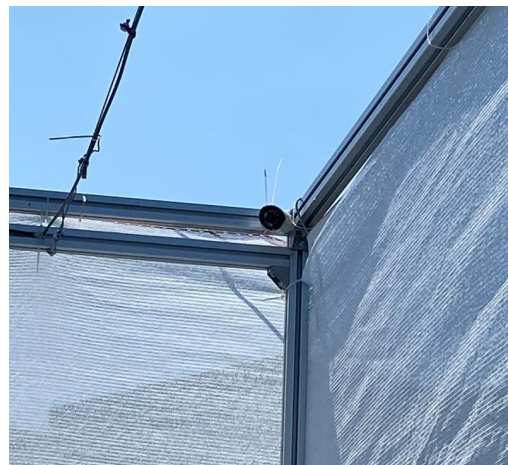


Fig. 48 – Schermata Watch Power

Per osservare da remoto l’area sperimentale sono state installare due telecamere.



Figg. 49 e 50 – Immagini Telecamere

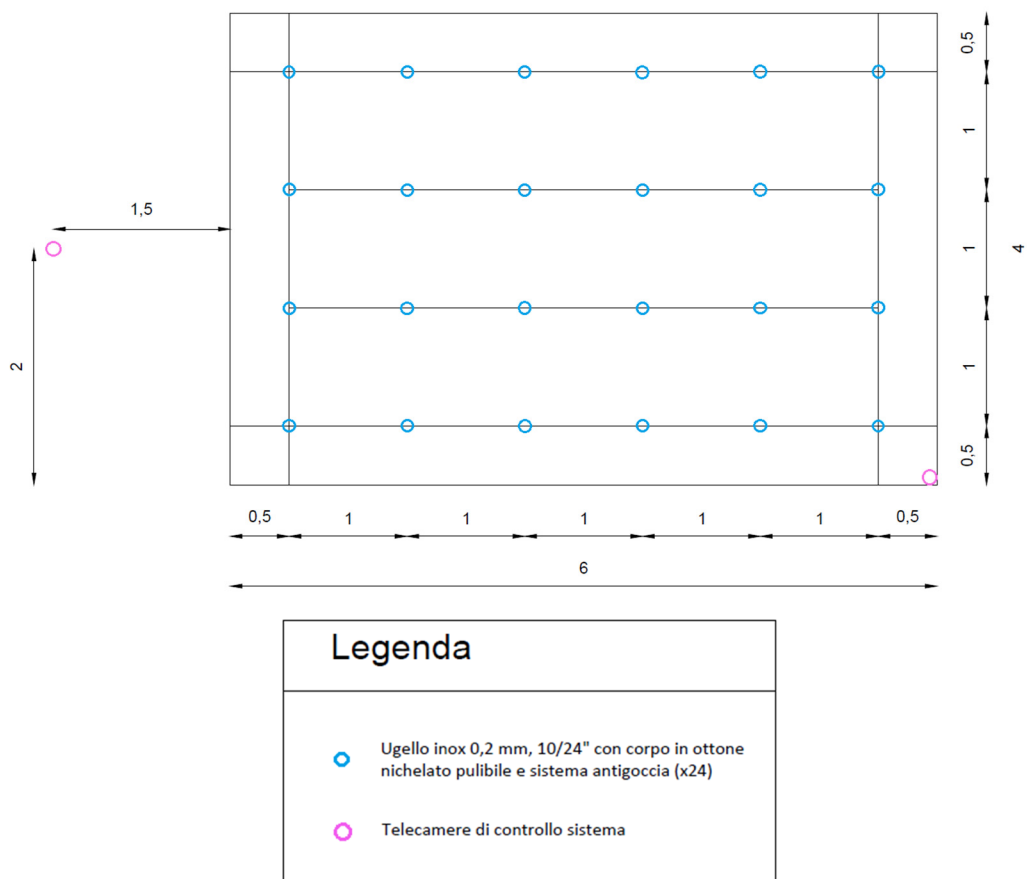


Fig. 51 – Pianta con ugelli e posizione telecamere (Autocad)

Infine, accanto alla struttura sperimentale è stata posizionata una casetta nella quale sono stati riposti: PC, inverter, batterie, quadri elettrici e schede dei sensori.



Figg. 52 e 53 – Casetta visione esterna e interna

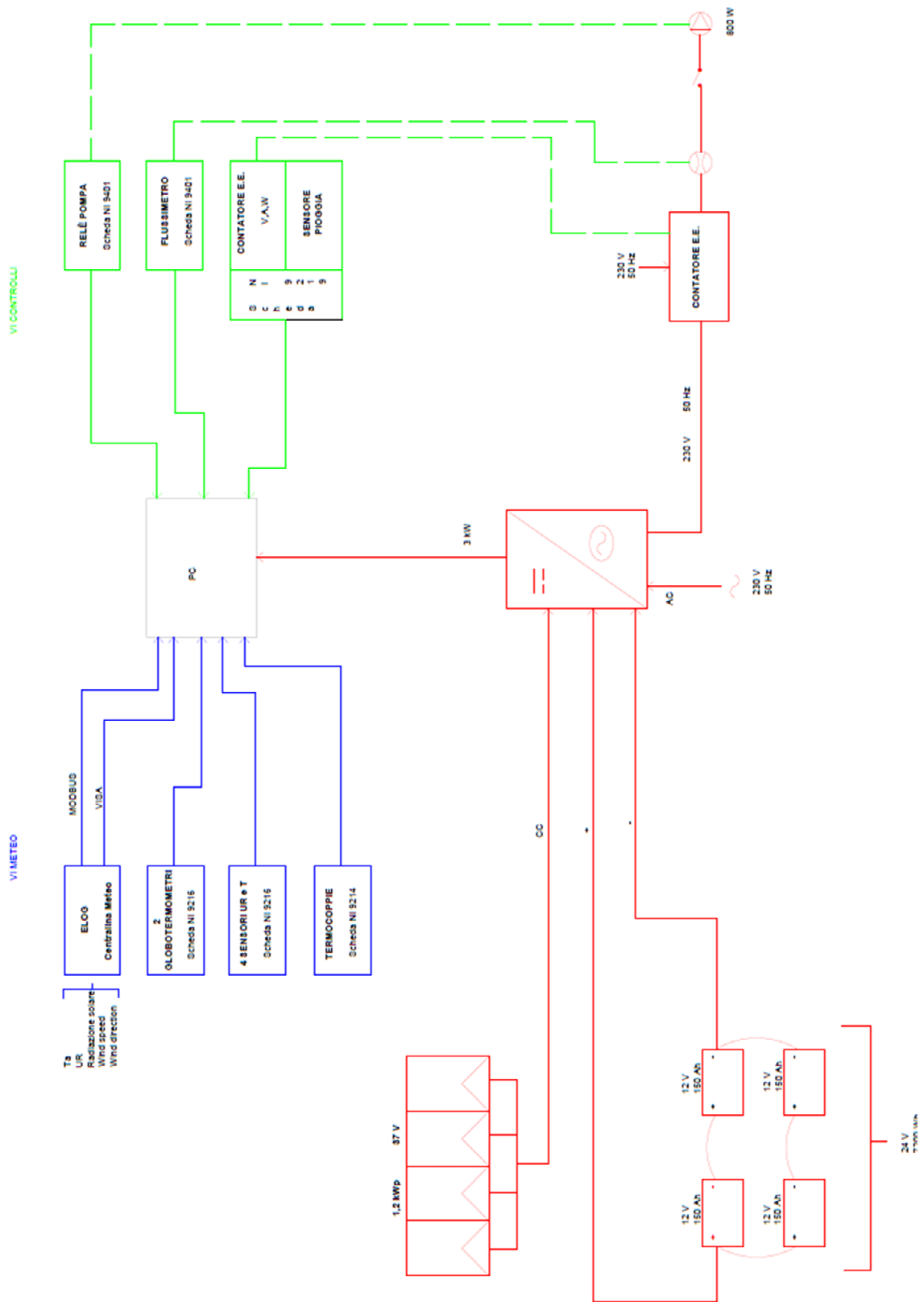


Fig. 54 – Schema logico impianto

### 3.3 Metodi

La sperimentazione ha avuto luogo presso l'Università Politecnica delle Marche, e nasce grazie alla collaborazione tra la nostra Università e l'ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile).

L'allestimento dell'area sperimentale è avvenuto tra maggio e i primi giorni di giugno 2021. Dopo aver livellato il terreno e realizzato lo scavo, è stato posto il telo verde per fare in modo che la struttura non fosse a contatto diretto con il terreno e in caso di pioggia non ci fossero problemi di fango. Successivamente è stata montata la struttura, è stata posizionata la pompa, sono stati collegati gli ugelli con le tubazioni e sono poi stati montati sulla struttura. Contemporaneamente venivano posti in opera anche i pannelli fotovoltaici, la casetta e la centralina meteo. A questo punto è stato possibile effettuare i collegamenti elettrici (dell'impianto fotovoltaico, della pompa e del PC che è stato posizionato all'interno della casetta) e il collegamento idrico che alimenta la pompa. Come ultima fase sono stati posizionati i sensori e sono stati collegati al PC attraverso le rispettive schede.

Avendo già descritto le fasi e i materiali relativi alla sperimentazione, si procede ora con la discussione delle metodologie applicate per la raccolta e l'analisi dei dati ottenuti.

Le prime acquisizioni di dati sono state effettuate l'11 giugno e la sperimentazione è proseguita fino al mese di agosto.

#### 3.3.1 Raccolta e analisi dei dati

La fase di raccolta dei dati è stata svolta scaricando i dati acquisiti dai due Software (LabVIEW e Watch Power) e riportandoli in Fogli Excel.

Per quanto riguarda LabVIEW, ogni 12 secondi venivano acquisiti i dati monitorati dai sensori sia interni che esterni.

Le grandezze che sono venivano riportate nei fogli Excel (uno per ogni giorno) erano le seguenti:

| GRANDEZZA  | SIGLA                | UNITÀ DI MISURA        |
|--|----------------------|------------------------|
| Temperatura Ambiente (centralina meteo)          | Ta                   | °C                     |
| Umidità Relativa                                 | UH                   | %                      |
| Velocità del vento                               | ws                   | m/s                    |
| Direzione del vento                              | wd                   | °                      |
| Radiazione globale orizzontale                   | Ig                   | W/m <sup>2</sup>       |
| Radiazione diffusa orizzontale                   | Idiff                | W/m <sup>2</sup>       |
| Dimensione ugelli                                | Dimens_ugelli        | mm                     |
| Temperatura rilevata dal sensore 1               | Temp1                | °C                     |
| Temperatura rilevata dal sensore 2               | Temp2                | °C                     |
| Temperatura rilevata dal sensore 3               | Temp3                | °C                     |
| Temperatura rilevata dal sensore 4               | Temp4                | °C                     |
| Umidità Relativa rilevata dal sensore 1          | Rumid1               | %                      |
| Umidità Relativa rilevata dal sensore 2          | Rumid2               | %                      |
| Umidità Relativa rilevata dal sensore 3          | Rumid3               | %                      |
| Umidità Relativa rilevata dal sensore 4          | Rumid4               | %                      |
| Temperatura rilevata dal Globotermometro 1       | Tglob1               | °C                     |
| Temperatura rilevata dal Globotermometro 2       | Tglob2               | °C                     |
| Temperatura rilevata dalla Termocoppia 1         | T1                   | °C                     |
| Temperatura rilevata dalla Termocoppia 2         | T2                   | °C                     |
| Temperatura rilevata dalla Termocoppia 3         | T3                   | °C                     |
| Temperatura rilevata dalla Termocoppia 4         | T4                   | °C                     |
| Temperatura rilevata dalla Termocoppia 5         | T5                   | °C                     |
| Temperatura rilevata dalla Termocoppia 6         | T6                   | °C                     |
| Temperatura rilevata dalla Termocoppia 7         | T7                   | °C                     |
| Temperatura rilevata dalla Termocoppia 8         | T8                   | °C                     |
| Temperatura rilevata dalla Termocoppia 9         | T9                   | °C                     |
| Temperatura rilevata dalla Termocoppia 10        | T10                  | °C                     |
| Cooling power index                              | PE                   | mcal/cm <sup>2</sup> s |
| Humidex  | Humidex              | °C                     |
| Temperatura minima ugelli                        | Tmin_ugelli          | °C                     |
| Tempo di attivazione di un ciclo di acquisizione | Duty_cycle           | s                      |
| Orario inizio                                    | Ora_inizio_controlli | h                      |
| Orario fine                                      | Ora_fine_controlli   | h                      |
| Temperatura attivazione                          | Temp_attivazione     | °C                     |
| Controllore Temporizzato                         | Temporizzato         | True/False             |
| Controllore Manuale                              | Manuale              | True/False             |
| Pioggia  | Pioggia              | True/False             |



|                           |                               |                   |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Potenza Pompa             | Watt                          | W                 |
| Tensione Pompa            | Volt                          | V                 |
| Corrente                  | Ampere                        | A                 |
| Energia istantanea        | Wh_elettrico_istantanei       | Wh                |
| Energia accumulata        | Wh_elettrico_cumulati         | Wh                |
| Impulsi cumulati          | Impulsi_cumulati              | -                 |
| Impulsi istantanei        | Impulsi_istantanei            | -                 |
| Portata volumetrica       | Portata_volumetrica           | m <sup>3</sup> /h |
| Litri consumati           | Litri_consumati               | l                 |
| MOCI sensore 1            | MOCI 1                        | -                 |
| MOCI sensore 2            | MOCI 2                        | -                 |
| MOCI sensore 3            | MOCI 3                        | -                 |
| MOCI sensore 4            | MOCI 4                        | -                 |
| Differenza di temperatura | $\Delta_{Ta\_media\_sensori}$ | °C                |
| Altezza ugelli            | Altezza_ugelli                | m                 |
| Telo Laterale             | Telo_laterale                 | True/False        |
| Telo superiore            | Telo_superiore                | True/False        |

Tab. 11 – Dati restituiti da LabVIEW

Altezza degli ugelli, telo laterale e superiore e controllore manuale o temporizzato sono le variabili che, insieme all'interasse degli ugelli, compongono i vari layout. True indica quando una condizione è presente, False ne indica l'assenza.

Il controllore può essere *manuale*: quindi azionato alle ore 9 e mantenuto costantemente in funzione fino alle ore di 19; oppure *temporizzato*. Controllore temporizzato significa che l'impianto funziona in maniera ciclica: per 20 secondi è in ON e quindi la pompa è attiva e gli ugelli spruzzano l'acqua nebulizzata, poi per 20 secondi va in OFF e quindi si disattiva. Questo ciclo si ripete costantemente dalle 9 alle 19, inoltre in questo caso se la temperatura dell'aria esterna è inferiore a 26°C il sistema si spegne automaticamente, perché la condizioni esterne non sono rappresentative dell'isola di calore e dunque il sistema water mist non si attiva.

La differenza di temperatura viene calcolata come la differenza tra la temperatura dell'aria non trattata ( $T_a$ ) e la media delle temperature rilevate dai sensori ( $\frac{Temp1+Temp2+Temp3+Temp4}{4}$ ).

Successivamente sono stati calcolati anche  $\Delta T$  e  $\Delta RH$  per valutare di quanti gradi effettivamente si abbassa la temperatura e quanto invece l'umidità relativa cresce a causa delle particelle d'acqua.

$$\Delta T = \frac{Temp1 + Temp2 + Temp3 + Temp4}{4} - Ta$$

$$\Delta RH = \frac{Rumid1 + Rumid2 + Rumid3 + Rumid4}{4} - RH$$

Queste variazioni sono poi state confrontate nelle varie configurazioni, con l'obiettivo di trovare il layout più adatto al sistema water mist.

Le configurazioni studiate e confrontate sono 7, e variano in base a:

- Altezza degli ugelli: essa può variare tra 2,20, 2,60 e 2,90 m;
- Interasse degli ugelli: 1,00 o 0,80 m;
- Telo laterale di schermatura del vento: *presenza* o *assenza*;
- Telo superiore di schermatura sole: *presenza* o *assenza*;
- Controllore: *temporizzato* quando viene attivato con 20 secondi di *on* e 20 di *off*, *manuale* quando viene attivato alle 9 e spento alle ore 19;

| Nome configurazione | Giorni di validità                    | Altezza ugelli | Interasse ugelli | Telo superiore | Telo laterale | Controllore  |
|---------------------|---------------------------------------|----------------|------------------|----------------|---------------|--------------|
| Configurazione 1    | 06-07 luglio                          | 2,60 m         | 1,00 m           | false          | false         | temporizzato |
| Configurazione 2    | 08-09 luglio                          | 2,60 m         | 1,00 m           | false          | false         | manuale      |
| Configurazione 3    | 11-15 luglio                          | 2,60 m         | 1,00 m           | true           | false         | manuale      |
| Configurazione 4    | 21-23 luglio                          | 2,20 m         | 1,00 m           | true           | false         | manuale      |
| Configurazione 5    | 24-26 luglio                          | 2,20 m         | 1,00 m           | true           | true          | manuale      |
| Configurazione 6    | 28-29 luglio                          | 2,90 m         | 1,00 m           | true           | true          | manuale      |
| Configurazione 7    | 30 luglio; 01-05 agosto; 10-11 agosto | 2,60 m         | 0,80 m           | true           | false         | manuale      |

Tab. 12 – Sintesi delle 7 configurazioni

Di ciascuna configurazione si sono osservati: differenza di temperatura  $\Delta T$  [°C] e differenza di umidità relativa  $\Delta RH$  [%] confrontandoli prima con la temperatura dell'aria esterna  $Ta$  [°C], poi con la radiazione media  $Ig$  [W/m<sup>2</sup>], infine, con la velocità del vento  $ws$  [m/s].



Questi risultati sono stati poi relazionati a coppie, ovvero confrontando ogni volta di configurazioni diverse, tra le quali cambiava solo una variabile in gioco.

In particolare, le configurazioni sono state confrontate nella seguente maniera:

- Configurazione 1 vs Configurazione 2: varia il tipo di controllore;
- Configurazione 3 vs Configurazione 4: varia l'altezza degli ugelli (è presente solo telo superiore);
- Configurazione 5 vs Configurazione 6: varia l'altezza degli ugelli (sono presenti entrambi i teli di schermatura);
- Configurazione 4 vs Configurazione 5: varia la presenza di teli, nella 5 sono entrambi presenti, nella 4 solo quello di schermatura solare;
- Configurazione 3 vs Configurazione 7: varia l'interasse degli ugelli.

Le differenze tra le configurazioni sono state rappresentate attraverso due tipi di grafici, entrambi ottenuti grazie al software MATLAB. MATLAB è una piattaforma di programmazione e calcolo numerico utilizzata da milioni di ingegneri e scienziati per l'analisi di dati, lo sviluppo di algoritmi e la creazione di modelli.

I due tipi di grafici analizzati sono:

- I *grafici a dispersione*, in inglese scatterplots, che rappresentano uno tra i metodi più utilizzati in statistica descrittiva per valutare la relazione tra due variabili quantitative. In questo tipo di grafico le due variabili sono riportate su uno spazio cartesiano, i valori di una variabile sono indicati sull'asse orizzontale delle x, mentre i valori dell'altra variabile sono rappresentati sull'asse verticale delle y. Ogni unità statistica è rappresentata da un punto posizionato sul grafico in base alle sue coordinate. Quindi questo grafico sarà costituito da tanti punti quante sono le unità statistiche oggetto di studio. [37]

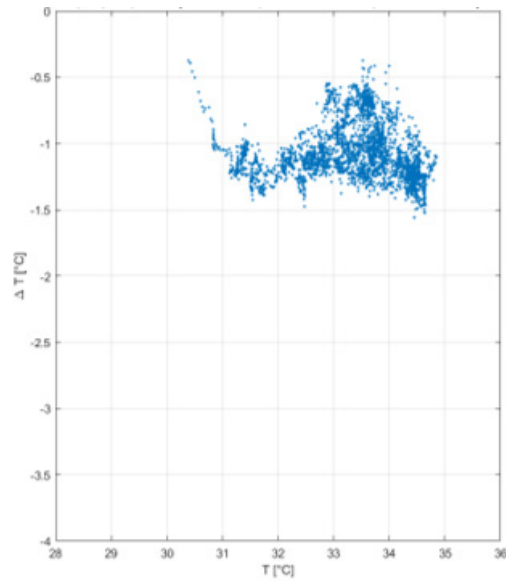


Fig. 55 – Esempio di Grafico a dispersione ottenuto da MATLAB.

- I *box and whiskers plot*, (in italiano *diagramma a scatola e baffi*) che sono dei tipi di grafici statistici che si utilizzano sempre per variabili quantitative. Questo grafico è molto utile per capire se la distribuzione è simmetrica oppure asimmetrica e per confrontare la forma di più distribuzioni, ma soprattutto ti permette di identificare rapidamente se ci sono valori anomali e outliers. All'interno di un box plot sono indicati il valore minimo, il primo quartile, la mediana, il terzo quartile ed il valore massimo di una variabile.

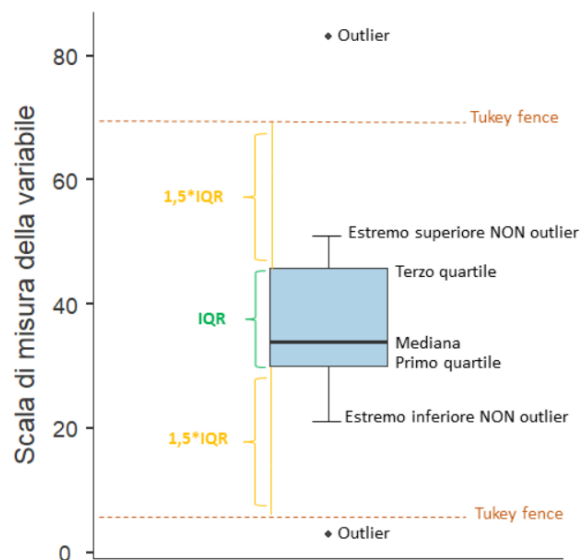


Fig. 56 – Esempio di box plot [37]

La scatola è compresa tra il primo e il terzo quartile e rappresenta l'ampiezza della metà centrale della distribuzione (contiene il 50% delle osservazioni effettuate). La linea all'interno del box è il valore mediano. I baffi (segmenti che partono dalla scatola) indicano la dispersione dei valori inferiori al primo quartile e superiori al terzo, non classificati come outliers. Il baffo superiore si estende verso l'alto fino al valore massimo che è  $\leq 1,5 \times$  il range interquartile (IQR). Il baffo inferiore invece si estende verso il basso fino al più piccolo valore  $\geq 1,5 \times$  IQR. Gli outliers sono rappresentativi di valori anomali e sono indicati da punti isolati oltre i baffi. [37]

Per sintetizzare i risultati ottenuti da ciascuna configurazione è stata misurata l'efficienza in percentuale in termini di temperatura con la seguente operazione:

$$(T_{\text{zona spray}} - T_{\text{ambiente}}) / T_{\text{ambiente}} * 100.$$

Poi la stessa cosa è stata fatta con l'umidità relativa.

Le sette configurazioni sono state confrontate sempre attraverso box plots che hanno permesso di verificare quale layout fosse più performante dal punto di vista del raffrescamento e dell'accrescimento di umidità relativa.

### 3.3.2 Valutazione del comfort tramite questionari

La seconda parte di questa sperimentazione prevedeva l'utilizzo di questionari di valutazione del comfort per far valutare l'efficienza del sistema alle persone.

Grazie allo studio della letteratura disponibile fino ad oggi è stato possibile redigere un questionario valutativo che tenesse conto delle sensazioni termiche, della percezione del sudore e dell'umidità e della sensazione di comfort provate dai soggetti.

Sulla base di quanto letto si è scelto di fare la sperimentazione in condizioni ombreggiate; quindi, in ambiente naturale è stato predisposto un gazebo, mentre nella struttura spray è stato posto in opera il telo di schermatura della radiazione solare.



*Fig. 56 – Gazebo per test con questionari*



*Fig. 57 – Zona spray per test con questionari*

Le persone durante il test sono state sedute, simulando la permanenza in un ristorante. Per questo gli ugelli sono stati spostati a 2,20 m di distanza dal terreno, lasciando come spazio tra la testa degli occupanti e gli ugelli 0,90 m circa come Zhang et al. [21], considerando che una persona media di 1,70 m di altezza seduta misura circa 1,30 m.

Quindi la configurazione che è stata testata con i questionari di valutazione del comfort prevedeva:

- Altezza ugelli: 2,20 m
- Interasse ugelli: 1,00 m
- Telo superiore schermatura sole: True
- Telo laterale di schermatura vento: False
- Controllore: Manuale

Sempre sulla base di quanto studiato, si è deciso di considerare come variabile il fattore tempo come Zhang et al. [21], chiedendo agli utenti di rispondere alle domande ogni 3 minuti, per una sosta totale di 9 minuti in ambiente naturale e 9 minuti in ambiente water mist.

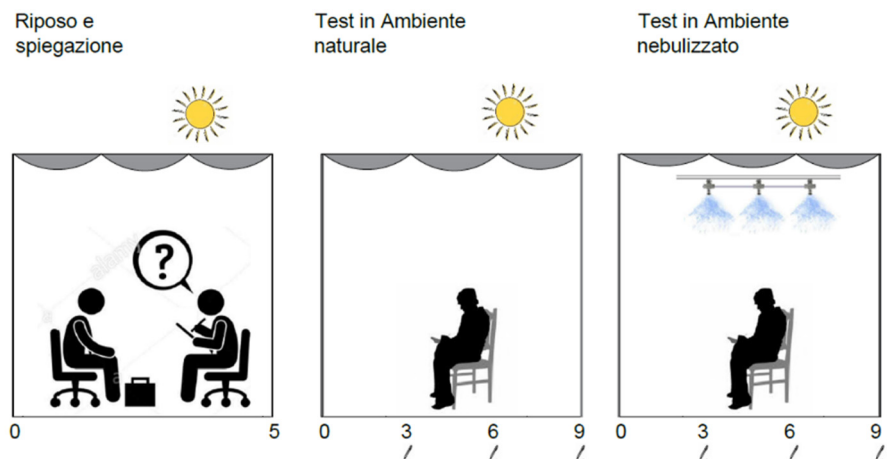


Fig. 58 – Schema semplificato dello svolgimento del test

Per mantenere il distanziamento, considerando che eravamo in un periodo di Pandemia Mondiale per COVID19, il test è stato svolto contemporaneamente da un massimo di 3 persone, anche perché non si poteva svolgere con la mascherina, in quanto avrebbe influenzato probabilmente la percezione del comfort.

Per il questionario vero e proprio si è preso spunto da questionari disponibili in letteratura che utilizzano principalmente la scala ASHRAE 55-1992 a più punti.

La prima parte era relativa alle informazioni personali, ed è stata stilata seguendo le indicazioni del questionario di Ulpiani et Al. [9] chiedendo informazioni riguardo: genere, stato di gravidanza, altezza, peso, età, stato di salute, attività svolta fino a mezz'ora prima del test, abbigliamento e tempo speso all'aria aperta.

## QUESTIONARIO

Data: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

Orario ingresso ambiente naturale: \_\_\_\_ : \_\_\_\_

Sesso: M / F

Incinta: SI / NO

Altezza: \_\_\_\_ metri

Peso: \_\_\_\_ kg

Età: \_\_\_\_ anni

Stato di salute: Soffri di malattie che possono alterare la temperatura corporea?

NO;  Febbre;  Disturbi del metabolismo;  Altro: \_\_\_\_\_

Attività: mezz'ora fa stavi:

Fermo (seduto);  Fermo (in piedi);  Camminando;  Correndo;  Giocando;  Altro: \_\_\_\_\_

Vestiaro: seleziona i capi che stai indossando (scelta multipla)

T- shirt (manica corta);  T- shirt (manica lunga);  Gonna o pantaloni lunghi;  Gonna o pantaloni corti;  Canottiera;  Giacca o giubbino;  Altro: \_\_\_\_\_

Quanto spesso passi del tempo all'aria aperta in questa stagione?

Raramente;  1 o 2 volte a settimana;  Una volta al giorno;  Due volte al giorno;

Altro: \_\_\_\_\_

*Fig. 59 – Prima parte del questionario*

Successivamente i soggetti hanno iniziato a testare i primi 9 minuti in ambiente naturale, a riguardo sono state formulate 4 domande: la prima tiene conto della sensazione termica percepita (TSV), la seconda della sensazione di sudore, la terza riguarda la sensazione di umidità e infine vi è una domanda sulla sensazione di comfort (CSV).

Il TSV e il CSV sono stati valutati con la scala 7 punti ASHRAE 55-1992 [38], che varia quindi da -3 a +3. La sensazione relativa al sudore è stata osservata con una scala a 4 punti: da -3 a 0; mentre per la sensazione di umidità, che anch'essa nell'articolo di Zhang at al. [21] era studiata con una scala a 4 punti, è stato aggiunto un punto che potesse esprimere l'effetto bagnato dovuto dalle particelle, qualora fosse stato percepito.

**AMBIENTE NATURALE**

**Dai un voto alla tua sensazione termica:**

|               |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|               | <b>-3</b>                | <b>-2</b>                | <b>-1</b>                | <b>0</b>                 | <b>+1</b>                | <b>+2</b>                | <b>+3</b>                |
|               | Freddo                   | Fresco                   | Leggermente fresco       | Neutro                   | Leggermente caldo        | Caldo                    | Molto Caldo              |
| - Dopo 3 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 6 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 9 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**Stai sudando in questo momento?**

|               |                          |                          |                          |                          |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|               | <b>-3</b>                | <b>-2</b>                | <b>-1</b>                | <b>0</b>                 |
|               | Molto                    | Abbastanza               | Leggermente              | No                       |
| - Dopo 3 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 6 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 9 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**Qual è la tua sensazione di umidità?**

|               |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|               | <b>-4</b>                | <b>-3</b>                | <b>-2</b>                | <b>-1</b>                | <b>0</b>                 |
|               | Effetto bagnato          | Molto Umido              | Umido                    | Leggermente Umido        | Non Umido                |
| - Dopo 3 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 6 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 9 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**Dai un voto alla tua sensazione globale di comfort:**

|               |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|               | <b>-3</b>                | <b>-2</b>                | <b>-1</b>                | <b>0</b>                 | <b>+1</b>                | <b>+2</b>                | <b>+3</b>                |
|               | Molto sgradevole         | Sgradevole               | Leggermente sgradevole   | Neutro                   | Leggermente confortevole | Confortevole             | Molto Confortevole       |
| - Dopo 3 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 6 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 9 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Fig. 60 – Seconda parte del questionario: ambiente naturale

Dopo i primi 9 minuti di test, gli utenti sono stati spostati nella zona spray dove hanno compilato lo stesso questionario, con l’aggiunta di una valutazione globale della soddisfazione del sistema (con scala a 5 punti, da “-2, non soddisfacente” a “+2, soddisfacente”).

**AMBIENTE CON SISTEMA SPRAY**

**Dai un voto alla tua sensazione termica:**

|               |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|               | <b>-3</b>                | <b>-2</b>                | <b>-1</b>                | <b>0</b>                 | <b>+1</b>                | <b>+2</b>                | <b>+3</b>                |
|               | Freddo                   | Fresco                   | Leggermente fresco       | Neutro                   | Leggermente caldo        | Caldo                    | Molto Caldo              |
| - Dopo 3 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 6 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 9 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**Stai sudando in questo momento?**

|               |                          |                          |                          |                          |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|               | <b>-3</b>                | <b>-2</b>                | <b>-1</b>                | <b>0</b>                 |
|               | Molto                    | Abbastanza               | Leggermente              | No                       |
| - Dopo 3 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 6 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 9 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**Qual è la tua sensazione di umidità?**

|               |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|               | <b>-4</b>                | <b>-3</b>                | <b>-2</b>                | <b>-1</b>                | <b>0</b>                 |
|               | Effetto bagnato          | Molto Umido              | Umido                    | Leggermente Umido        | Non Umido                |
| - Dopo 3 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 6 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 9 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**Dai un voto alla tua sensazione globale di comfort:**

|               |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|               | <b>-3</b>                | <b>-2</b>                | <b>-1</b>                | <b>0</b>                 | <b>+1</b>                | <b>+2</b>                | <b>+3</b>                |
|               | Molto sgradevole         | Sgradevole               | Leggermente sgradevole   | Neutro                   | Leggermente confortevole | Confortevole             | Molto Confortevole       |
| - Dopo 3 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 6 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 9 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 9 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**Ritieni nel complesso soddisfacente il sistema con spray?**

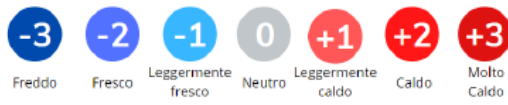
|               |                          |                           |                          |                          |                          |
|---------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|               | <b>-2</b>                | <b>-1</b>                 | <b>0</b>                 | <b>+1</b>                | <b>+2</b>                |
|               | Non soddisfacente        | Leggermente soddisfacente | Neutro                   | Abbastanza soddisfacente | Soddisfacente            |
| - Dopo 3 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 6 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| - Dopo 9 min: | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Fig. 61 – Terza parte questionario: ambiente spray

Infine, sono state inserite due domande puntuali sulle sensazioni termica e di percezione dell'umidità all'effettivo contatto tra particelle e pelle ed è stato lasciato uno spazio per un commento personale.



Qual è la tua sensazione termica quando le particelle di nebbia entrano in contatto con la tua pelle?



Qual è la tua sensazione di umidità quando le particelle di nebbia entrano in contatto con la tua pelle?



Esprimi un giudizio sull'esperienza vissuta:

---

---

---

---

---

---

---

Fig. 62 – Quarta parte questionario: domande puntuali e giudizio personale



Fig. 63 – Esempio di due utenti che svolgono il test in ambiente naturale



*Figg. 64 e 65 – Esempi di utenti che svolto in test in ambiente spray*

Una volta completata la sperimentazione, che è durata tre giorni (21, 22, 23 luglio) sono stati analizzati i voti, riportandoli in una tabella Excel.

Successivamente si è deciso di operare con tre tipi di analisi:

- I. Prima si sono analizzati tutti i voti complessivi dell'ambiente naturale e sono stati confrontati con tutti i voti della zona spray:
- II. Poi si è passati al confronto dei voti tenendo conto del tempo; quindi, i voti dei primi 3 minuti in ambiente naturale sono stati confrontati con i primi tre minuti dell'ambiente spray, e così via anche con 6 e 9 minuti. In questo modo è stato possibile vedere anche come cambiano le sensazioni degli utenti all'aumentare della permanenza in certe condizioni;
- III. Infine, sono stati distinti i voti degli uomini e delle donne, per vedere se le varie sensazioni sono percepite in maniera diversa da due gruppi distinti dello stesso campione.

L'analisi è stata svolta prima qualitativamente con dei “violin plots” restituiti grazie a MATLAB, poi statisticamente attraverso l'applicazione di due test statistici.

I violin plots sono dei grafici simili ai diagrammi a scatola e baffi, ma più dettagliati in quanto si allargano e si stringono in base a quanto sia stata votata una determinata condizione.

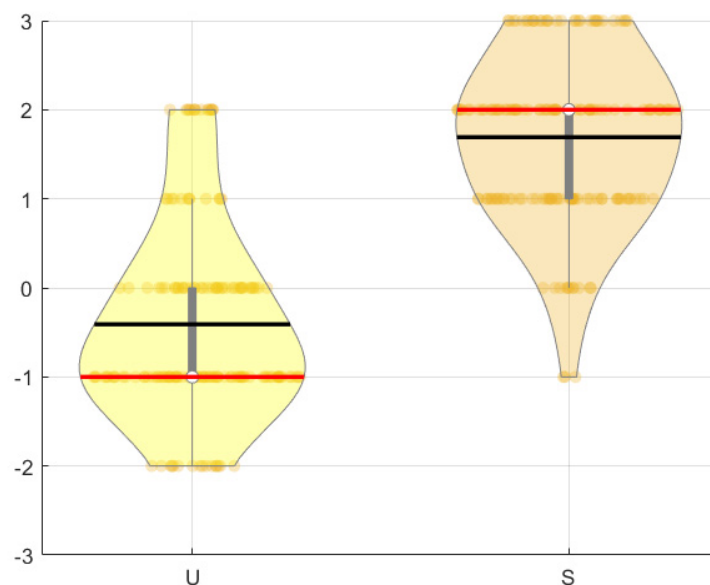


Fig. 66 – Esempio di un violin plot restituito da MATLAB

In questo caso la riga spessa verticale grigia è la “scatola”, le righe più sottili sono i baffi. Le linee orizzontali sono rappresentative della media (linea nera) e della mediana (linea rossa).

### 3.3.3 Test statistici

Come detto in precedenza, per confermare i risultati ottenuti qualitativamente dall'osservazione dei violin plots, sono stati utilizzati due test statistici: il *Wilcoxon signed-rank test* e il *Mann-Whitney U-test*.

I software utilizzati sono stati: fogli di calcolo Excel e MATLAB (R2021a).

I test statistici sono serviti per esaminare le distribuzioni di elementi e determinare la presenza di differenze significative tra essi. In particolare, sono stati condotti test non parametrici. Non è stato possibile applicare i tradizionali test parametrici (t-test, ANOVA, etc.) poiché i voti di comfort sono dati ordinali e non numeri, e come tali devono essere analizzati tramite previa trasformazione in ranghi o categorie. È stata impostato un livello di significatività ( $\alpha$ ) pari a 0,05 (5%) che indica il 5% di probabilità di rifiutare un'ipotesi nulla quando questa è vera.

#### 3.3.3.1 Wilcoxon Signed-Rank test

Il Wilcoxon signed-rank test è analogo al t-test per repeated-measure design, poiché lo stesso gruppo di soggetti ha partecipato a tutte le condizioni di prova (U\_3, U\_6, U\_9, S\_3, S\_6, S\_9). Il test valuta la differenza dei voti di sensazione termica prima e dopo il cambiamento dell'ambiente (da U a S) e prevede:

- H0 (ipotesi nulla)  $\mu_D=0$ : la variazione della condizione sperimentale non provoca cambiamenti nel comfort dei soggetti.
- H1 (ipotesi alternativa)  $\mu_D \neq 0$ : la variazione della condizione sperimentale provoca cambiamenti nel comfort dei soggetti.
- Non si assegnano ranghi a differenze nulle.

Le differenze tra i voti sono state trasformate in ranghi e separati in due gruppi: uno associato a differenze positive (incremento dei voti da U a S) e uno associato a differenze negative (decremento dei voti). Successivamente per ogni gruppo è stata calcolata la somma dei ranghi. La minore tra le somme dei ranghi è il T-value calcolato. In funzione della dimensione del campione (numero dei soggetti) e del livello di significatività è stato estratto dai valori tabellati il T-critico. Se:

- T-value > T-critico si accetta H0.

- T-value < T-critico si rifiuta H0 e si accetta H1.

Quando il campione è sufficientemente grande, il Wilcoxon test tende ad approssimare una distribuzione normale, in questo caso è possibile condurre il test usando la z-statistica.

$$z = \frac{X - \mu}{\sigma} = \frac{T - \frac{n(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}}$$

Per alpha uguale al 5%, z è sempre ±1,96. [36]. Se:

- z-value > z-critico si accetta H0.
- z-value < z-critico si rifiuta H0 e si accetta H1.

Poiché, la tabella di Wilcoxon non fornisce valori di T-critico per campioni maggiori di 50 soggetti, si deve obbligatoriamente usare l'approssimazione normale; mentre per campioni compresi tra 20 e 50 si può far riferimento a entrambi i criteri di valutazione, sia T che z, poiché forniranno risultati analoghi.

TABLE B.10 CRITICAL VALUES OF T FOR THE WILCOXON SIGNED-RANKS TEST\*

\*To be significant, the obtained *T* must be *equal to or less than* the critical value. Dashes (—) in the columns indicate that no decision is possible for the stated  $\alpha$  and *n*.

| <i>n</i> | Level of Significance for One-Tailed Test |      |     |      | <i>n</i> | Level of Significance for One-Tailed Test |      |     |      |
|----------|---|------|-----|------|----------|---|------|-----|------|
|          | .05                                       | .025 | .01 | .005 |          | .05                                       | .025 | .01 | .005 |
| <i>n</i> | Level of Significance for Two-Tailed Test |      |     |      | <i>n</i> | Level of Significance for Two-Tailed Test |      |     |      |
|          | .10                                       | .05  | .02 | .01  |          | .10                                       | .05  | .02 | .01  |
| 5        | 0   | —    | —   | —    | 30       | 151                                       | 137  | 120 | 109  |
| 6        | 2   | 0    | —   | —    | 31       | 163                                       | 147  | 130 | 118  |
| 7        | 3   | 2    | 0   | —    | 32       | 175                                       | 159  | 140 | 128  |
| 8        | 5   | 3    | 1   | 0    | 33       | 187                                       | 170  | 151 | 138  |
| 9        | 8   | 5    | 3   | 1    | 34       | 200                                       | 182  | 162 | 148  |
| 10       | 10  | 8    | 5   | 3    | 35       | 213                                       | 195  | 173 | 159  |
| 11       | 13  | 10   | 7   | 5    | 36       | 227                                       | 208  | 185 | 171  |
| 12       | 17  | 13   | 9   | 7    | 37       | 241                                       | 221  | 198 | 182  |
| 13       | 21  | 17   | 12  | 9    | 38       | 256                                       | 235  | 211 | 194  |
| 14       | 25  | 21   | 15  | 12   | 39       | 271                                       | 249  | 224 | 207  |
| 15       | 30  | 25   | 19  | 15   | 40       | 286                                       | 264  | 238 | 220  |
| 16       | 35  | 29   | 23  | 19   | 41       | 302                                       | 279  | 252 | 233  |
| 17       | 41  | 34   | 27  | 23   | 42       | 319                                       | 294  | 266 | 247  |
| 18       | 47  | 40   | 32  | 27   | 43       | 336                                       | 310  | 281 | 261  |
| 19       | 53  | 46   | 37  | 32   | 44       | 353                                       | 327  | 296 | 276  |
| 20       | 60  | 52   | 43  | 37   | 45       | 371                                       | 343  | 312 | 291  |
| 21       | 67  | 58   | 49  | 42   | 46       | 389                                       | 361  | 328 | 307  |
| 22       | 75  | 65   | 55  | 48   | 47       | 407                                       | 378  | 345 | 322  |
| 23       | 83  | 73   | 62  | 54   | 48       | 426                                       | 396  | 362 | 339  |
| 24       | 91  | 81   | 69  | 61   | 49       | 446                                       | 415  | 379 | 355  |
| 25       | 100                                       | 89   | 76  | 68   | 50       | 466                                       | 434  | 397 | 373  |
| 26       | 110                                       | 98   | 84  | 75   |          |   |      |     |      |
| 27       | 119                                       | 107  | 92  | 83   |          |   |      |     |      |
| 28       | 130                                       | 116  | 101 | 91   |          |   |      |     |      |
| 29       | 140                                       | 126  | 110 | 100  |          |   |      |     |      |

Fig. 67 – Tabella valori T-Critico [39]



### 3.3.3.2 Mann-Whitney U-test

Il Mann-Whitney U-test è progettato per analizzare i dati di due campioni separati e per valutare la differenza tra le due popolazioni. In particolare, nel nostro caso sono stati analizzati i voti espressi dagli uomini con quelli espressi dalle donne in ogni condizione: U\_3\_M vs U\_3\_F, U\_6\_M vs U\_6\_F, U\_9\_M vs U\_9\_F, S\_3\_M vs S\_3\_F, S\_6\_M vs S\_6\_F, S\_9\_M vs S\_9\_F. Ciò significa che per ogni quesito posto, e per tutti i tre spazi temporali proposti sono stati analizzati e confrontati i voti dei maschi con quelli delle femmine.

Le ipotesi del Mann-Whitney vengono affermate in termini di una differenza coerente e sistematica tra i due trattamenti messi a confronto.

- H0 (ipotesi nulla) = Non c'è differenza tra i due gruppi del campione.
- H1 (ipotesi alternativa) = C'è una differenza tra i due gruppi del campione.

Si calcolano i ranghi per ogni distribuzione (A e B) e poi il valore U del Mann-Whitney test.

$$U_A = n_A n_B + \frac{n_A(n_A + 1)}{2} - \Sigma R_A$$
$$U_B = n_A n_B + \frac{n_B(n_B + 1)}{2} - \Sigma R_B$$

La Mann-Whitney U è la minore tra le due ottenute e va confrontata con i valori tabellari per un test due code con  $\alpha=0.05$ . Se:

- U-value  $\leq$  U-critico si rifiuta l'ipotesi nulla, e dunque si accetta H1
- U-value  $>$  U-critico si accetta l'ipotesi nulla

Quando si ha a che fare con campioni superiori a 20, si fa l'approssimazione. In questo caso, le ipotesi di Mann-Whitney possono essere valutate utilizzando la z-statistica. Bisogna procedere trovando sempre prima i valori U di ciascun campione (A e B) e scegliendo il più piccolo come Mann-Whitney U. La z-statistica si calcola tenendo conto della media e della deviazione standard e sostituendo a X la U.

$$z = \frac{X - \mu}{\sigma} = \frac{U - \frac{n_A n_B}{2}}{\sqrt{\frac{n_A n_B (n_A + n_B + 1)}{12}}}$$

Per  $\alpha$  uguale al 5%, z-critico è sempre  $\pm 1,96$ . Se:

- Z-statistico  $>$  z-critico positivo o Z-statistico  $<$  z-critico negativo allora si accetta l'ipotesi alternativa secondo cui c'è differenza tra i due campioni
- Z-statistico  $<$  z-critico positivo o Z-statistico  $>$  z-critico negativo si accetta l'ipotesi nulla.

TABLE B.9A CRITICAL VALUES OF THE MANN-WHITNEY U FOR  $\alpha = .05^*$

\*Critical values are provided for a *one-tailed* test at  $\alpha = .05$  (lightface type) and for a *two-tailed* test at  $\alpha = .05$  (boldface type). To be significant for any given  $n_A$  and  $n_B$ , the obtained  $U$  must be *equal to or less than* the critical value in the table. Dashes (—) in the body of the table indicate that no decision is possible at the stated level of significance and values of  $n_A$  and  $n_B$ .

| $n_B \backslash n_A$ | 1 | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  |     |
|----------------------|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1                    | — | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —   | —   | —   | —   | —   | 0   | 0   |
| 2                    | — | — | —  | —  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  | 2  | 3   | 3   | 3   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 3                    | — | — | 0  | 0  | 1  | 2  | 2  | 3  | 3  | 4  | 5  | 5  | 6  | 7  | 7   | 8   | 9   | 9   | 10  | 11  | 11  |
| 4                    | — | — | 0  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 18  |
| 5                    | — | 0 | 1  | 2  | 4  | 5  | 6  | 8  | 9  | 11 | 12 | 13 | 15 | 16 | 18  | 19  | 20  | 22  | 23  | 25  | 25  |
| 6                    | — | 0 | 1  | 2  | 3  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 11 | 12 | 13 | 14 | 15  | 17  | 18  | 19  | 20  | 22  | 23  |
| 7                    | — | 0 | 2  | 3  | 5  | 7  | 8  | 10 | 12 | 14 | 16 | 17 | 19 | 21 | 23  | 25  | 26  | 28  | 30  | 32  | 32  |
| 8                    | — | 0 | 2  | 4  | 6  | 8  | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 24 | 26 | 28  | 30  | 33  | 35  | 37  | 39  | 39  |
| 9                    | — | 1 | 3  | 5  | 8  | 10 | 13 | 15 | 18 | 20 | 23 | 26 | 28 | 31 | 33  | 36  | 39  | 41  | 44  | 47  | 47  |
| 10                   | — | 1 | 3  | 6  | 9  | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 39  | 42  | 45  | 48  | 51  | 54  | 54  |
| 11                   | — | 1 | 4  | 7  | 11 | 14 | 17 | 20 | 24 | 27 | 31 | 34 | 37 | 41 | 44  | 48  | 51  | 55  | 58  | 62  | 62  |
| 12                   | — | 1 | 4  | 7  | 11 | 14 | 18 | 22 | 26 | 29 | 33 | 37 | 41 | 45 | 49  | 53  | 57  | 61  | 65  | 69  | 69  |
| 13                   | — | 1 | 4  | 8  | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 33 | 37 | 42 | 47 | 51 | 56  | 61  | 65  | 70  | 75  | 80  | 84  |
| 14                   | — | 2 | 7  | 11 | 16 | 21 | 26 | 31 | 36 | 41 | 46 | 51 | 56 | 61 | 66  | 71  | 77  | 82  | 87  | 92  | 92  |
| 15                   | — | 2 | 7  | 12 | 18 | 23 | 28 | 33 | 39 | 44 | 50 | 55 | 61 | 66 | 72  | 77  | 83  | 88  | 94  | 100 | 100 |
| 16                   | — | 2 | 7  | 12 | 18 | 24 | 29 | 34 | 39 | 44 | 49 | 54 | 59 | 64 | 70  | 75  | 80  | 85  | 90  | 98  | 98  |
| 17                   | — | 2 | 7  | 13 | 19 | 25 | 30 | 36 | 42 | 48 | 54 | 60 | 65 | 71 | 77  | 83  | 89  | 95  | 101 | 107 | 107 |
| 18                   | — | 2 | 7  | 13 | 19 | 25 | 31 | 37 | 43 | 49 | 55 | 61 | 67 | 73 | 79  | 85  | 91  | 97  | 103 | 109 | 115 |
| 19                   | 0 | 4 | 10 | 17 | 23 | 30 | 37 | 44 | 51 | 58 | 65 | 72 | 80 | 87 | 94  | 101 | 109 | 116 | 123 | 130 | 130 |
| 20                   | 0 | 4 | 11 | 18 | 25 | 32 | 39 | 47 | 54 | 62 | 69 | 77 | 84 | 92 | 100 | 107 | 115 | 123 | 130 | 138 | 138 |
|                      | — | 2 | 8  | 13 | 20 | 27 | 34 | 41 | 48 | 55 | 62 | 69 | 76 | 83 | 90  | 98  | 105 | 112 | 119 | 127 | 127 |

Fig. 68 – Tabella valori U-Critico [39]

## 4. Risultati

Nel seguente capitolo si procede con la lettura e l'analisi dei risultati ottenuti. Il capitolo si divide in cinque paragrafi, ognuno rispondente a un diverso quesito analizzato. Si è innanzitutto osservato il sistema e la sua efficienza, confrontando tra loro ciascun layout per vedere l'impatto delle variabili progettuali. Successivamente ci si è focalizzati sulla configurazione mantenuta durante i tre giorni di sperimentazione in cui gli utenti hanno compilato i questionari sul comfort. Prima di tutto si è guardato come il sistema fosse efficiente in quelle condizioni, poi si sono analizzati i questionari: prima in maniera globale, poi tenendo presente il tempo e osservando come variano i risultati al passare dei minuti e infine si è osservato come il campione ha influenzato i risultati; quindi, quanto le variabili personali, in particolare il genere, incidono sul comfort.

### 4.1 Impatto sul microclima locale in relazione alle variabili progettuali

Vengono presi in considerazione tutti i giorni utili della sperimentazione fatta. In particolare, si sono analizzati gli istanti temporali compresi tra le ore 9:00 e le ore 19:00, fascia oraria di effettivo funzionamento del sistema. Si ricorda che le configurazioni variano in base a:

- Altezza degli ugelli: essa può variare tra 2,20, 2,60 e 2,90 m;
- Interasse degli ugelli: 1,00 o 0,80 m;
- Telo laterale di schermatura del vento: *presenza* o *assenza*;
- Telo superiore di schermatura sole: *presenza* o *assenza*;
- Controllore: *temporizzato* o *manuale*.

Di ogni configurazione si osservano: differenza di temperatura  $\Delta T$  [ $^{\circ}C$ ] e differenza di umidità relativa  $\Delta RH$  [%] confrontandoli prima con la temperatura dell'aria esterna  $T_a$  [ $^{\circ}C$ ], poi con la radiazione solare media  $I_g$  [ $W/m^2$ ], infine, con la velocità del vento  $w_s$  [ $m/s$ ].



### 4.1.1 Sintesi sull'efficienza delle configurazioni

In questo paragrafo si propone una sintesi valutativa sull'efficienza, espressa in percentuale, di ogni configurazione.

| Nome configurazione | Giorni di validità                    | Altezza ugelli | Interasse ugelli | Telo superiore | Telo laterale | Controllore  |
|---------------------|---------------------------------------|----------------|------------------|----------------|---------------|--------------|
| Configurazione 1    | 06-07 luglio                          | 2,60 m         | 1,00 m           | false          | false         | temporizzato |
| Configurazione 2    | 08-09 luglio                          | 2,60 m         | 1,00 m           | false          | false         | manuale      |
| Configurazione 3    | 11-15 luglio                          | 2,60 m         | 1,00 m           | true           | false         | manuale      |
| Configurazione 4    | 21-23 luglio                          | 2,20 m         | 1,00 m           | true           | false         | manuale      |
| Configurazione 5    | 24-26 luglio                          | 2,20 m         | 1,00 m           | true           | true          | manuale      |
| Configurazione 6    | 28-29 luglio                          | 2,90 m         | 1,00 m           | true           | true          | manuale      |
| Configurazione 7    | 30 luglio; 01-05 agosto; 10-11 agosto | 2,60 m         | 0,80 m           | true           | false         | manuale      |

Tabella 12 – Sintesi delle varie configurazioni

Per poter confrontare ogni configurazione si è calcolata l'efficienza in percentuale in termini di temperatura con la seguente operazione:  $(T_{\text{zona spray}} - T_{\text{ambiente}}) / T_{\text{ambiente}} * 100$ .

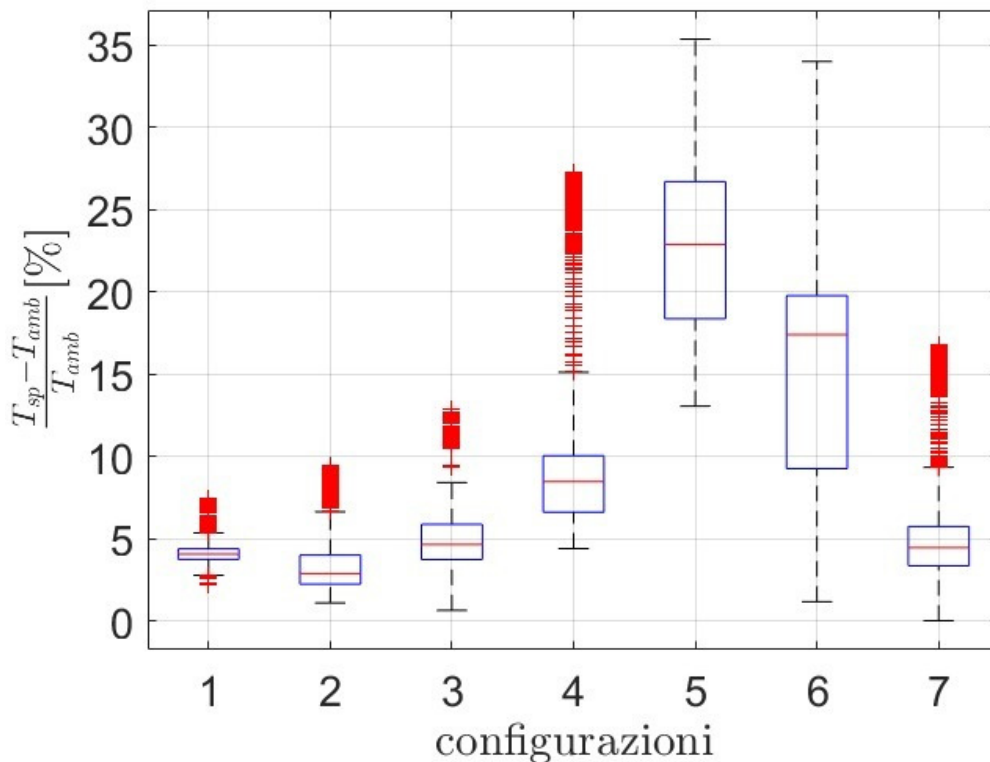


Fig. 69 – Rappresentazione sintetica tramite box plots dell'efficienza percentuale in termini di temperatura di ciascuna configurazione

Questo grafico tiene conto di tutti i dati con temperatura dell'aria ambiente compresa tra 28 e 32°C e velocità del vento inferiore a 3 m/s, sono stati imposti questi limiti perché secondo le trattazioni studiate il sistema risulta più efficiente in queste condizioni.

Osservando l'immagine prodotta da MATLAB, che tiene conto di ciascuna configurazione e le valuta secondo la variazione percentuale in termini di temperatura, si nota come la soluzione più soddisfacente per l'effetto di raffrescamento sia la *configurazione 5*, con un valore mediano (linea rossa) che arriva al 23%, seguita dalla *configurazione 6* con il 18%. Le *configurazioni 1, 2, 3 e 7* sono tutte al di sotto del 5% mentre la *4* è intorno al 9%. Notiamo che le *configurazioni 5 e 6* sono quelle con entrambi i teli di schermatura presenti, sia quello per i raggi solari che quello per il vento e si differenziano tra loro per la differente altezza degli ugelli, rispettivamente 2,20 m e 2,90 m; stiamo quindi leggendo un effetto combinato del sistema di raffrescamento e dell'ombreggiatura. La *configurazione 4* è quella che sarà poi adottata per la valutazione del comfort attraverso questionari. La dispersione dei dati è funzione del grande numero di dati considerati, che non è lo stesso per ciascuna configurazione, in quanto alcune sono state proposte per più giorni.

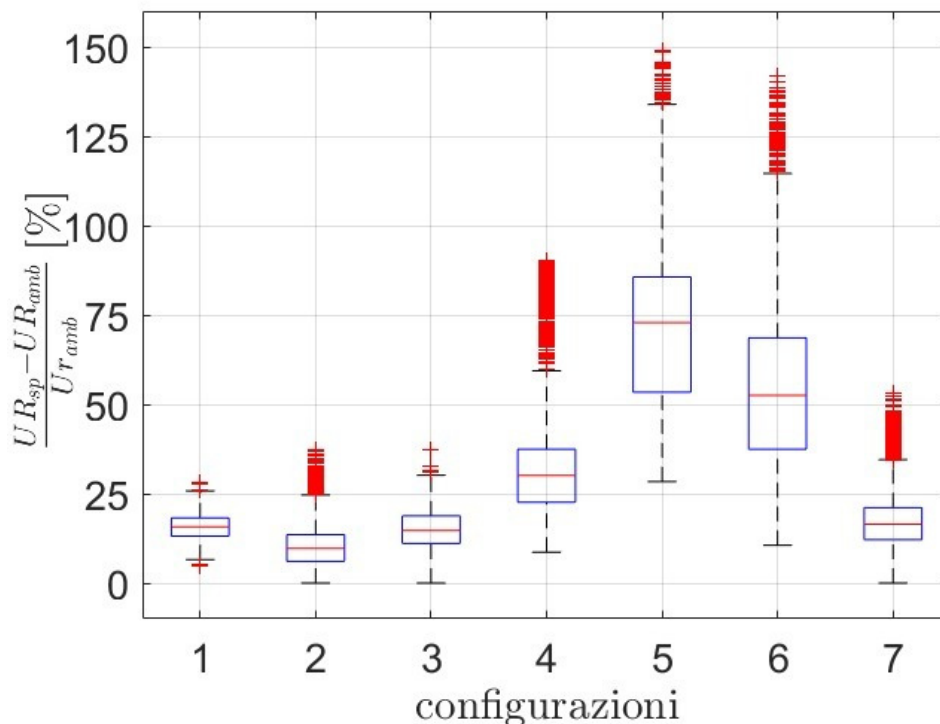


Fig. 70 – Rappresentazione sintetica tramite box plots dell'efficienza percentuale in termini di umidità relativa di ciascuna configurazione

In questa seconda immagine, la variazione percentuale è calcolata in termini di umidità relativa. Si nota come le *configurazioni 5 e 6* sono quelle in cui nel sistema spray viene prodotta più umidità. Si tratta sempre delle configurazioni con entrambi i teli presenti, che quindi vedono sì un notevole abbassamento della temperatura, come si vede dal grafico precedente, al quale però corrisponde una maggior produzione di umidità relativa.

#### 4.1.2 Configurazioni in cui varia il tipo di controllore

Si procede ora con il confronto di ciascuna configurazione con una similare, diversa solo per una variabile.

In queste prime configurazioni analizzate, si è tenuto conto delle stesse condizioni in termini di geometria degli ugelli e disposizione dei teli; ciò che cambia è il tipo di controllore.

Nella *configurazione 1* rappresentata a sinistra (periodo: 06-07 luglio 2021) si hanno:

- $H = 2,60\text{m}$
- $i = 1,00\text{m}$
- Telo superiore = false
- Telo laterale = false
- Controllore = *temporizzato*

Nella *configurazione 2* rappresentata a destra (periodo: 08-09 luglio 2021) si hanno:

- $H = 2,60\text{m}$
- $i = 1,00\text{m}$
- Telo superiore = false
- Telo laterale = false
- Controllore = *manuale*

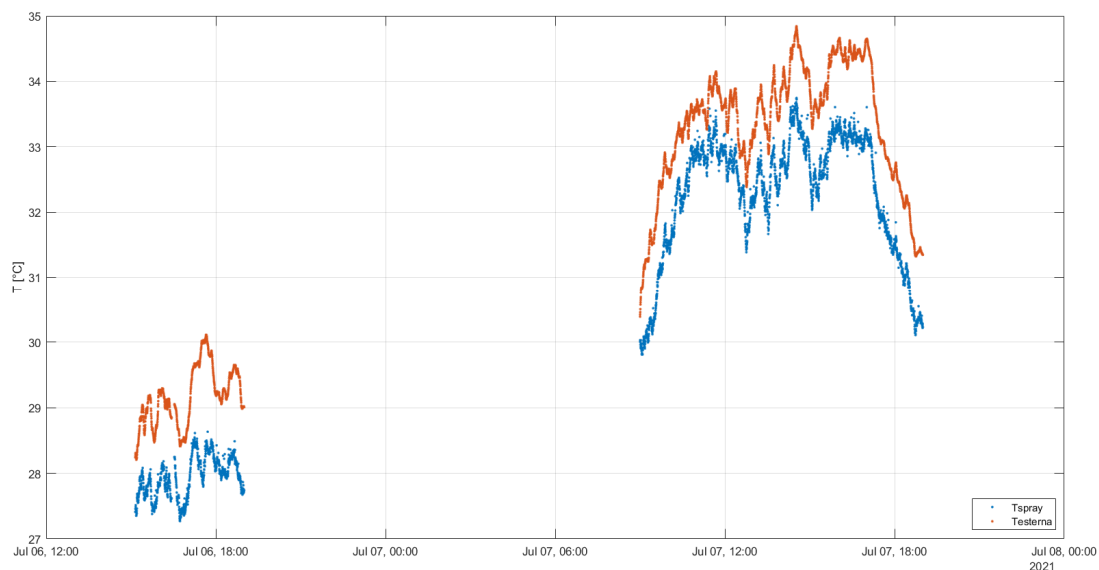


Fig. 71 – Rappresentazione andamento temperatura esterna e temperatura area spray (*configurazione 1*).

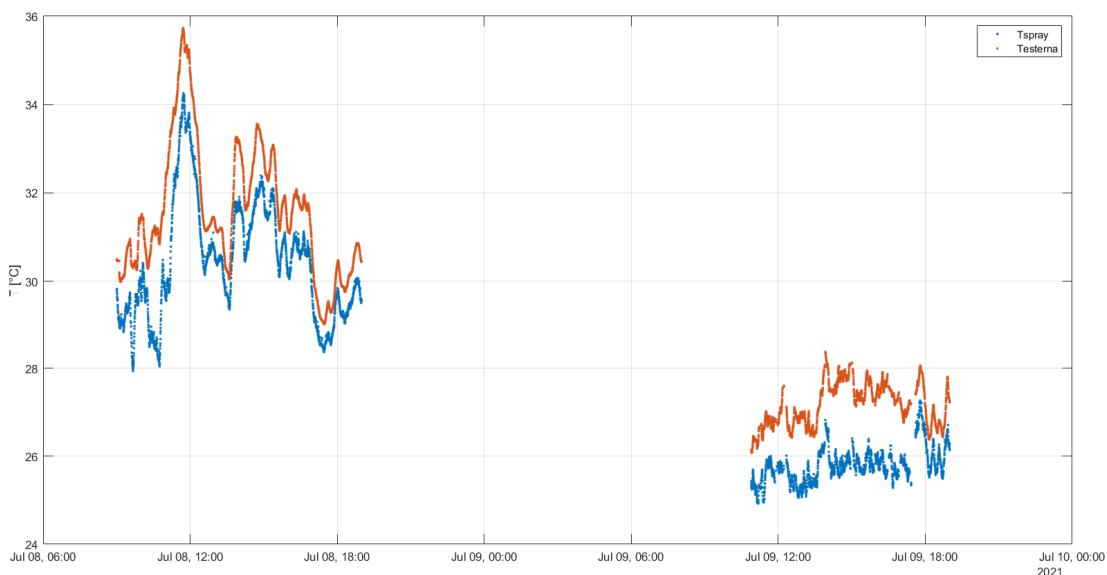


Fig. 72 – Rappresentazione andamento temperatura esterna e temperatura area spray (*configurazione 2*).

In questi grafici è possibile osservare l'andamento della Temperatura nei giorni 06-07 luglio (relativi alla *configurazione 1*) e 08-09 luglio (*configurazione 2*). L'insieme dei punti di colore arancione rappresenta la Temperatura dell'ambiente esterno, misurata dalla centralina meteo; mentre i punti azzurri sono la media della Temperatura misurata all'interno del sistema water mist dai quattro sensori di temperatura e umidità. Si nota, a partire da questi grafici, come le giornate del 07-08 luglio siano state più calde delle altre due e inoltre vediamo come all'interno del sistema spray la temperatura sia sempre inferiore rispetto all'ambiente naturale.

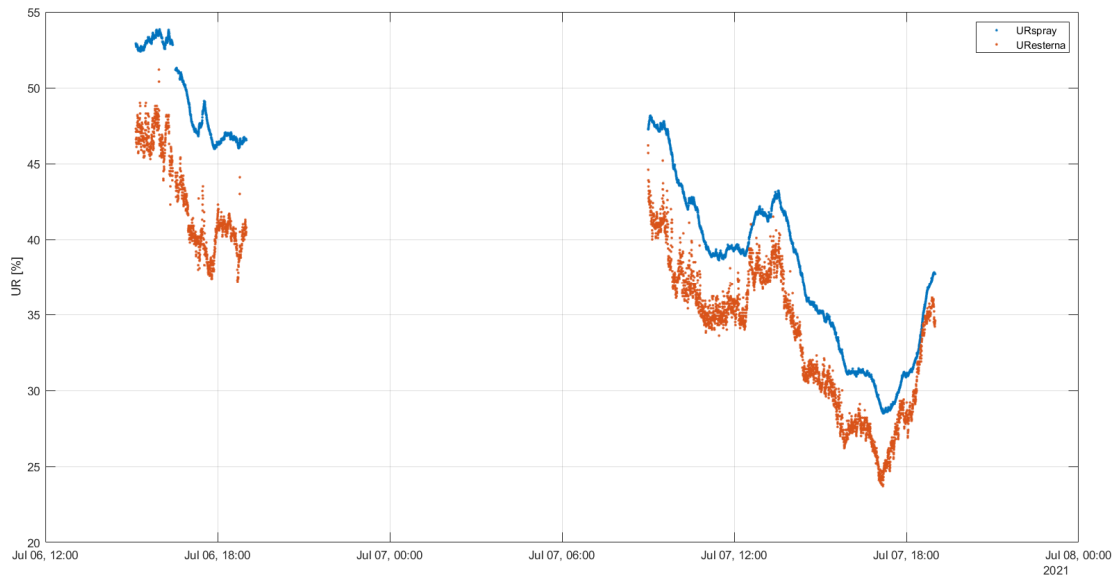


Fig. 73 - Rappresentazione andamento umidità relativa esterna e umidità relativa area spray (configurazione 1).

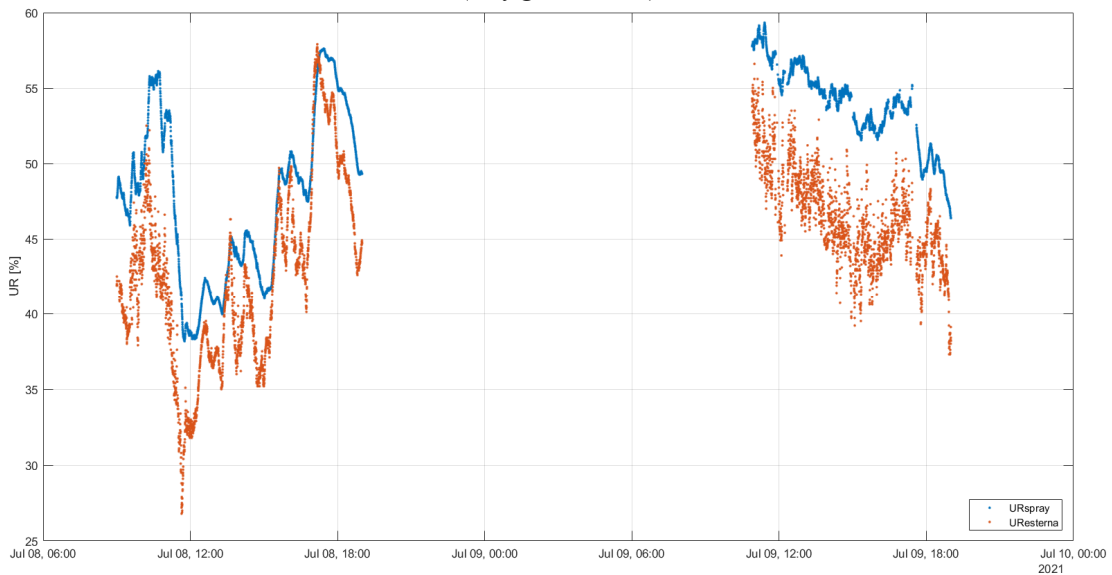


Fig.74 – Rappresentazione andamento umidità relativa esterna e umidità relativa area spray (configurazione 2).

È ora mostrato l'andamento dell'Umidità relativa nei giorni corrispondenti alle *configurazioni 1 e 2*, rispettivamente 06-07 e 08-09 luglio. Il giorno più umido risulta essere il 09 luglio, mentre nell'insieme è visibile come l'umidità relativa cresca sotto il sistema spray (puntini azzurri), rispetto all'ambiente naturale (punti arancioni). Questo è conforme a quanto atteso, le particelle d'acqua del sistema water mist aumentano l'umidità relativa dell'ambiente.

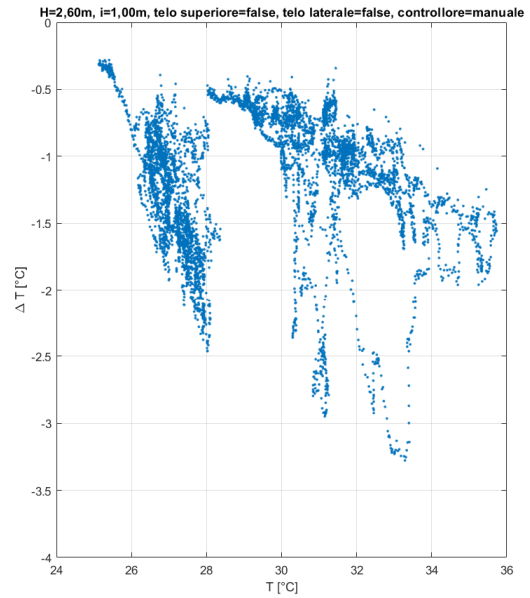
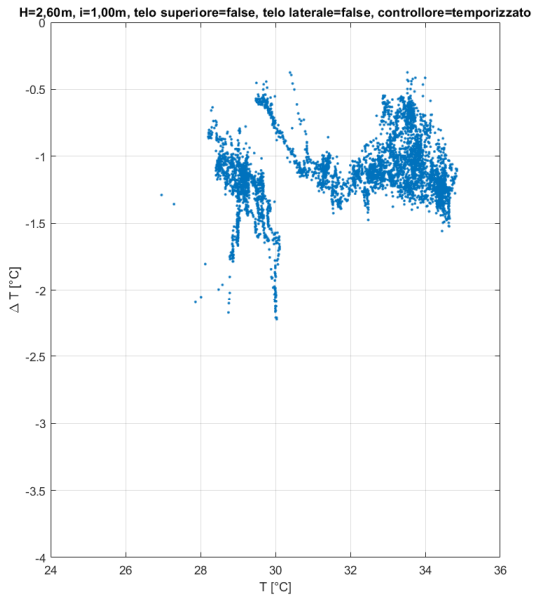


Fig. 75 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 1 vs Conf. 2)

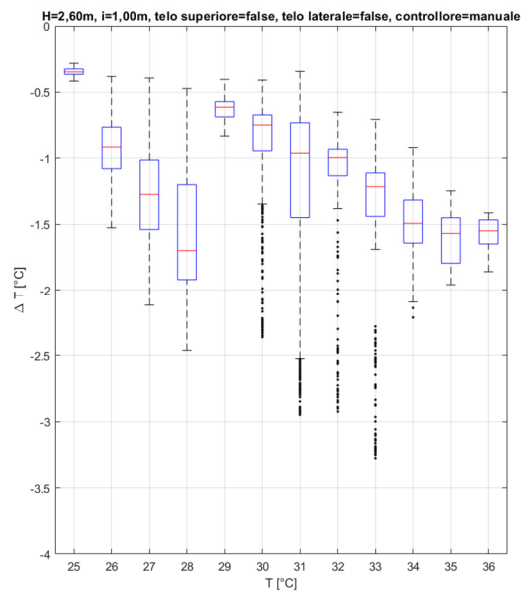
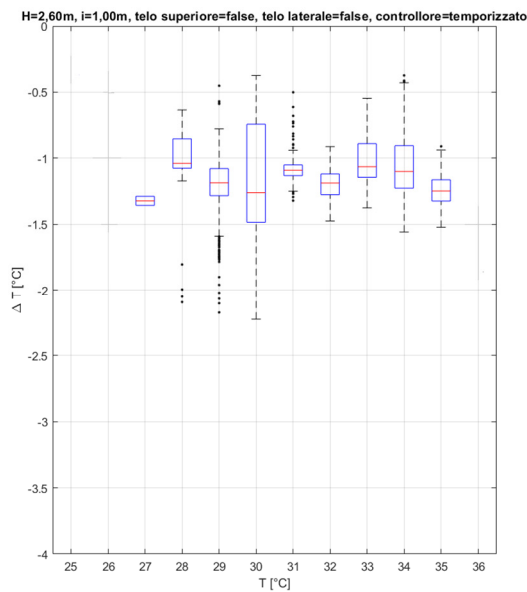


Fig. 76 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 1 vs Conf. 2)

In queste prime due rappresentazioni, viene osservato come varia il  $\Delta T$  in funzione della Temperatura dell'aria esterna  $T_a$ . Sono visibili dei cluster legati ai differenti giorni di misura; infatti, entrambe le configurazioni sono state mantenute per due giorni, dei quali uno con temperature maggiori dell'altro, in particolare nei giorni 07 e 08 luglio è stato più caldo, come mostrano le figg. 71 e 72.

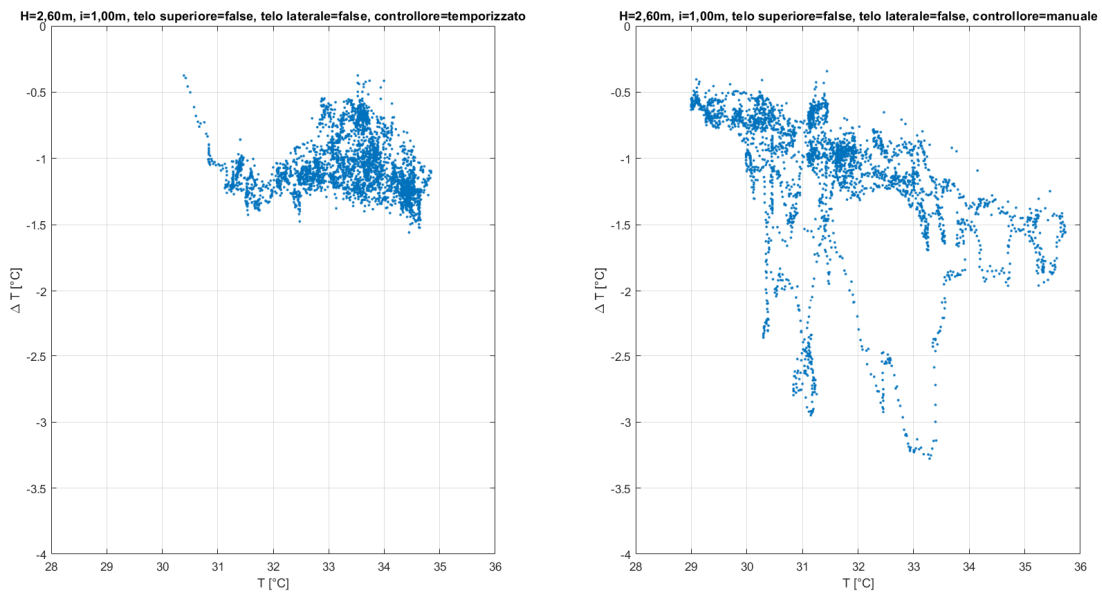


Fig. 77 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 1 vs Conf. 2 giorni caldi)

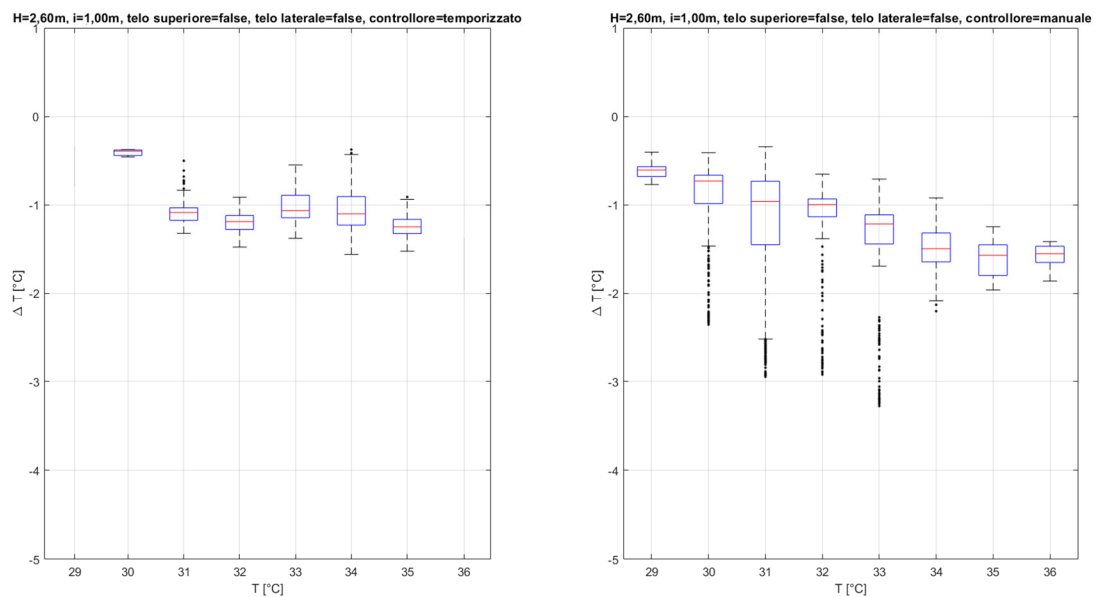


Fig. 78 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 1 vs Conf. 2 giorni caldi)

Tenendo conto che il sistema water mist è un sistema di mitigazione dell'isola di calore urbano, si è deciso di eliminare i cluster dovuti a giornate con temperature inferiori, ottenendo così nuvole di punti e box plot senza eccessive anomalie. In particolare, in queste due immagini, si tiene conto solo delle due giornate calde di ciascuna configurazione. È visibile come la temperatura all'interno dell'ambiente spray diminuisca al crescere della temperatura esterna e come con il controllore manuale si raggiungano temperature più fresche.

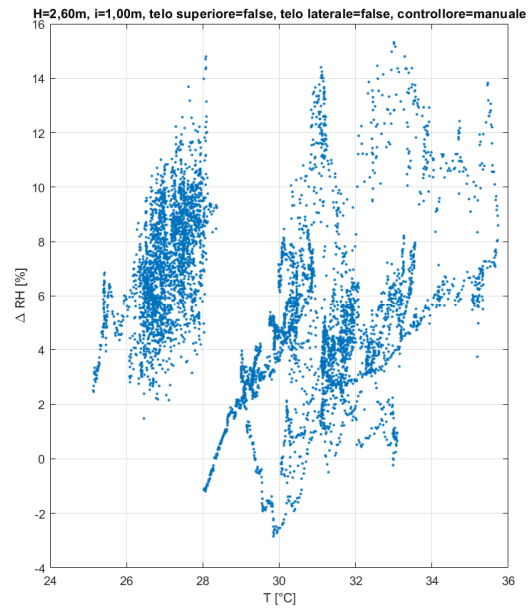
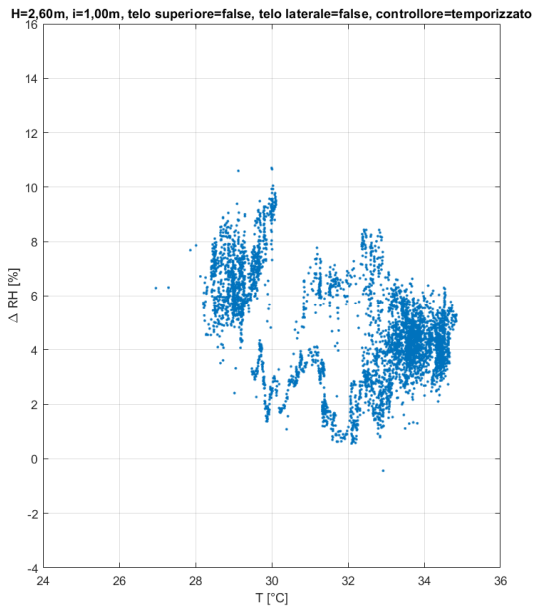


Fig. 79 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 1 vs Conf.2)

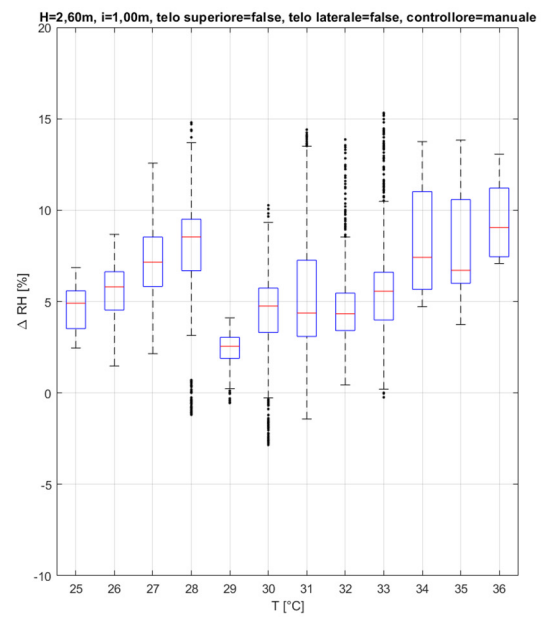
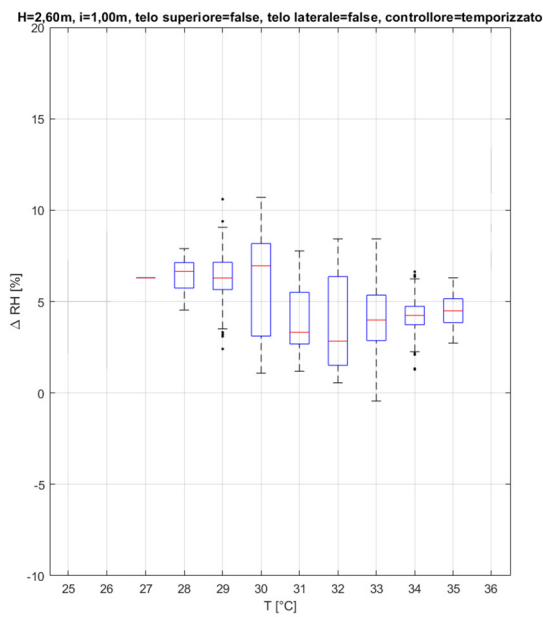


Fig. 80 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 1 vs Conf.2)

Anche guardando il  $\Delta RH$  si nota subito la presenza di cluster dovuti al fatto che nei due giorni di configurazione le temperature non sono state costanti. Per questo risulta necessario eliminare la giornata più fresca di ciascuna configurazione per ottenere un solo cluster.



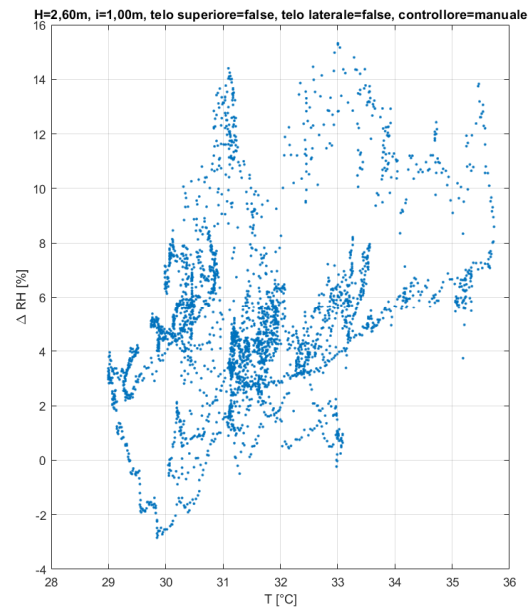
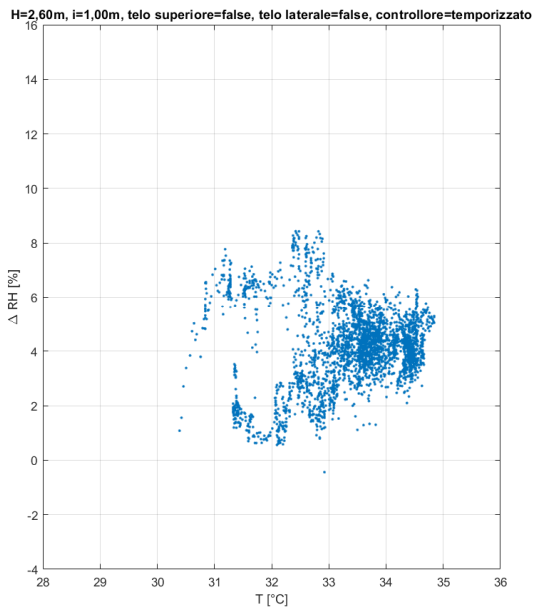


Fig. 81 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 1 vs Conf.2 giorni caldi)

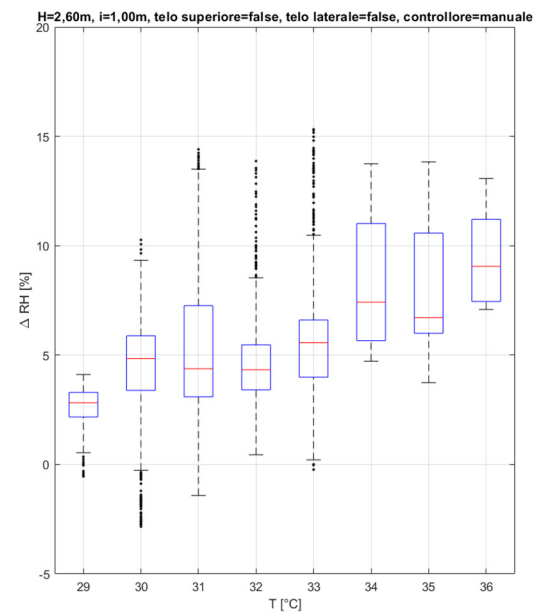
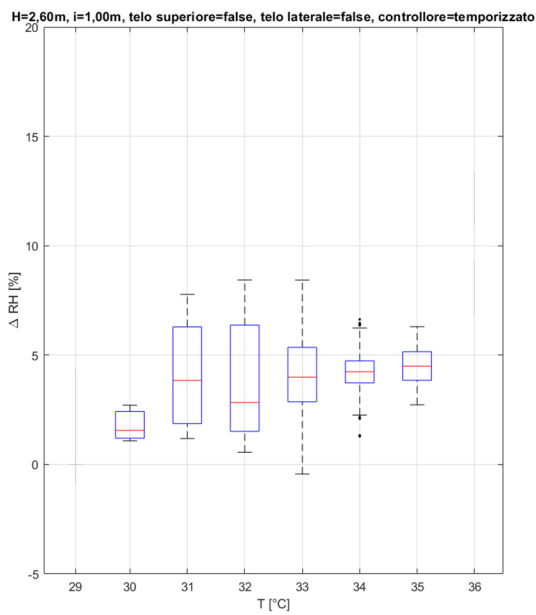


Fig. 82 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 1 vs Conf.2 giorni caldi)

Sono stati eliminati i dati relativi al giorno più fresco per ciascuna configurazione, così da rendere maggiormente chiaro e visibile il trend crescente del  $\Delta RH$ , che cresce all'aumentare della Temperatura esterna. La configurazione con il controllore manuale vede un maggiore aumento dell'umidità, con dei picchi che arrivano al 15%, mentre a sinistra non si supera mai il 10%.

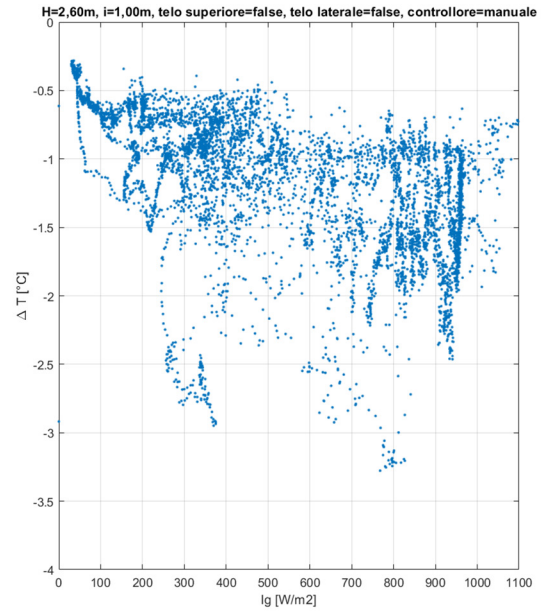
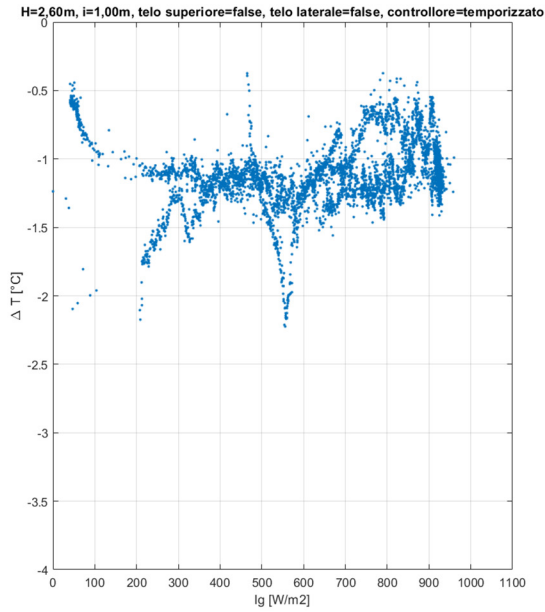


Fig. 83 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $I_g$  [W/m<sup>2</sup>] (Conf. 1 vs Conf. 2)

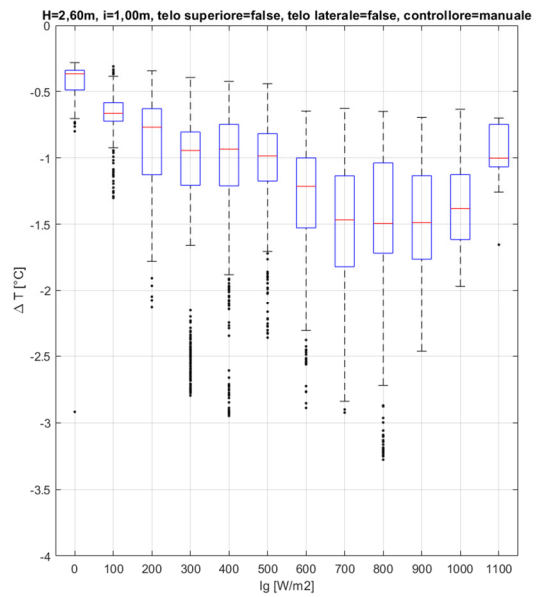
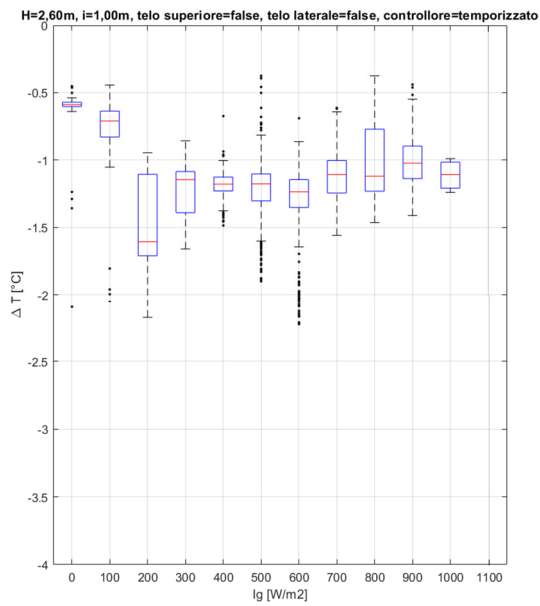


Fig. 84 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $I_g$  [W/m<sup>2</sup>] (Conf. 1 vs Conf. 2)

La seconda variabile climatica con la quale è relazionata la variazione di temperatura  $\Delta T$  è la radiazione solare media. Anche in questo caso bisogna tener presente della presenza di giornate in cui la temperatura non ha superato i 29-30°C, valori a cui si associa preferibilmente l'isola di calore urbano.

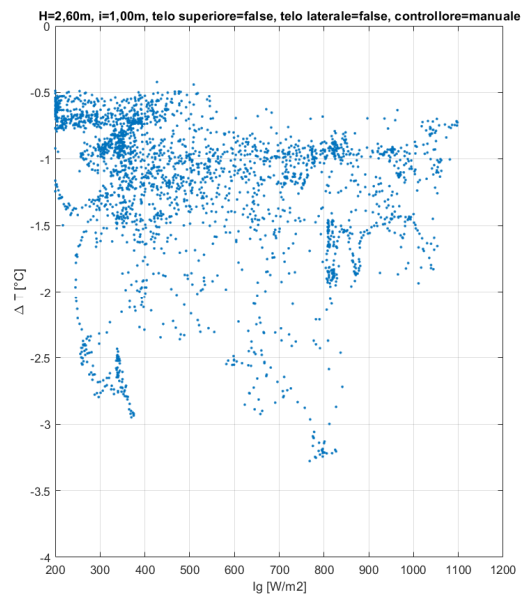
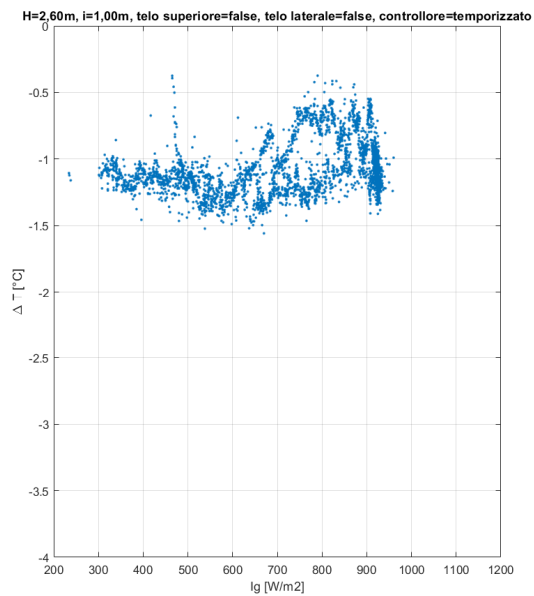


Fig. 85 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [ $^{\circ}C$ ] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 1 vs Conf. 2 giorni caldi)

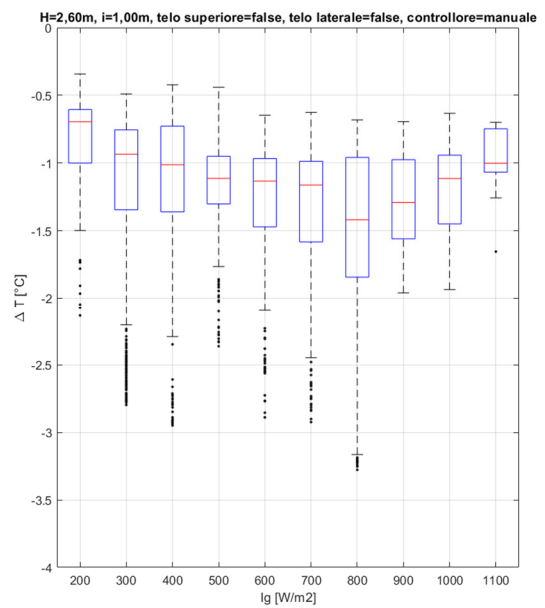
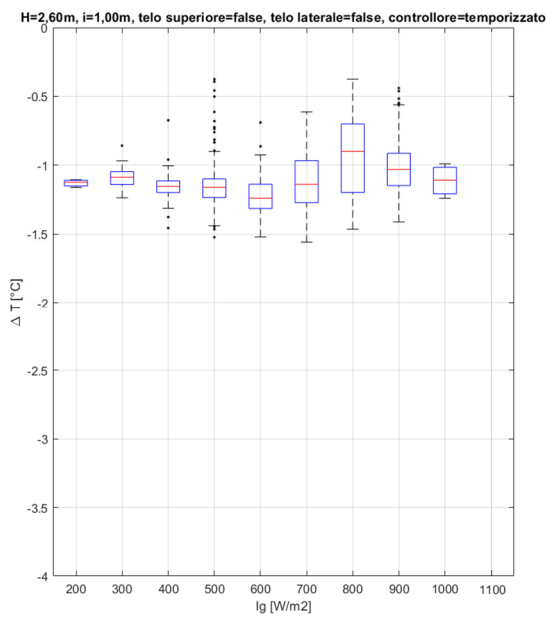


Fig. 86 – Box plots di  $\Delta T$  [ $^{\circ}C$ ] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 1 vs Conf. 2 giorni caldi)

Considerando solo le giornate più calde, non si riscontrano valori di radiazione media solare inferiori a  $200 W/m^2$ . Nella condizione con controllore temporizzato il  $\Delta T$  oscilla indicativamente tra  $-0,5^{\circ}C$  e  $-1,5^{\circ}C$ , mentre la configurazione con controllore manuale vede maggiori abbassamenti di temperatura sotto la zona spray, con outliers oltre i  $-3^{\circ}C$ .

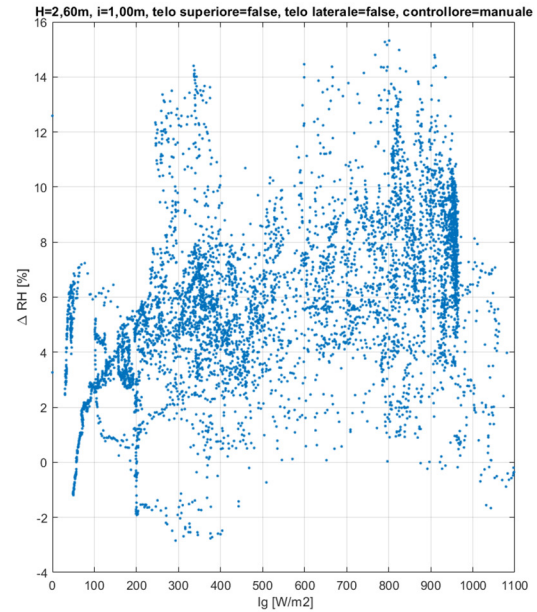
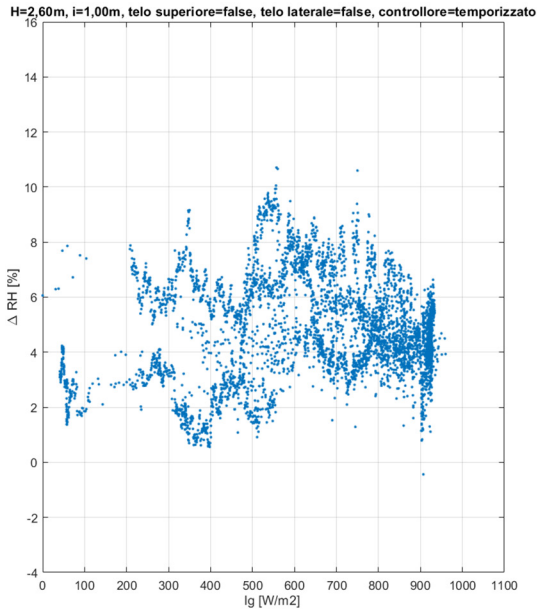


Fig. 87 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 1 vs Conf. 2)

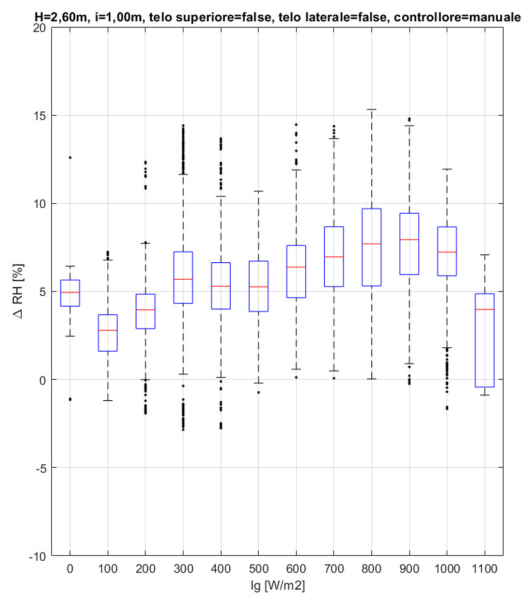
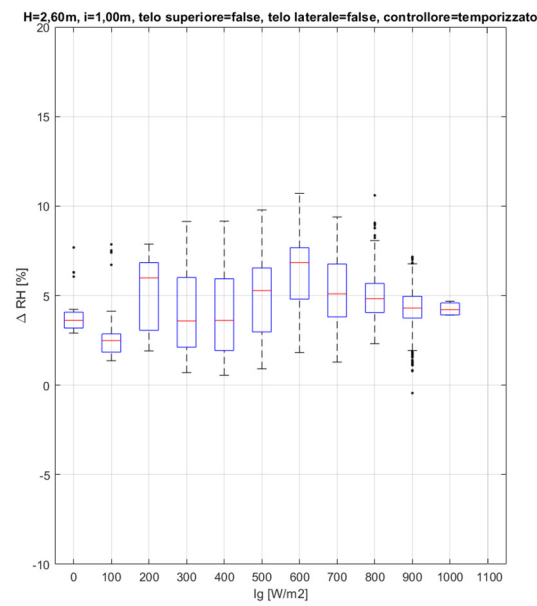


Fig. 88 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 1 vs Conf. 2)

Anche per quanto riguarda il  $\Delta RH$ , nella condizione temporizzata i valori variano per lo più tra 0 e +10%, mentre il grafico relativo al controllore manuale mostra come l'umidità cresca ulteriormente, con maggiore dispersione dei dati.

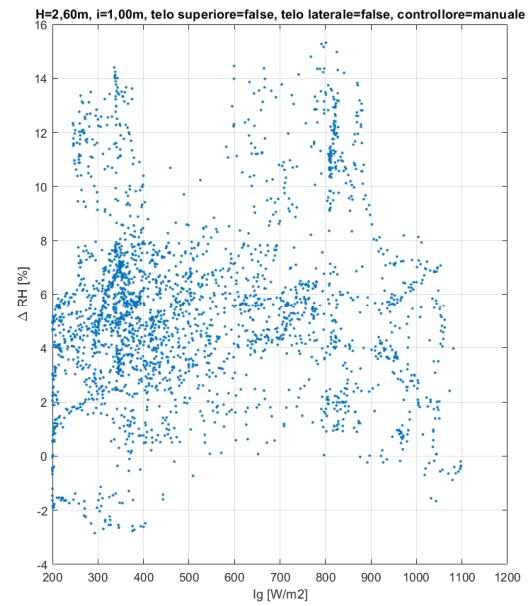
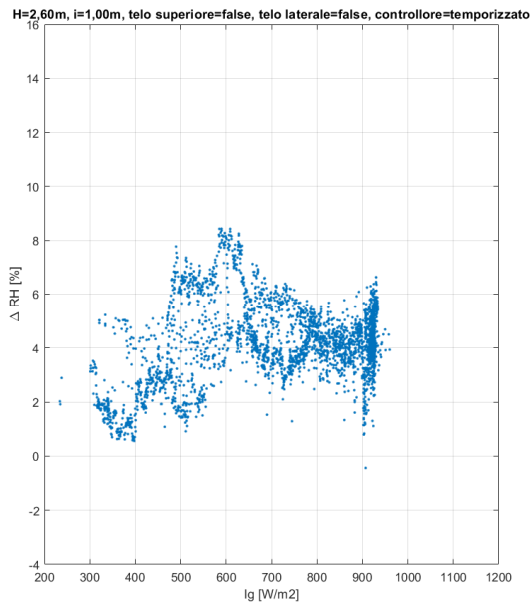


Fig. 89 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH [%]$  in funzione di  $I_g [W/m^2]$  (Conf. 1 vs Conf. 2 giorni caldi)

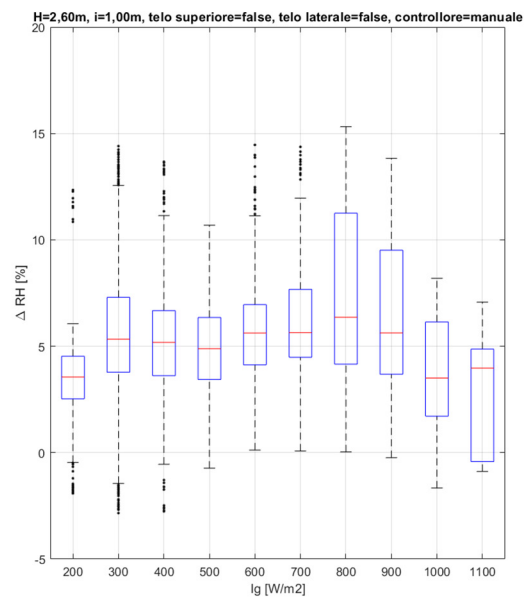
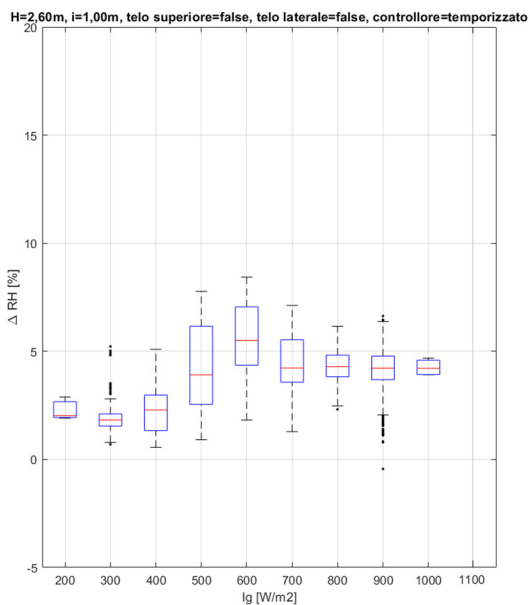


Fig. 90 – Box plots di  $\Delta RH [%]$  in funzione di  $I_g [W/m^2]$  (Conf. 1 vs Conf. 2 giorni caldi)

Nei grafici a dispersione notiamo come nella *configurazione 1* i dati siano tutti concentrati formando una nuvola di punti più compatta, rispetto alla *configurazione 2* dove notiamo maggiore dispersione dei dati. Anche le “scatole” dei box plots a destra sono più grandi, ad indicare una più ampia distribuzione dei dati, mentre a sinistra sono più piccole in quanto i dati sono tutti concentrati tra +1% e +9%.

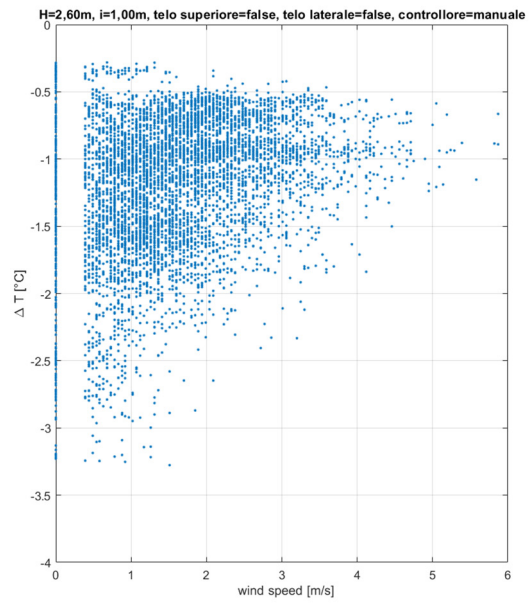
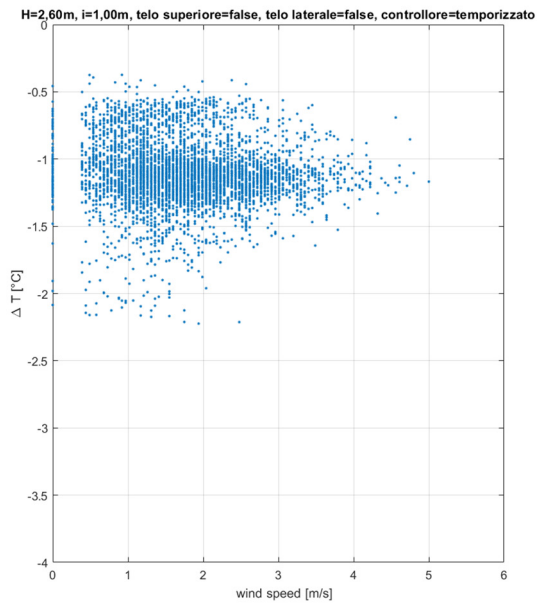


Fig. 91 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 1 vs Conf. 2)

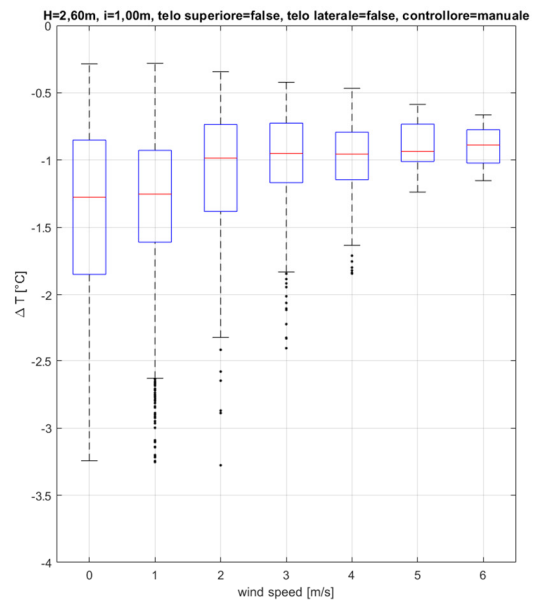
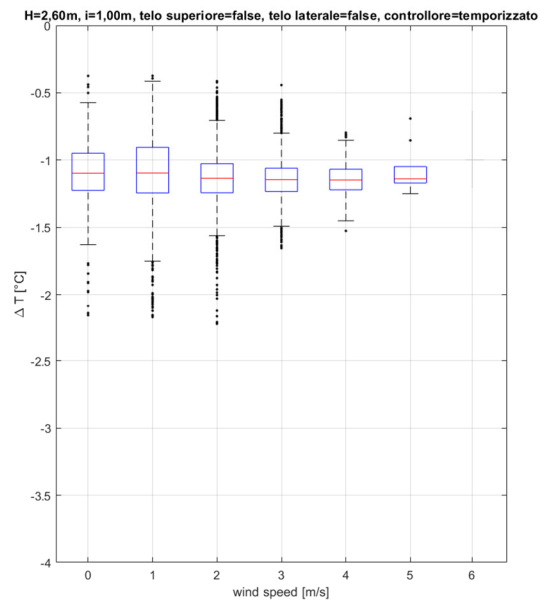


Fig. 92 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 1 vs Conf. 2)

I grafici mostrano un risultato atteso, ovvero come a basse velocità del vento ci siano maggiori delta, mentre ad alte velocità c'è più dispersione di dati. Nella *configurazione 2* si raggiungono  $\Delta T$  di oltre  $-3^{\circ}\text{C}$ , mentre con la configurazione si superano soltanto i  $-2^{\circ}\text{C}$  (con outliers).

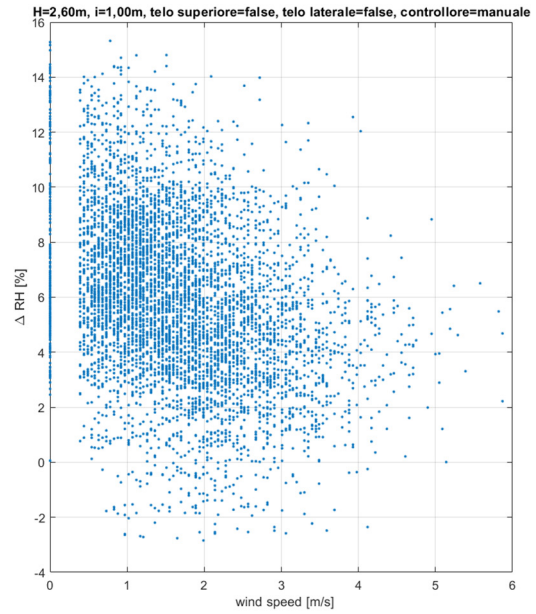
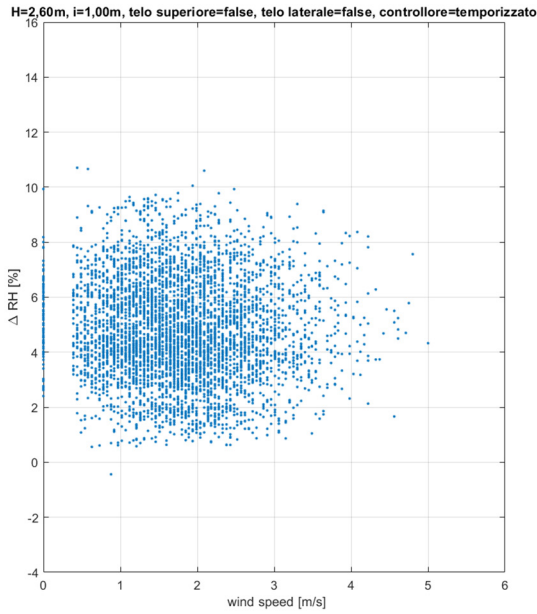


Fig. 93 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 1 vs Conf. 2)

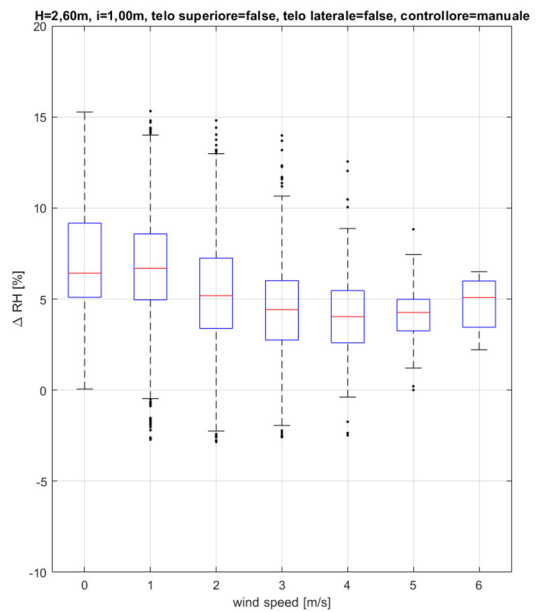
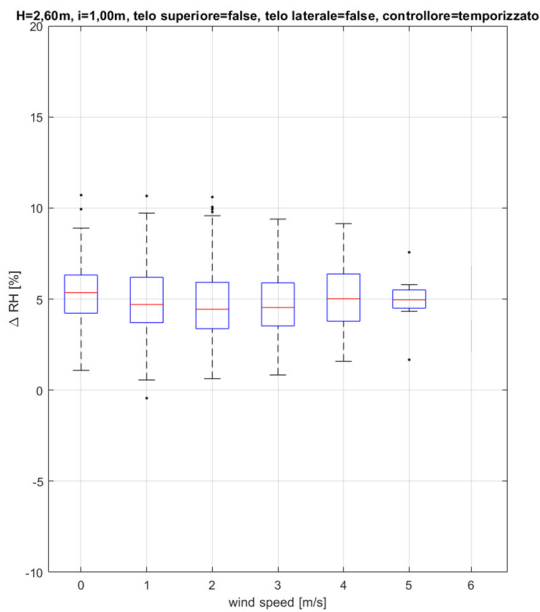


Fig. 94 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 1 vs Conf. 2)

Osservando la variazione di umidità, anche in questo caso i risultati sono conformi a quanto atteso, un maggior incremento di umidità è previsto per bassi valori di  $ws$ . Nella *configurazione 1* il vento sembra non avere troppa influenza sull'incremento di umidità relativa nella zona spray. Nella condizione in cui il controllore è manuale con velocità comprese tra 0 e 2 m/s si hanno degli aumenti del 15% di umidità, con 5m/s il massimo  $\Delta RH$  registrato non arriva nemmeno al 10%.

### 4.1.3 Configurazioni in cui varia l'altezza degli ugelli

#### 4.1.3.1 Variazione altezza ugelli da 2,60 m a 2,20 m

Si osservano ora due configurazioni con stesse caratteristiche ma differente altezza degli ugelli. In questo caso abbiamo solo un telo schermante, quello superiore per la radiazione solare. Il controllore è di tipo manuale e di conseguenza il sistema è attivo dalle ore 9:00 alle ore 19:00.

In particolare, a sinistra si trova la *configurazione 3* attiva nel periodo 11-15 luglio 2021 che prevede:

- $H = 2,60m$ ;
- $i = 1,00m$
- Telo superiore = true
- Telo laterale = false
- Controllore = manuale

A destra la *configurazione 4* valida dal 21 al 23 luglio 2021 con:

- $H = 2,20m$ ;
- $i = 1,00m$
- Telo superiore = true
- Telo laterale = false
- Controllore = manuale



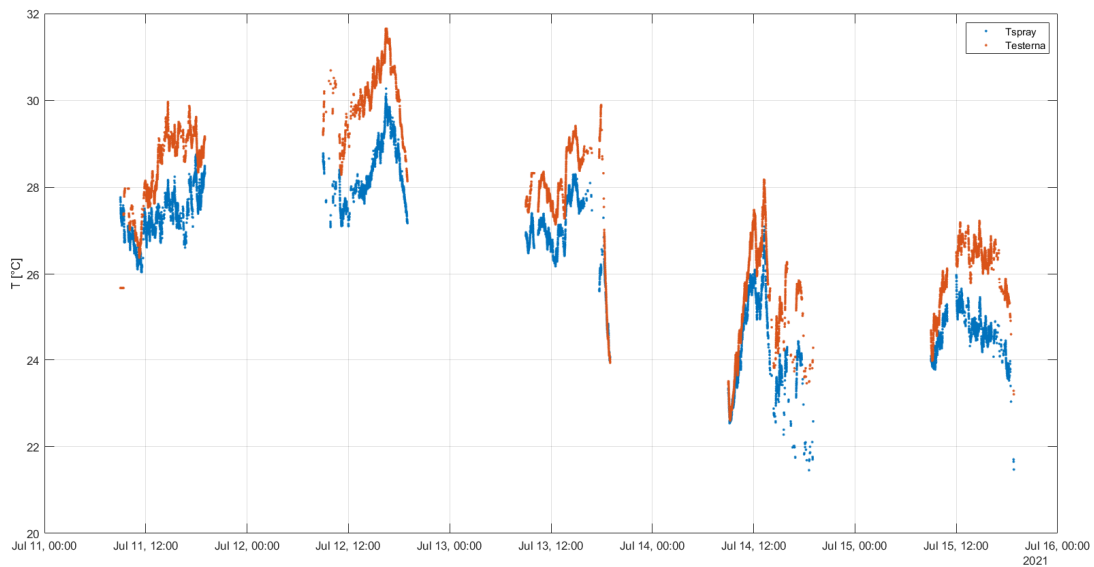


Fig. 95 – Rappresentazione andamento temperatura esterna e temperatura sistema spray (configurazione 3)

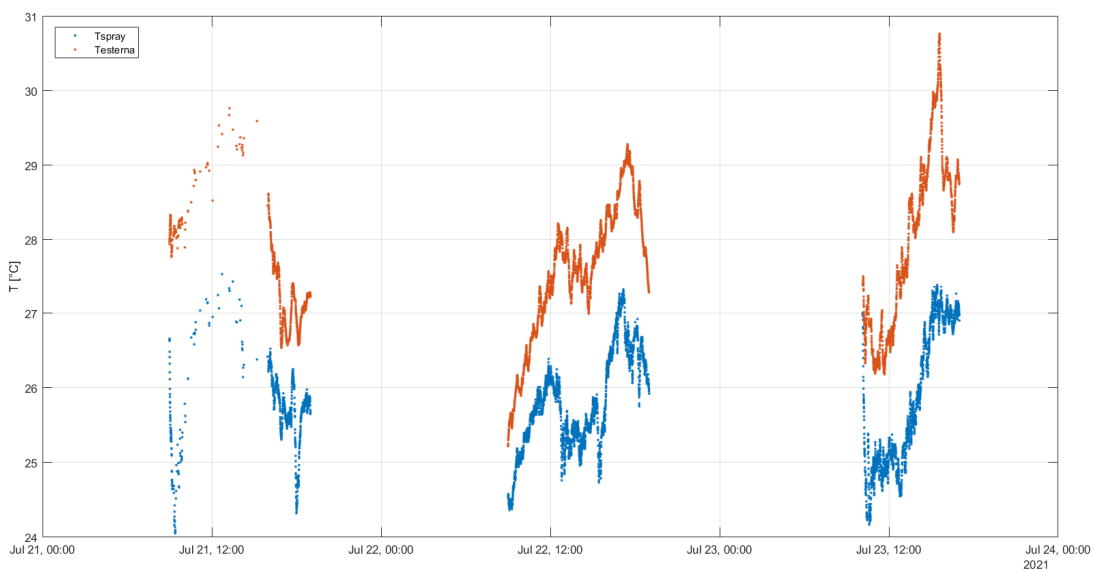


Fig. 96 – Rappresentazione andamento temperatura esterna e temperatura sistema spray (configurazione 4)

La prima differenza che si nota a partire da queste due immagini è che la *configurazione 3* è stata adottata per cinque giornate, mentre la *configurazione 4* si prolunga per soli tre giorni. I dati non mostrano cluster, perché le giornate si mantengono indicativamente sugli stessi range di temperatura. In tutti i casi si verifica l'effetto di raffreddamento e la temperatura media sotto lo spray è sempre inferiore alla temperatura dell'aria esterna. Le temperature della *configurazione 3* variano tra 23 e 32°C, mentre quelle della *configurazione 4* sono comprese tra 25 e 31°C.

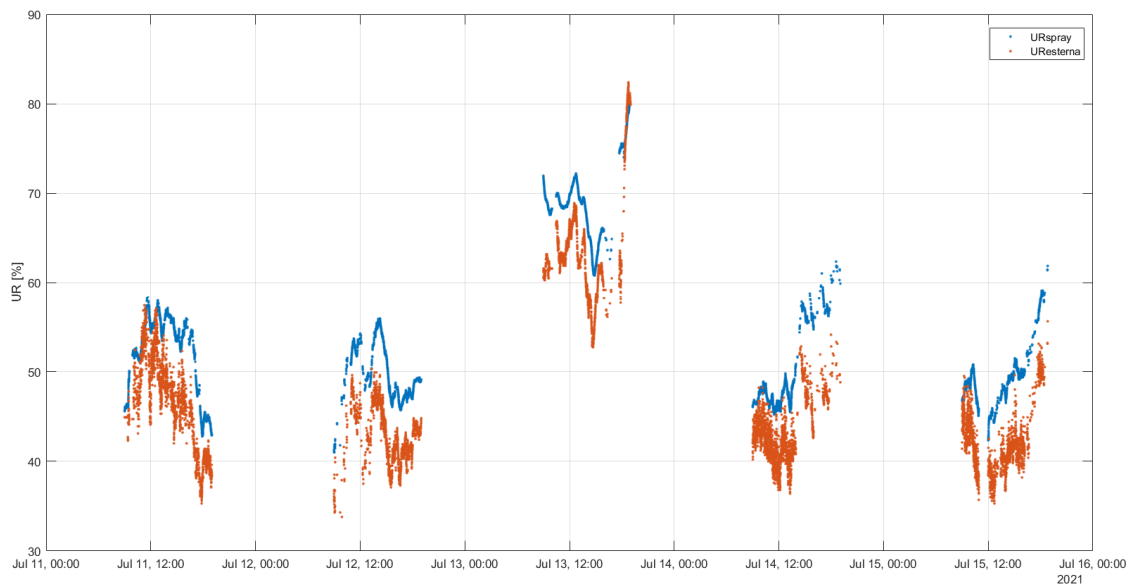


Fig. 97 – Rappresentazione andamento umidità relativa esterna e umidità relativa sistema spray (configurazione 3)

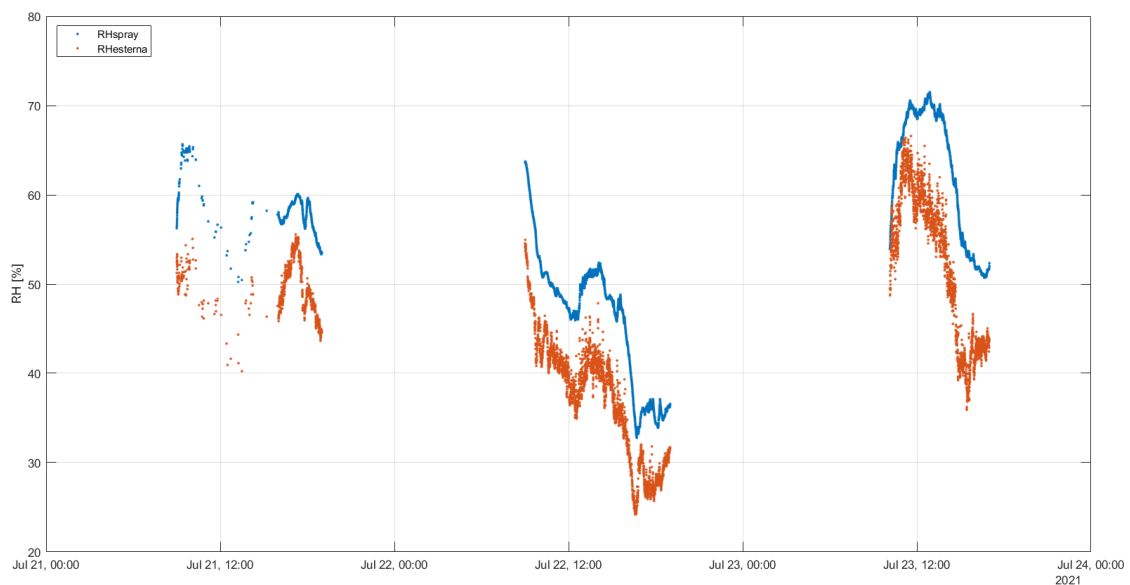


Fig. 98 – Rappresentazione andamento umidità relativa esterna e umidità relativa sistema spray (configurazione 4)

È possibile notare da questi grafici come nella *configurazione 3*, un giorno (13 luglio) risulti essere più umido degli altri che presentano indicativamente un massimo di 58% di umidità relativa, con andamenti compresi tra 35 e appunto 58%. L'immagine riguardante la *configurazione 4* mostra che l'umidità relativa in quei tre giorni varia tra il 25% (del 22 luglio) e circa il 66% (del 23 luglio). Viene confermato che in tutti i casi vi è un aumento di umidità relativa nella zona spray.

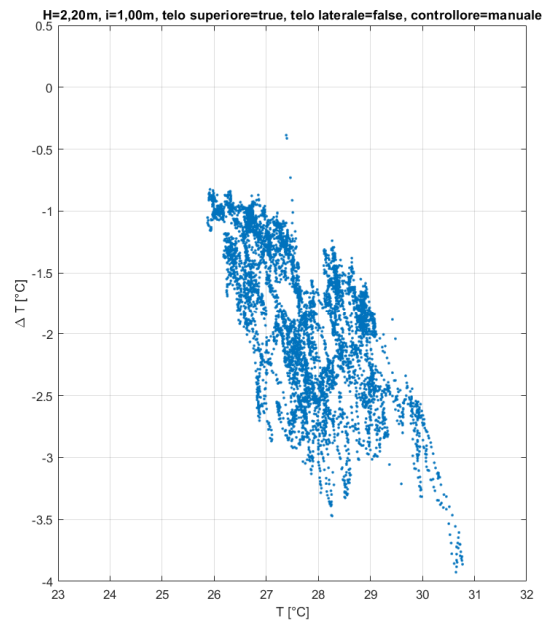
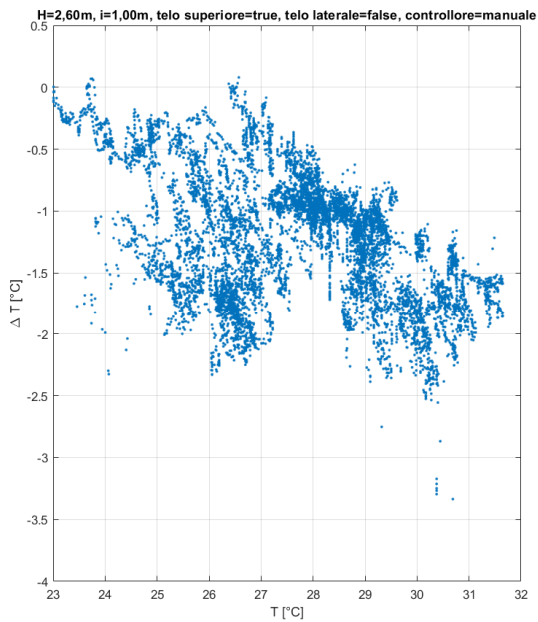


Fig. 99 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 3 vs Conf. 4)

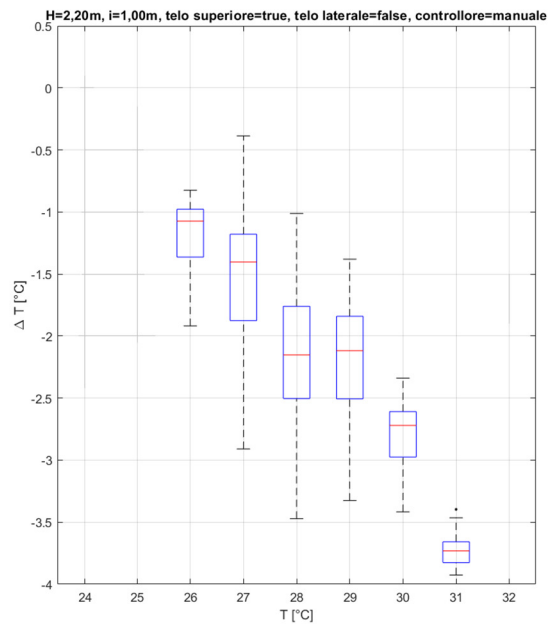
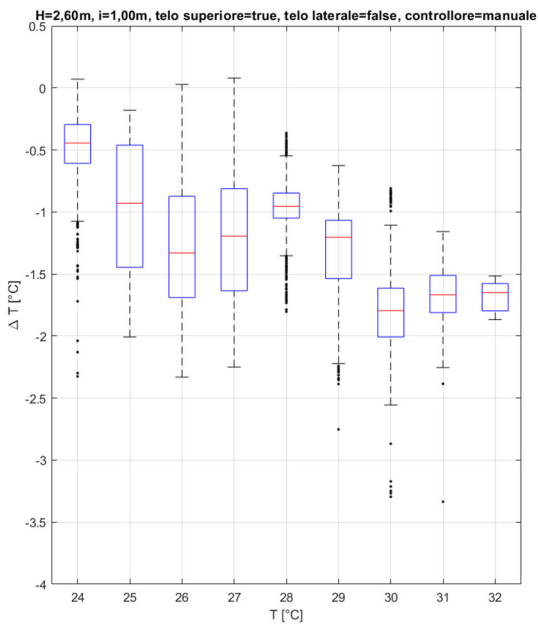


Fig. 100 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 3 vs Conf. 4)

Le immagini mostrano come varia  $\Delta T$  rispetto alla Temperatura dell'aria esterna  $T_a$ . Si nota subito, come atteso, che l'abbassamento degli ugelli (*configurazione 4*, a destra) porta a dei  $\Delta T$  maggiori, per esempio a 30°C con gli ugelli a 2,60 m la scatola del box plot è compresa tra -1,5 e -2°C, mentre con altezza degli ugelli pari a 2,20 m questa è compresa tra -2,5 e -3°C. In generale  $\Delta T$  cresce con l'aumentare della temperatura esterna.

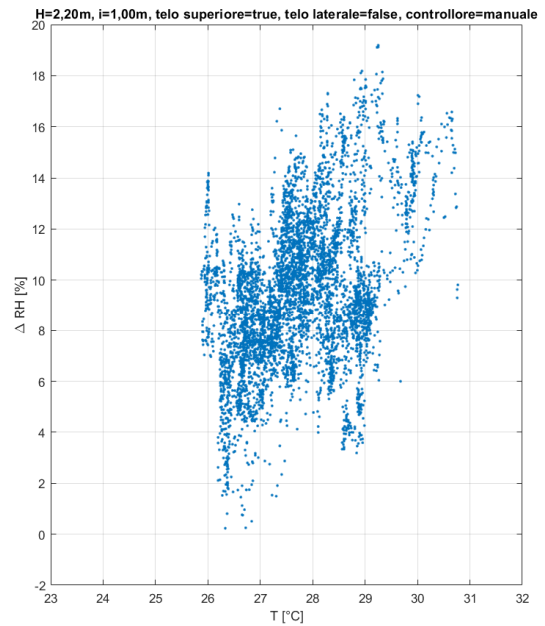
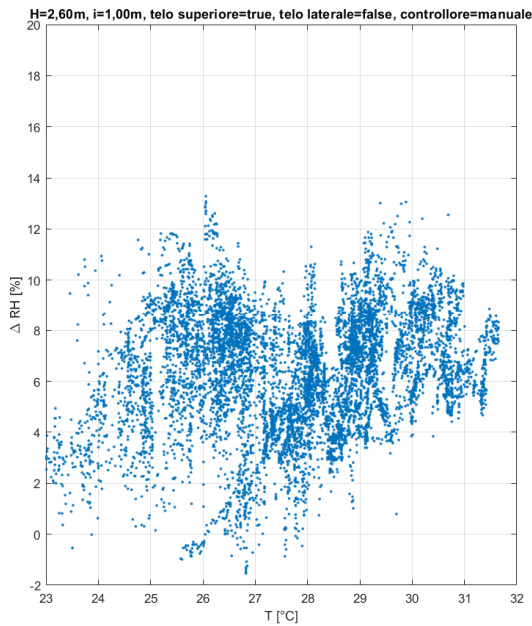


Fig. 101 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 3 vs Conf. 4)

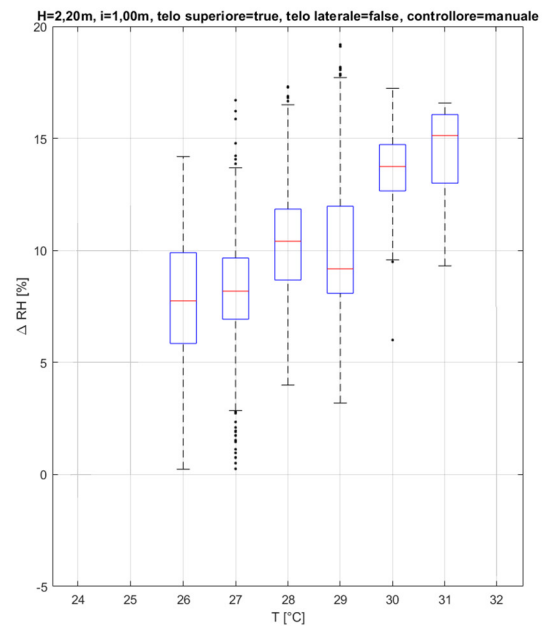
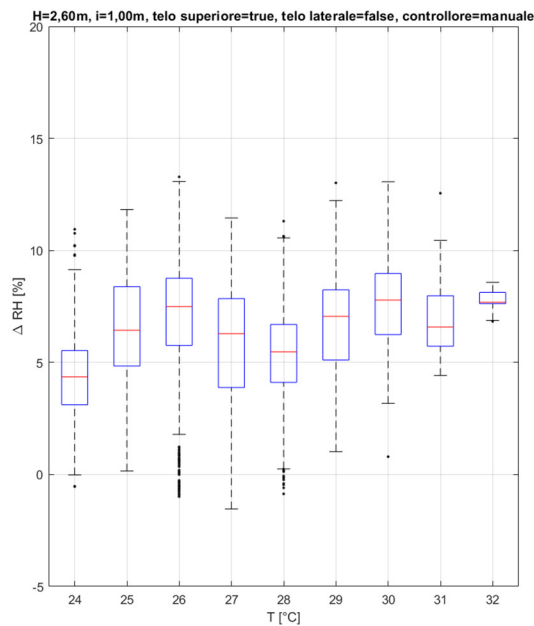


Fig. 102 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 3 vs Conf. 4)

Anche in questi grafici si verifica quanto atteso, ovvero che con gli ugelli posti ad un'altezza inferiore si ha un incremento maggiore di umidità relativa. A 31°C, la *configurazione 4* vede valori di  $\Delta RH$  sul 15%, mentre la *configurazione 3* con la stessa  $T_a$  ha la scatola del box plot compresa tra 6 e 8%. Anche la variazione di umidità, come quella della temperatura, cresce all'aumentare della temperatura dell'aria esterna.

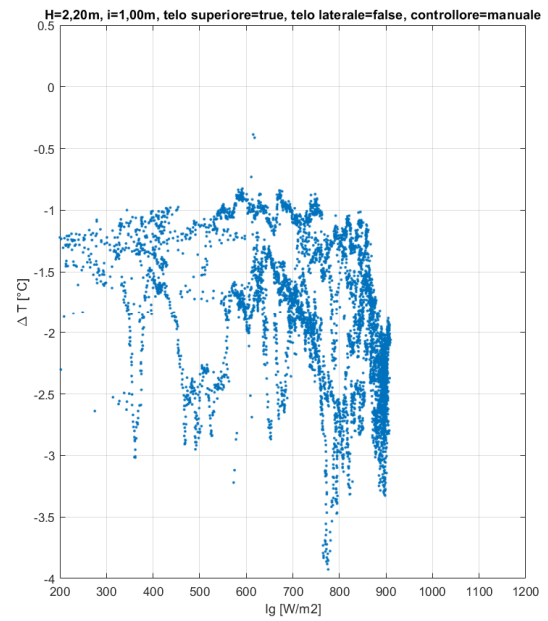
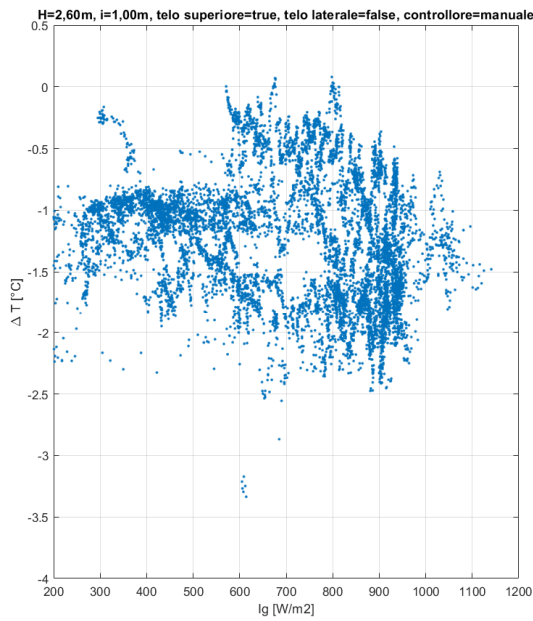


Fig. 103 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $I_g$  [W/m<sup>2</sup>] (Conf. 3 vs Conf. 4)

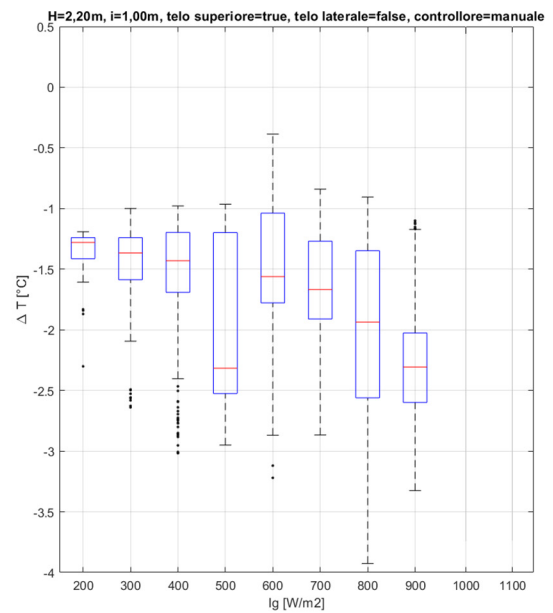
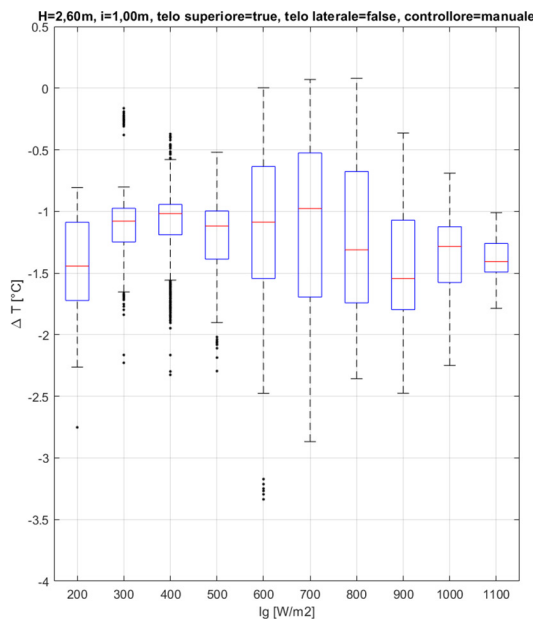


Fig. 104 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $I_g$  [W/m<sup>2</sup>] (Conf. 3 vs Conf. 4)

Considerando la variazione di Temperatura rispetto alla radiazione solare media, notiamo innanzitutto dai grafici di dispersione che a sinistra i dati sono più uniformi e di un numero maggiore (cinque giorni, rispetto ai tre rappresentati a destra). Nella *configurazione 4* si ha un abbassamento di Temperatura al crescere di  $I_g$  più evidente, mentre nella *configurazione 3* si nota come la maggior parte dei dati sia compresa tra 600 e 800 W/m<sup>2</sup>.

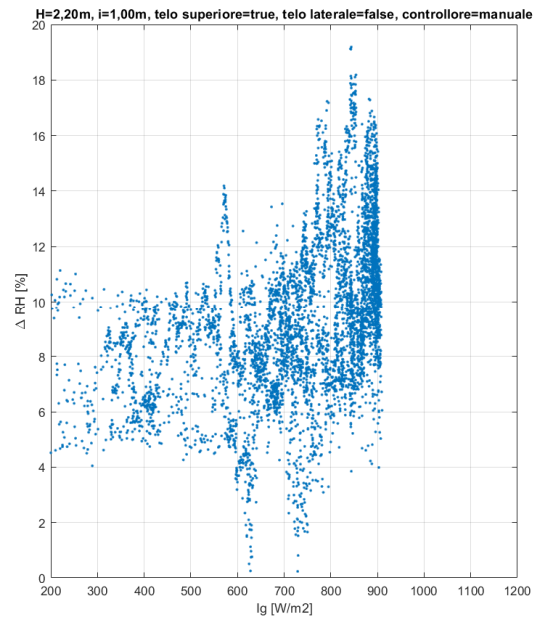
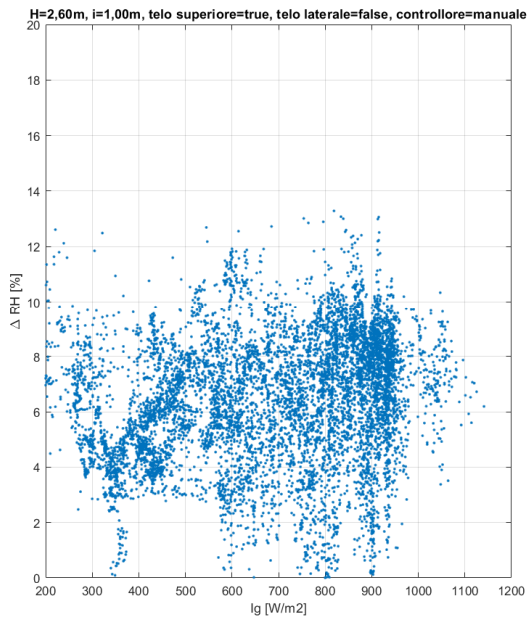


Fig. 105 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 3 vs Conf. 4)

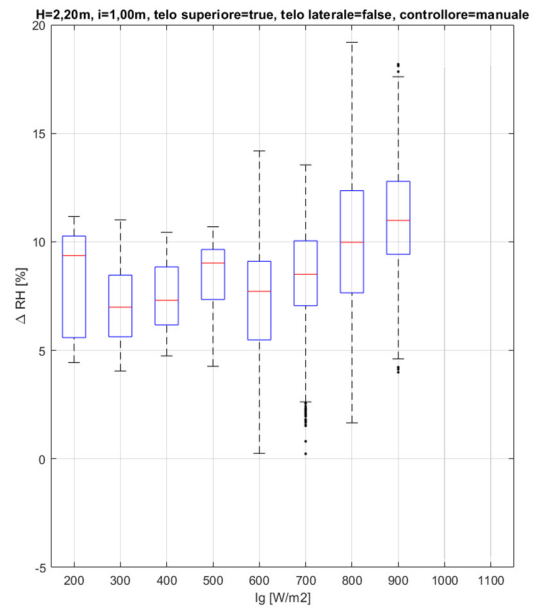
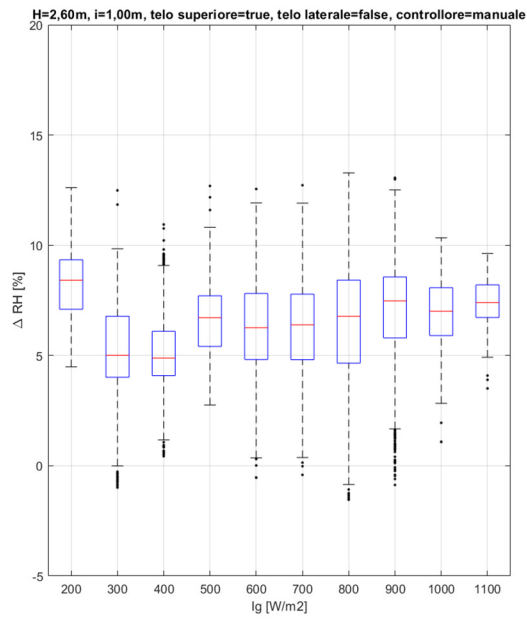


Fig. 106 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 3 vs Conf. 4)

Nella configurazione in cui gli ugelli sono a 2,60 m di altezza, l'andamento di  $\Delta RH$  nei confronti di  $I_g$  è abbastanza costante, si ha come atteso un leggero innalzamento dell'umidità per alte radiazioni, condizione più facilmente visibile nella configurazione con ugelli più bassi, dove a paragone viene prodotta anche più umidità. Tra le due configurazioni quella che produce più umidità relativa è la *configurazione 4*.

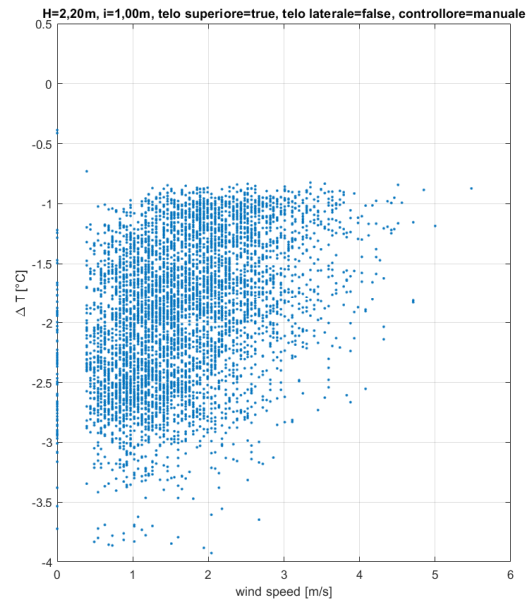
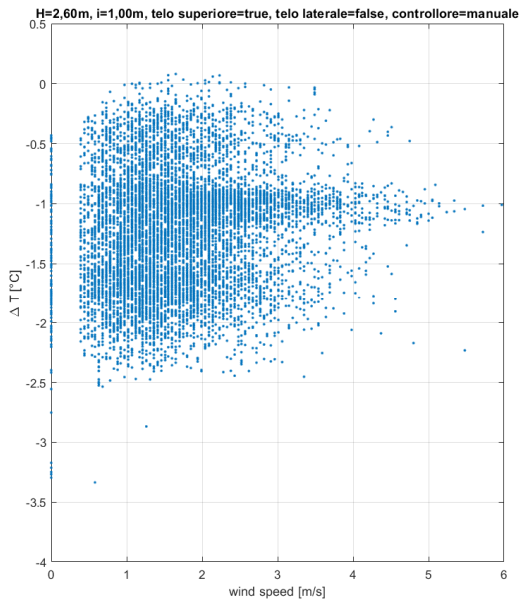


Fig. 107 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 3 vs Conf. 4)

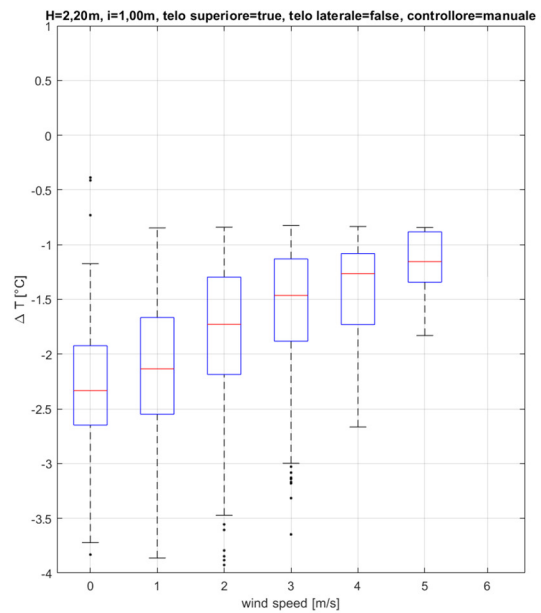
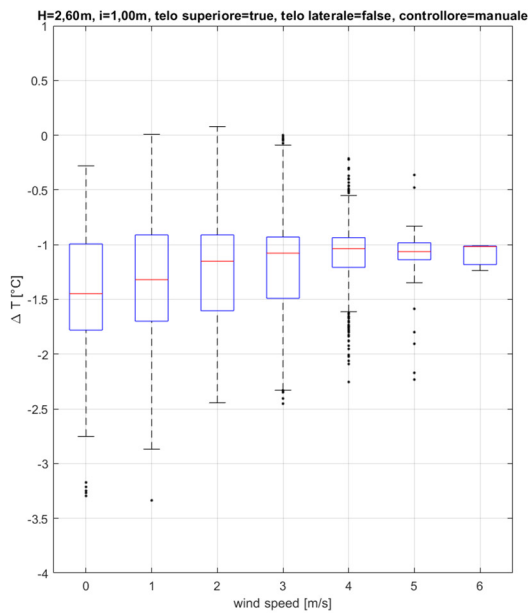


Fig. 108 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 3 vs Conf. 4)

Dai grafici di dispersione si evince come la nuvola di punti si disperda all'aumentare della velocità del vento. Ciò comporta che per bassi valori di  $ws$  la variazione di temperatura è maggiore rispetto ad alte velocità del vento, i box plots infatti mostrano chiaramente come il trend sia crescente da sinistra a destra. Come già detto, nella *configurazione 4*, a causa degli ugelli posizionati più in basso, i sensori hanno rilevato temperature più basse, la variazione di temperatura sfiora i  $-4^{\circ}\text{C}$  per 0-2 m/s di vento.

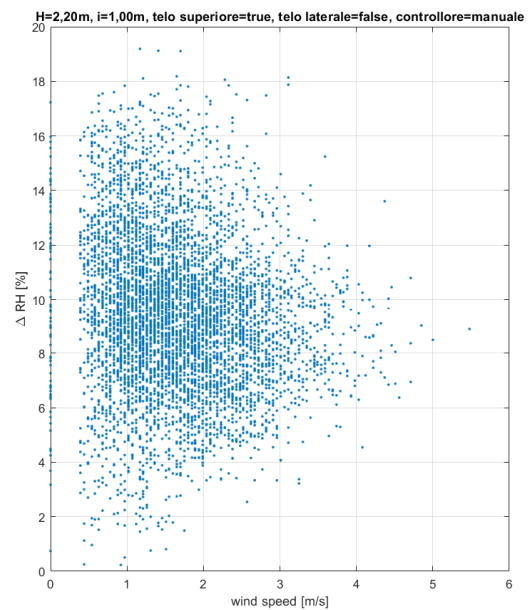
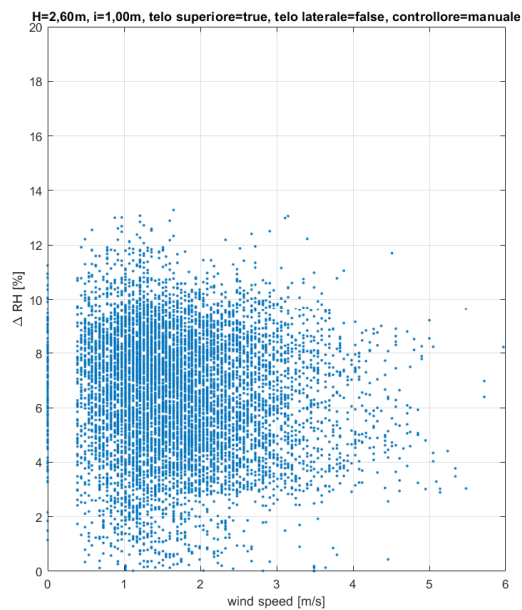


Fig. 109 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 3 vs Conf. 4)

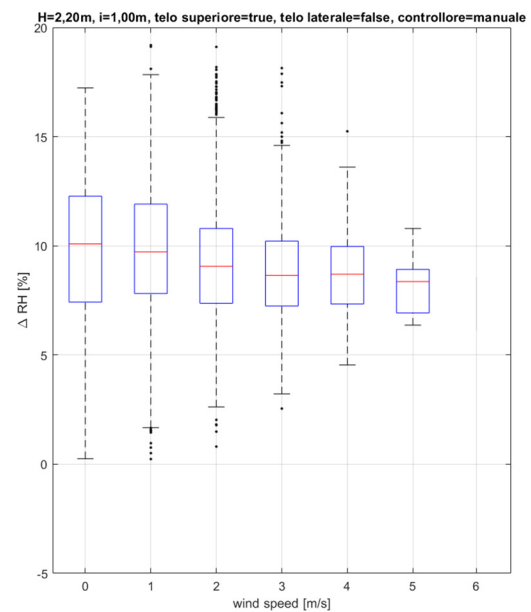
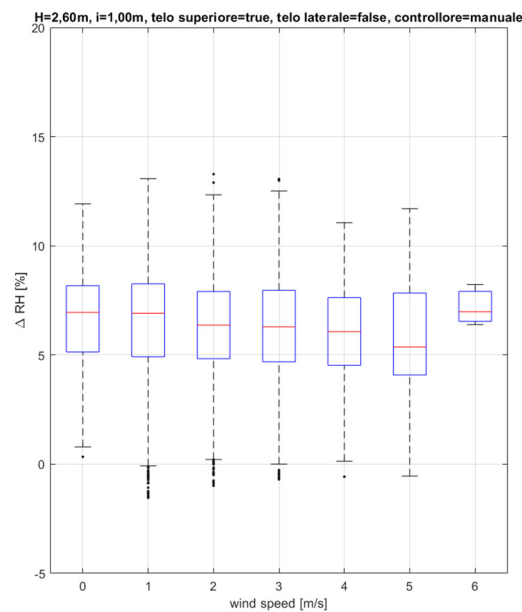


Fig. 110 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 3 vs Conf. 4)

La variazione di umidità relativa tra ambiente spray e ambiente naturale nella *configurazione 3* sembra essere costante, nella *configurazione 4* decresce con l'aumentare della velocità del vento, come previsto. L'umidità prodotta con gli ugelli posti a 2,20 m dal suolo è maggiore rispetto ad un'altezza pari a 2,60 m: nel primo caso gli outliers arrivano anche 20% mentre con 2,60 m di altezza si arriva al massimo a 13%.



#### 4.1.3.2 Variazione altezza ugelli da 2,20 m a 2,90 m

Si osservano due configurazioni con stesse caratteristiche ma differente altezza degli ugelli. In questo caso abbiamo entrambi i teli di schermatura, quello superiore per la radiazione solare e quello laterale per contrastare il vento. Il controllore è di tipo manuale, quindi il sistema risulta sempre attivo dalle 9:00 alle 19:00.

In particolare, a sinistra si trova la *configurazione 5* attiva nel periodo 24-26 luglio 2021 che prevede:

- $H = 2,20m$ ;
- $i = 1,00m$
- Telo superiore = true
- Telo laterale = true
- Controllore = manuale

A destra la *configurazione 6* valida il 28 e il 29 luglio 2021 con:

- $H = 2,90m$ ;
- $i = 1,00m$
- Telo superiore = true
- Telo laterale = true
- Controllore = manuale

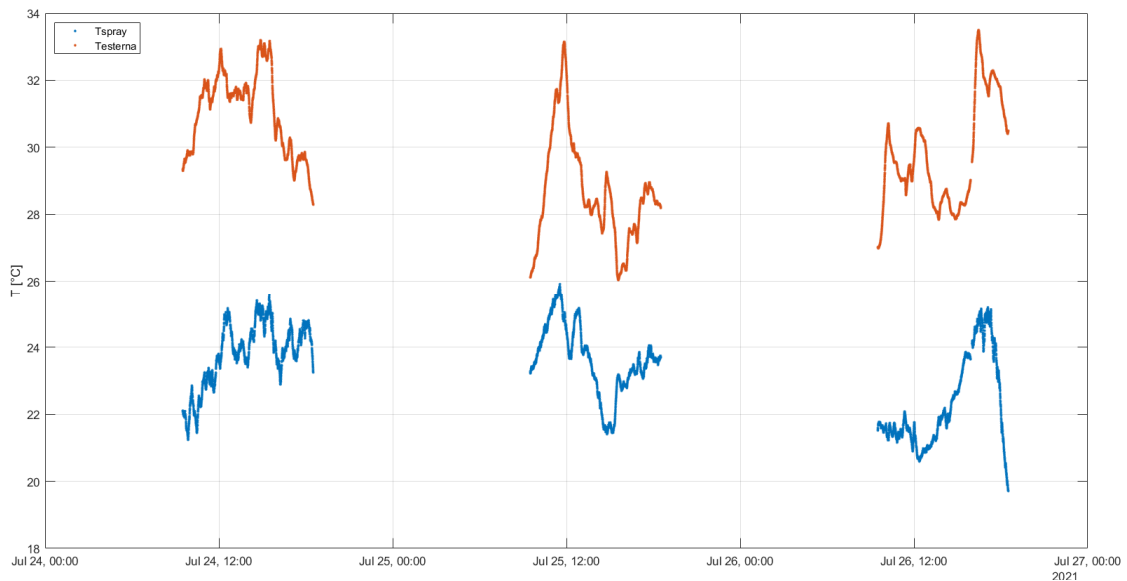


Fig. 111 – Rappresentazione andamento temperatura esterna e temperatura sistema spray (configurazione 5)

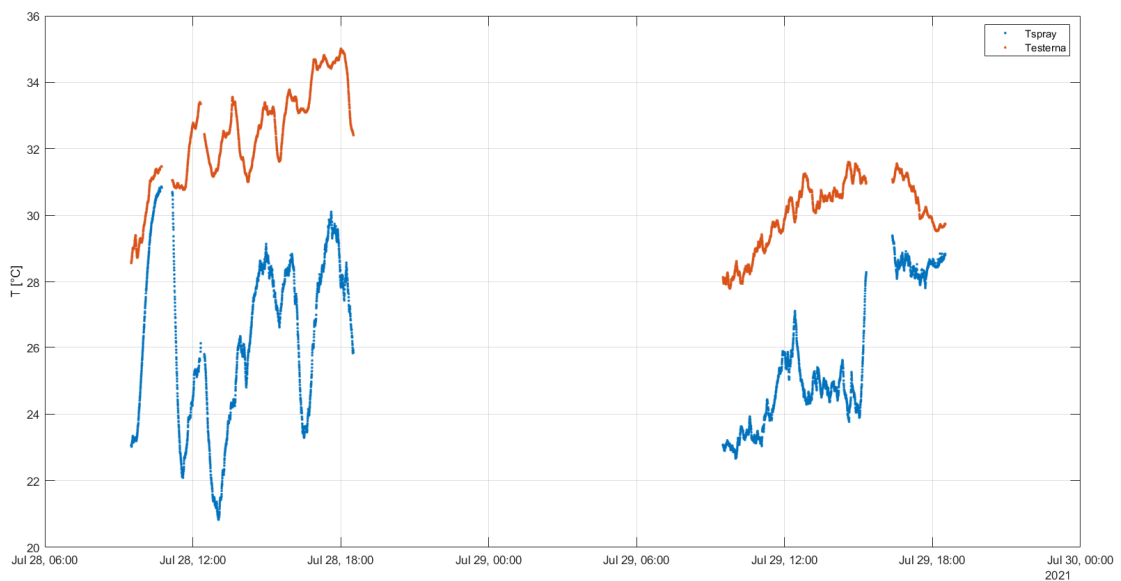


Fig. 112 – Rappresentazione andamento temperatura esterna e temperatura sistema spray (configurazione 6)

La *configurazione 5* viene mantenuta per tre giorni, la temperatura minima riscontrata è superiore a 26°C, mentre la massima supera i 34°C. Nell'immagine sotto viene rappresentata la *configurazione 6* e quindi i giorni 28 e 29 luglio. In questa configurazione la temperatura minima è 28°C, mentre la massima è 35°C. In entrambi i casi, il sistema risulta efficiente, a dimostrarlo è l'andamento dei puntini blu (temperatura sistema spray), sempre inferiore alla Temperatura dell'aria esterna (puntini arancio).

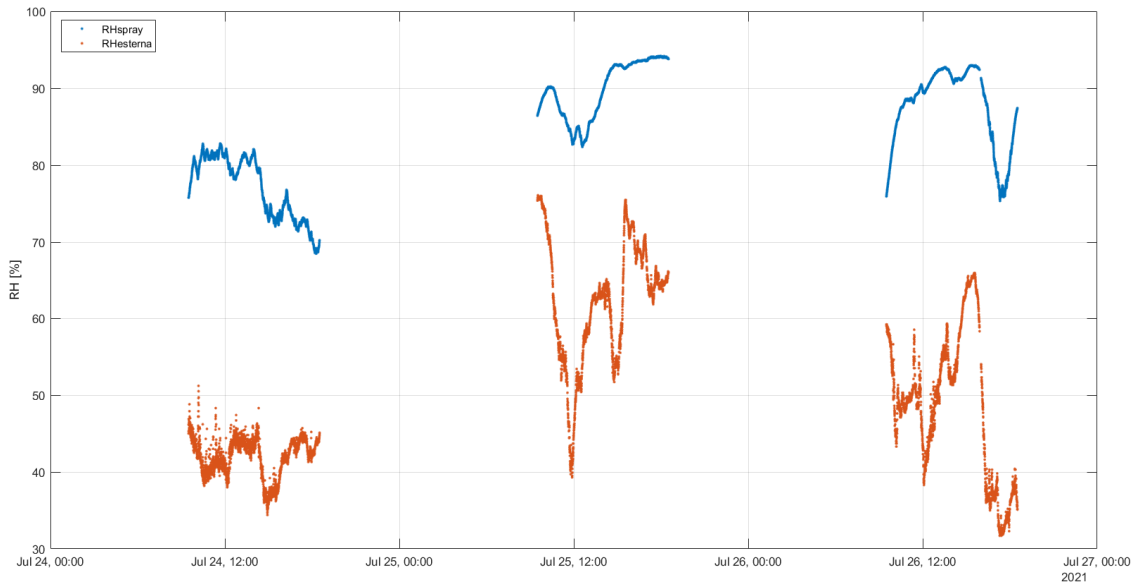


Fig. 113 – Rappresentazione andamento umidità relativa esterna e umidità relativa sistema spray (configurazione 5).

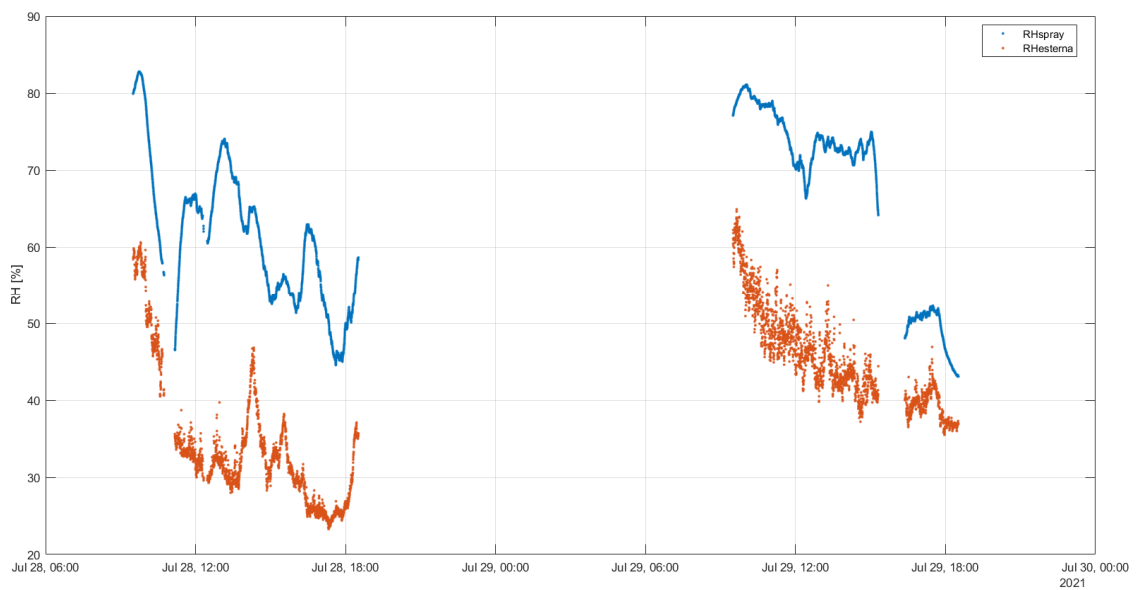


Fig. 114 – Rappresentazione andamento umidità relativa esterna e umidità relativa sistema spray (configurazione 6).

Anche in termini di Umidità Relativa il sistema dimostra quanto atteso: a causa dell'immissione nello spazio di particelle di acqua nebulizzata, l'RH sotto il sistema spray aumenta. La giornata più umida è nella *configurazione 5* e supera il 75% di umidità, quella meno umida è il 28 luglio, dove la minima è circa 25%.

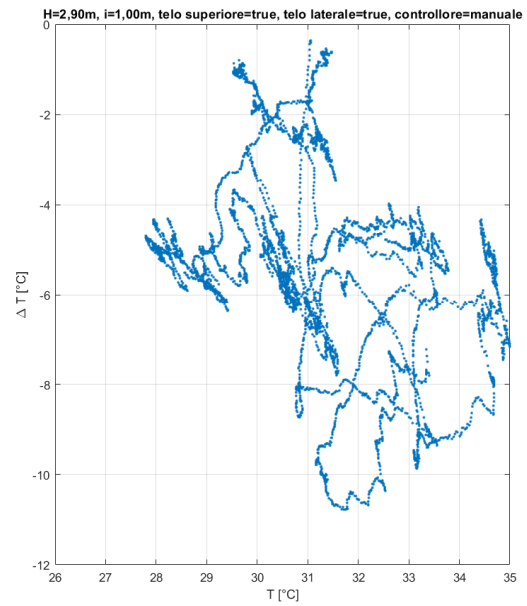
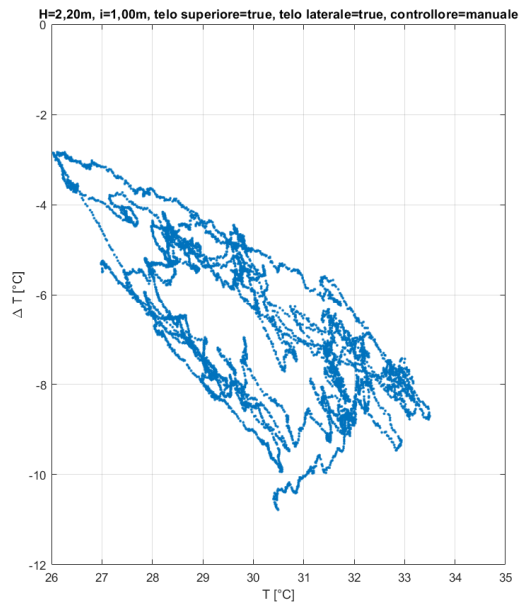


Fig. 115 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 5 vs Conf. 6)

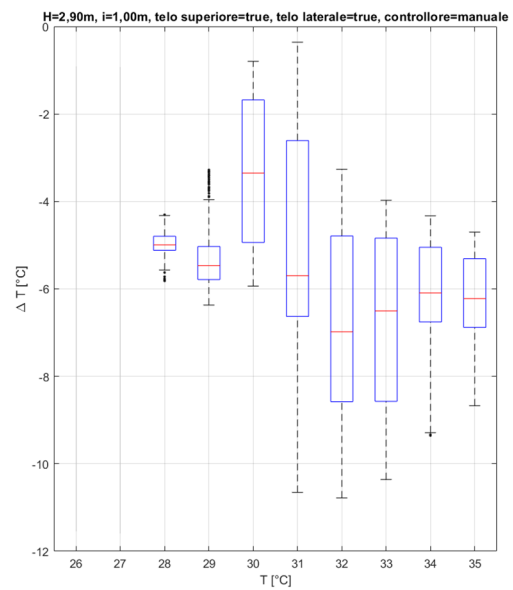
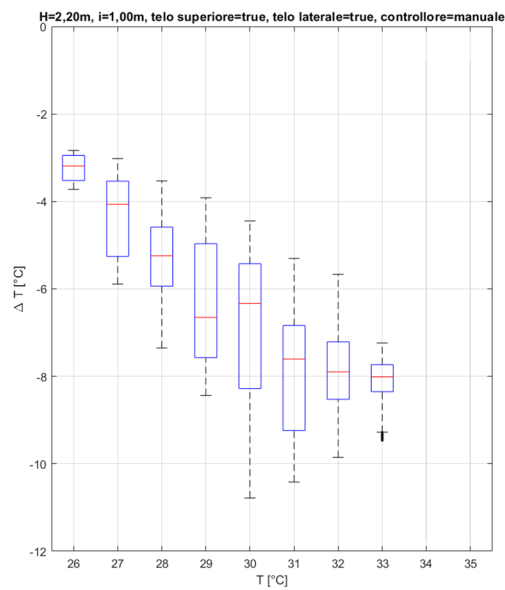


Fig. 116 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 5 vs Conf. 6)

Rispetto ai grafici a dispersione visti finora qui si evidenzia una carenza di dati, di conseguenza non si ha una nuvola di punti compatta, ma maggiore dispersione. L'andamento della *configurazione 5* rispecchia quanto atteso, cioè che la temperatura sotto il sistema water-mist si abbassa all'aumentare della temperatura. Questo è meno visibile nella *configurazione 6*, dove comunque l'andamento risulta seguire una linea obliqua che a destra si abbassa. Menzione particolare per il range attorno a 31 °C che nella *configurazione 6* vede molti dati e grande dispersione.

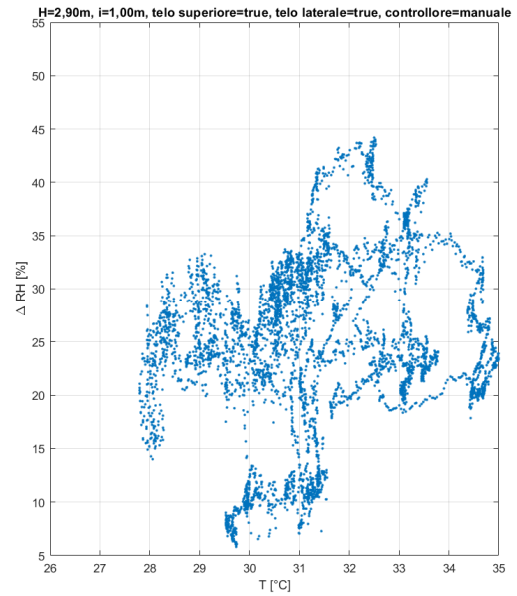
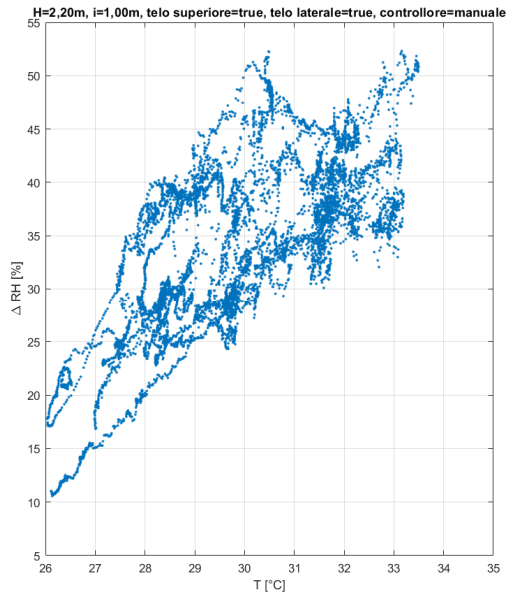


Fig. 117 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $Ta$  [°C] (Conf. 5 vs Conf. 6)

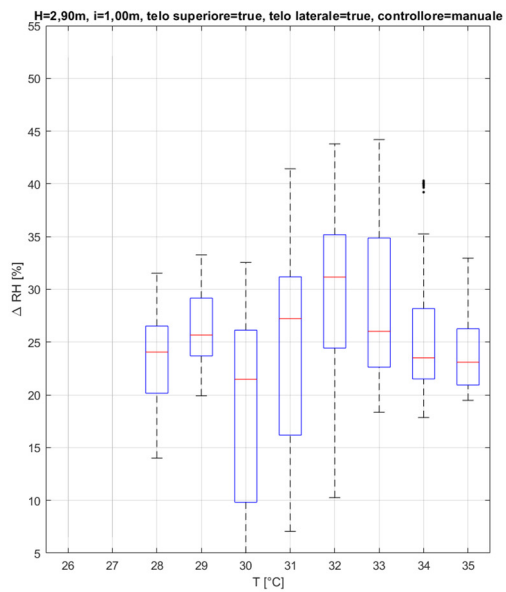
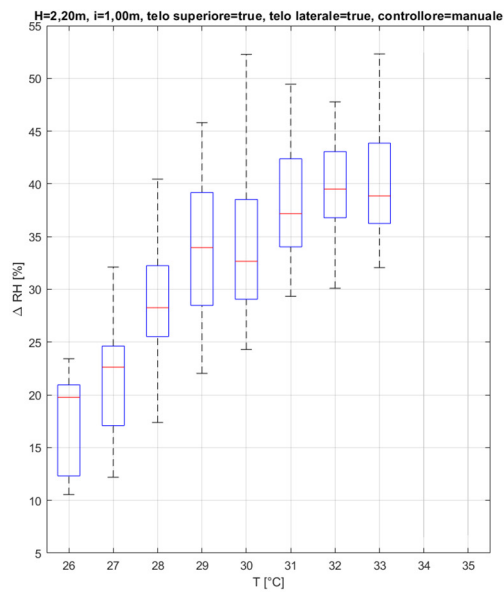


Fig. 118 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $Ta$  [°C] (Conf. 5 vs Conf. 6)

Nella configurazione con altezza ugelli 2,20 m, il trend di  $\Delta RH$  è opposto a quello di  $\Delta T$ , e dunque l'umidità relativa all'interno del sistema spray cresce all'aumentare della temperatura. Globalmente la *configurazione 5*, a parità di temperatura, vede maggiori variazioni di umidità: a 33°C a sinistra abbiamo la scatola compresa tra 35% e 45%, mentre a destra varia tra 20% e 35%.

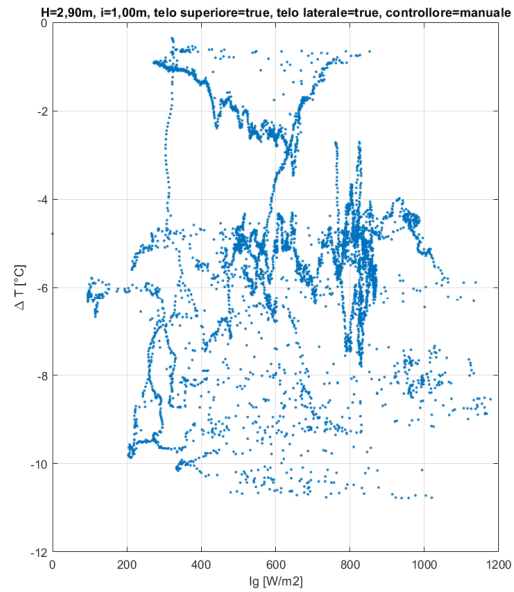
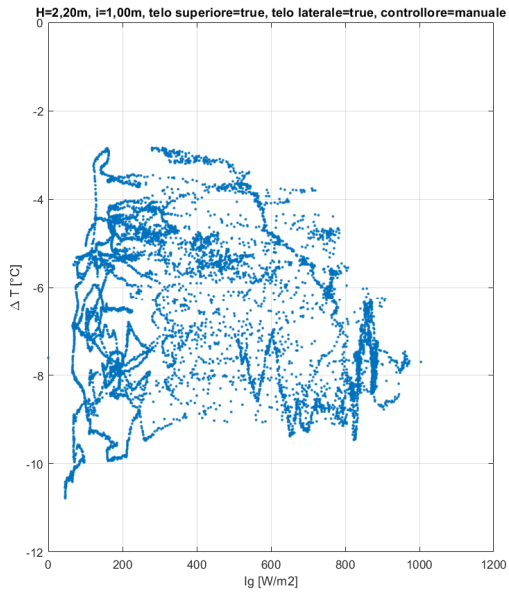


Fig. 119 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $I_g$  [W/m<sup>2</sup>] (Conf. 5 vs Conf. 6)

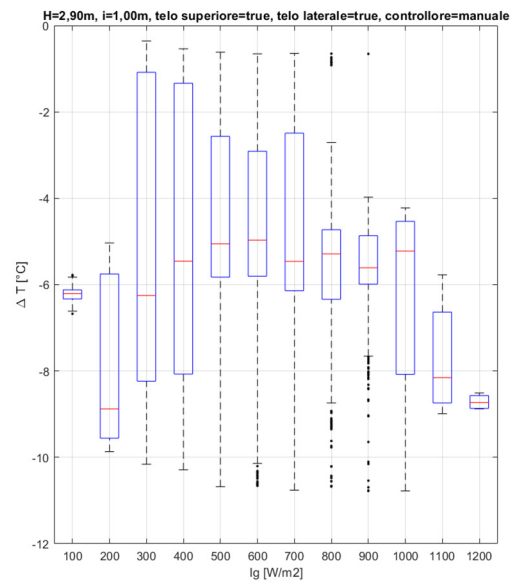
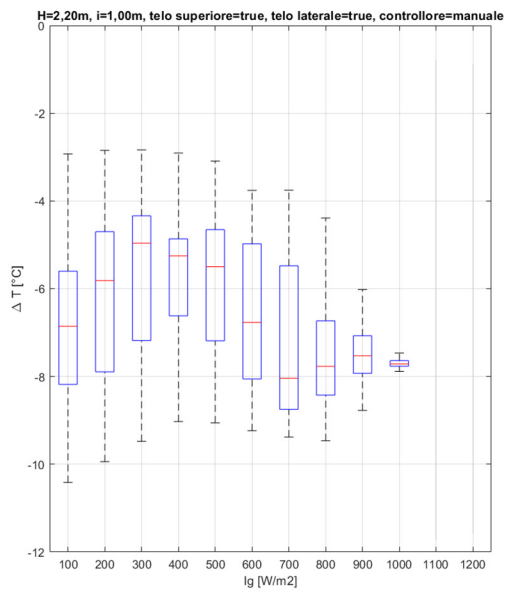


Fig. 120 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $I_g$  [W/m<sup>2</sup>] (Conf. 5 vs Conf. 6)

L'informazione più facilmente notabile da questi grafici è che la configurazione in cui gli ugelli sono posti a 2,90 m dal suolo presenta grande dispersione di dati, questo lo si vede da entrambi i grafici, perché anche i box plots presentano delle scatole molto più grandi rispetto agli altri casi. Nella configurazione a sinistra i dati sono più concentrati e sono sempre meno via via che aumenta la radiazione media solare.

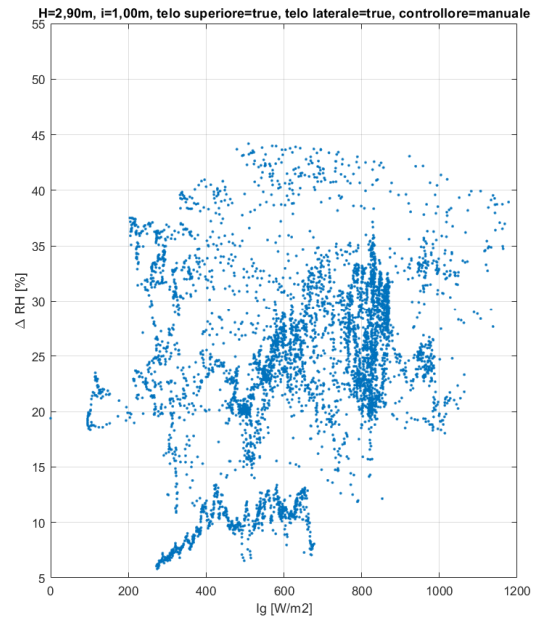
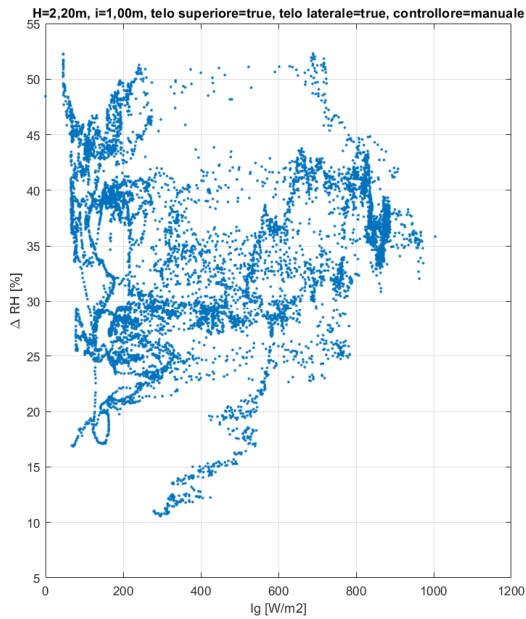


Fig. 121 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 5 vs Conf. 6)

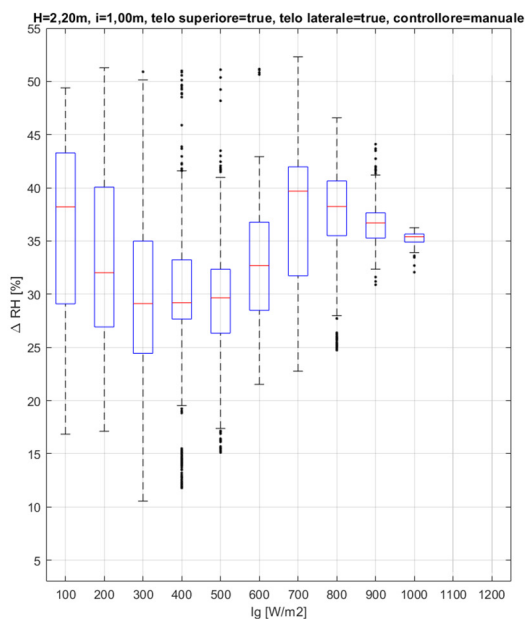


Fig. 122 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 5 vs Conf. 6)

I dati relativi alla variazione di umidità relativa espressa in termini di radiazione media solare risultano essere molto dispersi, questo crea anche nei box plots scatole e baffi di grandi dimensioni, per contenere tutta la varianza dei dati. Si può comunque notare come la configurazione a sinistra, con gli ugelli più bassi, provochi un maggior aumento dell'umidità relativa all'interno del sistema spray, il  $\Delta RH$  in questo caso va anche oltre il +50%.

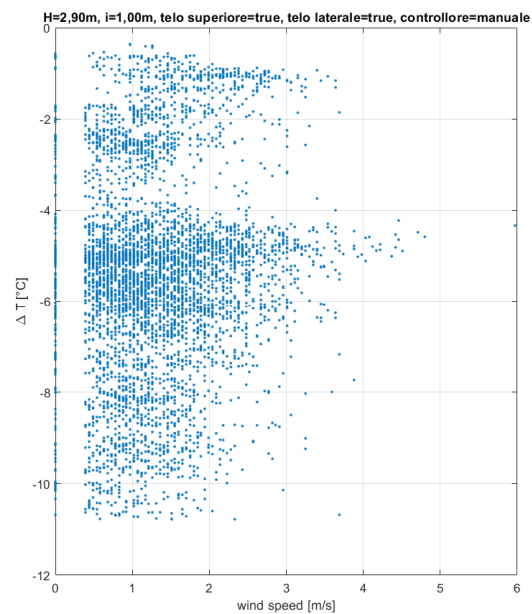
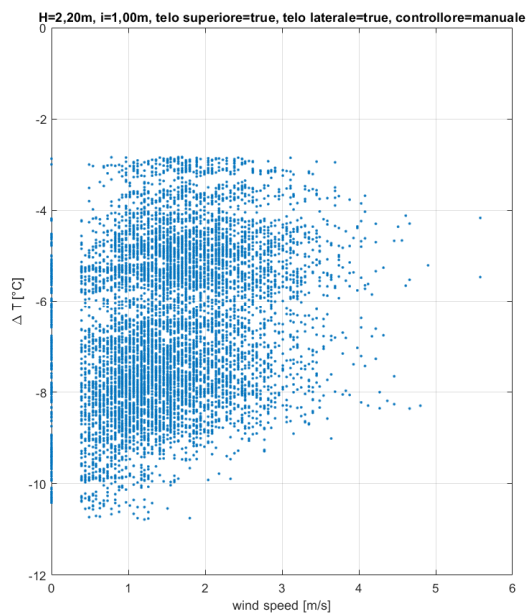


Fig. 123 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 5 vs Conf. 6)

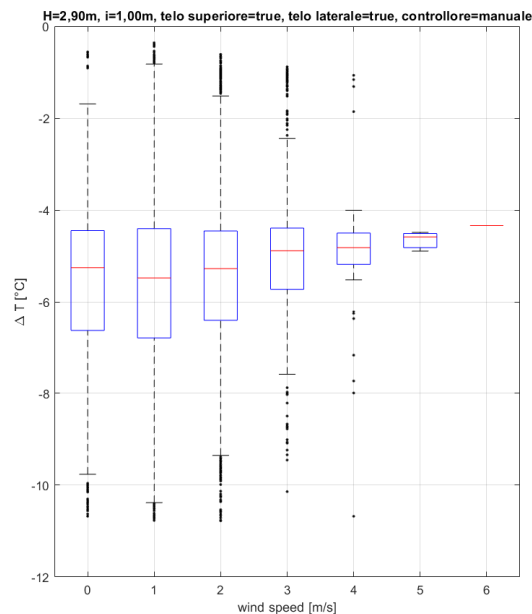
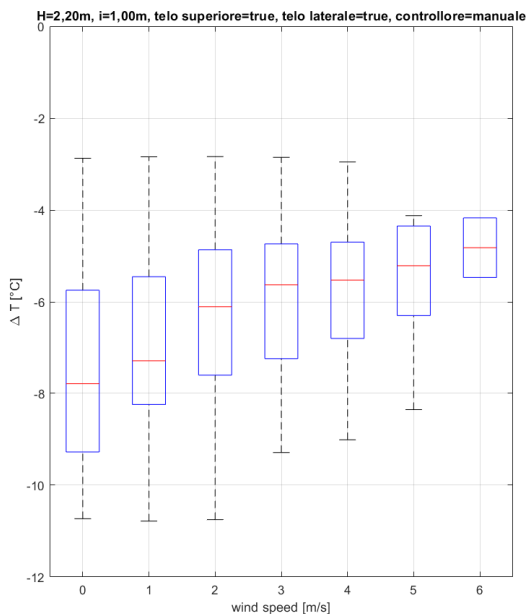


Fig. 124 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 5 vs Conf. 6)

Per quanto riguarda la variabile vento, è verificato che a basse velocità corrispondano temperature inferiori e meno dispersione di dati. Nella *configurazione 5* il trend è chiaro e conforme a quando atteso: una retta obliqua che cresce verso destra. La *configurazione 6* mostra ancora grande dispersione di dati, ma anche qui a bassi valori di  $ws$  corrispondono maggiori  $\Delta T$ .



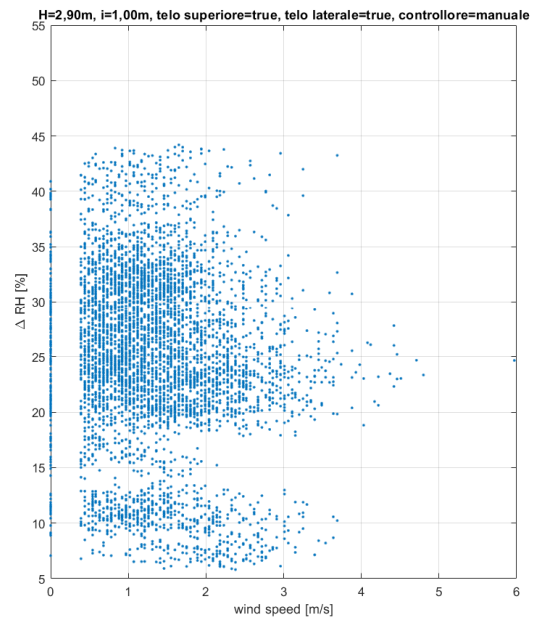
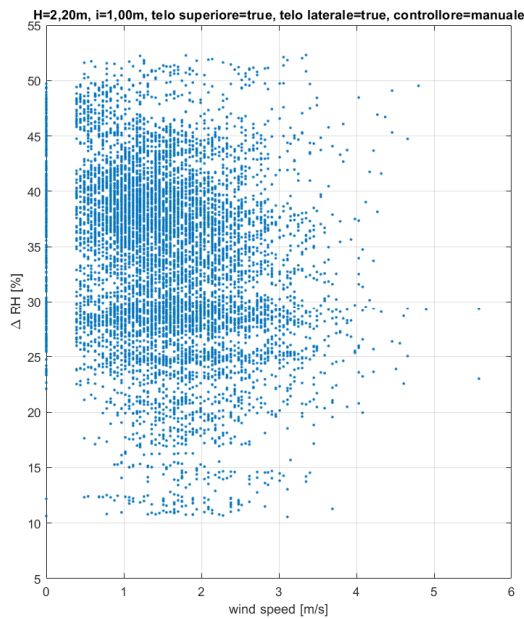


Fig. 125 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 5 vs Conf. 6)

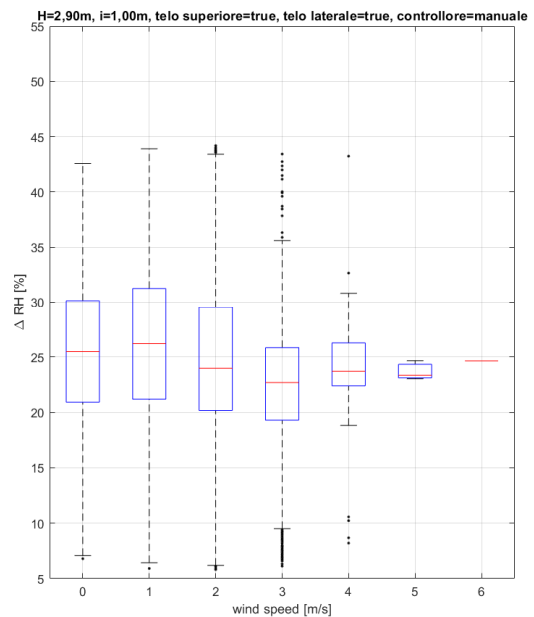
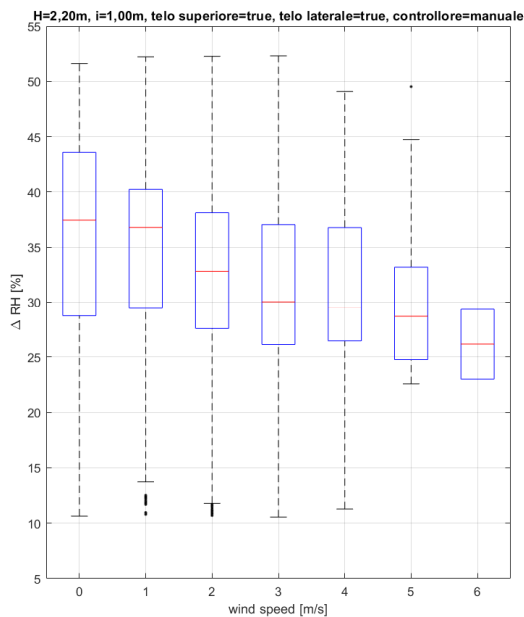


Fig. 126 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 5 vs Conf. 6)

In entrambi i casi si riscontrano massimi valori di velocità del vento pari a 6 m/s. Il  $\Delta RH$  è maggiore con velocità del vento comprese tra 0 e 3 m/s, questo conferma quanto detto anche in precedenza, ovvero che il vento aumentando di velocità crea maggior dispersione di dati, quindi meno variazione sia di temperatura che di umidità relativa. L'umidità prodotta dal sistema spray è più riscontrata nella *configurazione 5*, dove la variazione di umidità supera il 50%.

#### 4.1.4 Configurazioni in cui variano i teli di schermatura

Le condizioni prese in considerazione prevedono la stessa configurazione in termini di altezza ugelli, del loro interasse e del tipo di controllore; variano soltanto per i diversi teli di schermatura posti in opera. Nel primo caso si ha un solo telo posto in opera, quello di schermatura della radiazione solare, mentre nel secondo caso si hanno tutti due i tipi di schermatura, anche quello laterale contro il vento.

A sinistra la *configurazione 4* valida dal 21 al 23 luglio 2021 con:

- $H = 2,20\text{m}$ ;
- $i = 1,00\text{m}$
- Telo superiore = true
- Telo laterale = *false*
- Controllore = manuale

A destra la *configurazione 5* valida dal 24 al 26 luglio 2021:

- $H = 2,20\text{m}$ ;
- $i = 1,00\text{m}$
- Telo superiore = true
- Telo laterale = *true*
- Controllore = manuale

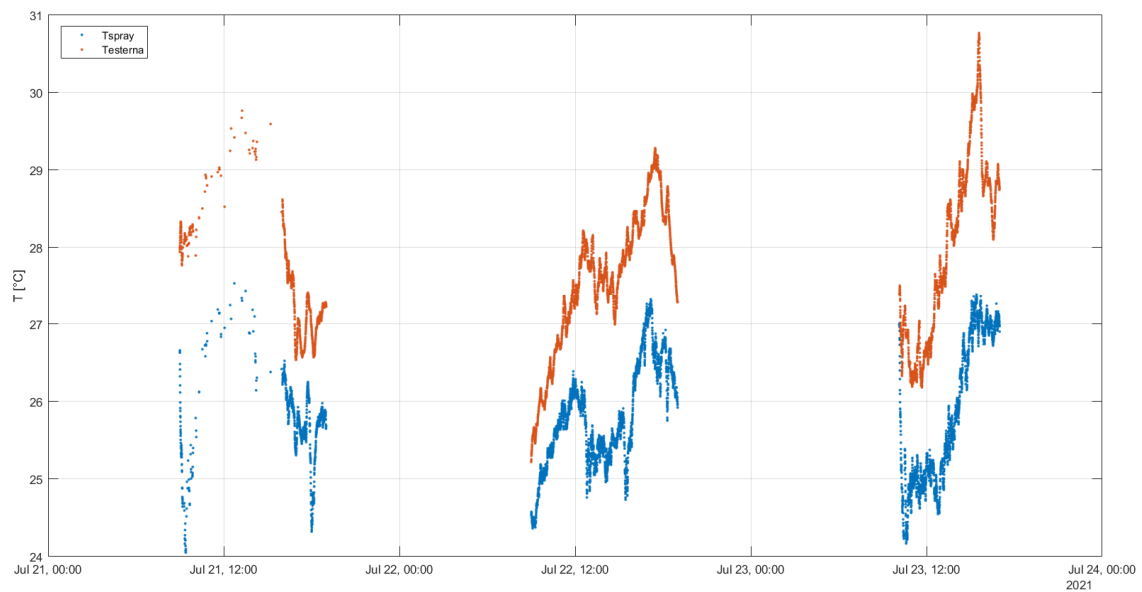


Fig. 127 – Rappresentazione andamento temperatura esterna e temperatura sistema spray (configurazione 4)

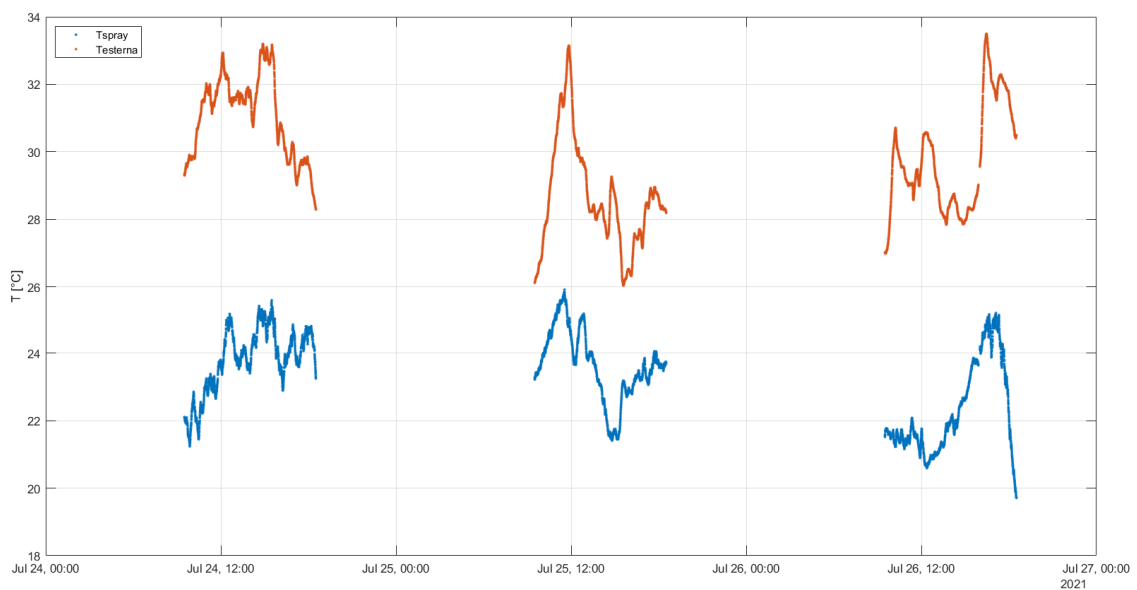


Fig. 128 – Rappresentazione andamento temperatura esterna e temperatura sistema spray (configurazione 5)

Osservando l'andamento delle temperature nei giorni che concernono ciascuna configurazione, si nota come dal 24 al 26 luglio risulta essere più caldo rispetto ai giorni precedenti. Anche le temperature rilevate dai sensori sotto il sistema spray sono differenti, quelle della *configurazione 5* sono inferiori: oscillano tra 20 e 26°C, mentre con un solo telo di schermatura, quello della radiazione solare posto sopra la struttura variano da 24 a 27,5°C.

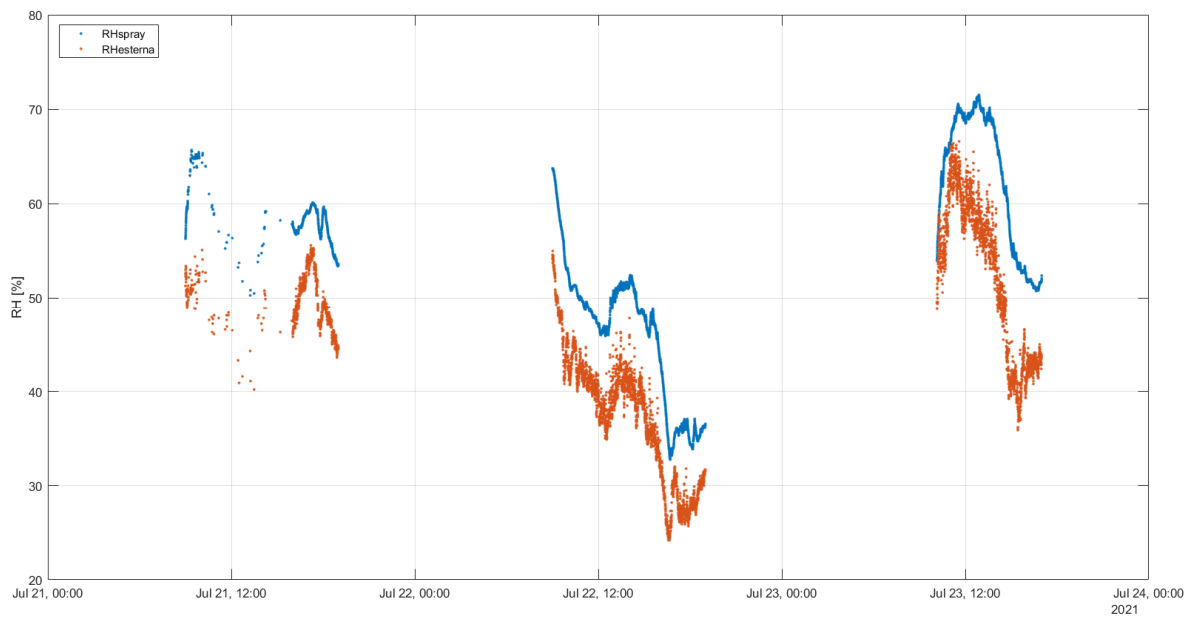


Fig. 129 – Rappresentazione andamento umidità relativa esterna e umidità relativa sistema spray (configurazione 4).

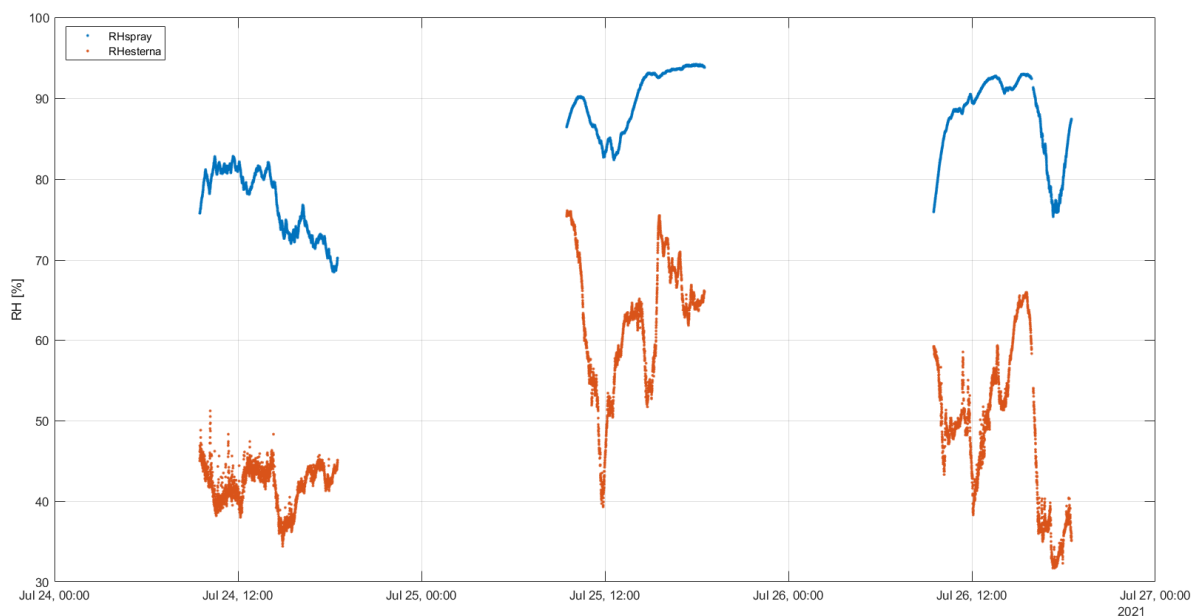


Fig. 130 – Rappresentazione andamento umidità relativa esterna e umidità relativa sistema spray (configurazione 5).

Gli andamenti di umidità relativa si differenziano tra le due configurazioni in quanto nell'immagine superiore si vede come l'RH ambiente non superi mai il 66%, con minimi del 25%. Nell'immagine sotto invece si nota come il 25 luglio si raggiungono valori anche oltre il 70% di RH. L'umidità prodotta dal sistema spray è maggiore nella *configurazione 5*, con picchi oltre il 90%, mentre sopra abbiamo massimo il 70% di umidità relativa.

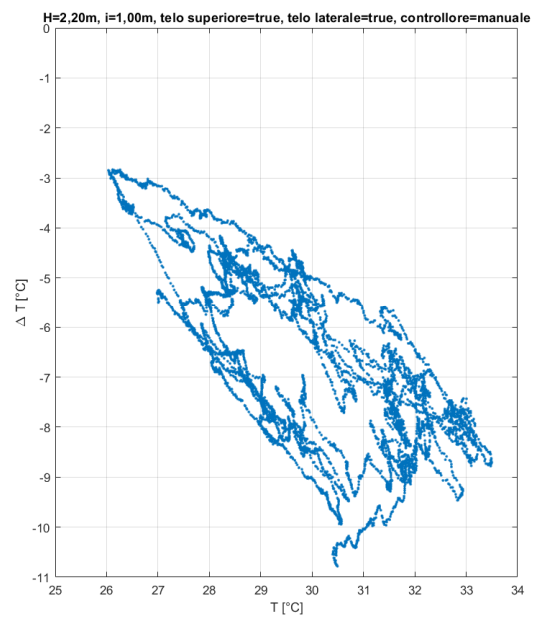
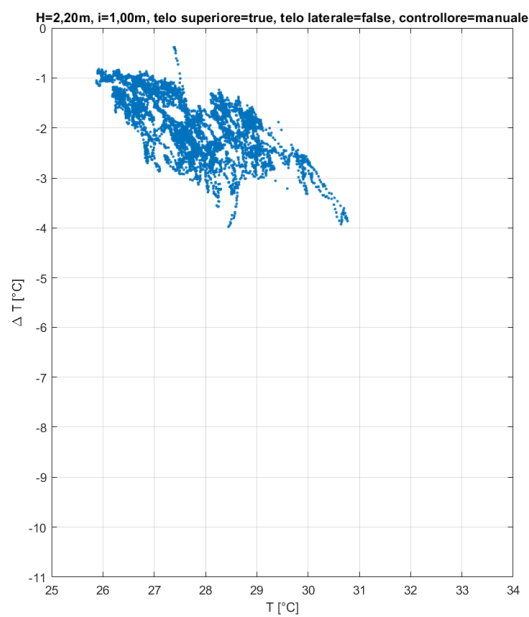


Fig. 131 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 4 vs Conf. 5)

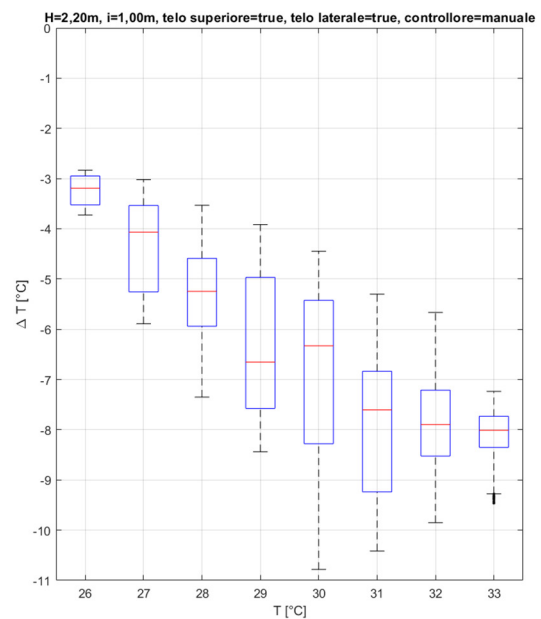
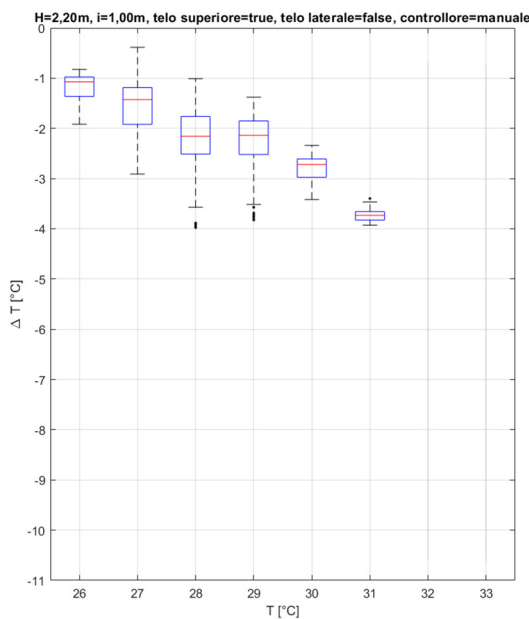


Fig. 132 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 4 vs Conf. 5)

Relazionando insieme le due configurazioni, si nota subito come nel primo caso la distribuzione dei dati sia compresa tra  $-4$  e  $0^\circ\text{C}$ , mentre nella configurazione a destra i valori di  $\Delta T$  sono compresi tra  $-3$  e  $-11^\circ\text{C}$ . Questo significa che la soluzione con entrambi i teli è più efficace in termini di raffreddamento. In entrambi i casi, comunque, il trend segue l'andamento atteso e le temperature sotto la zona spray si abbassano con l'aumentare della temperatura dell'aria esterna.

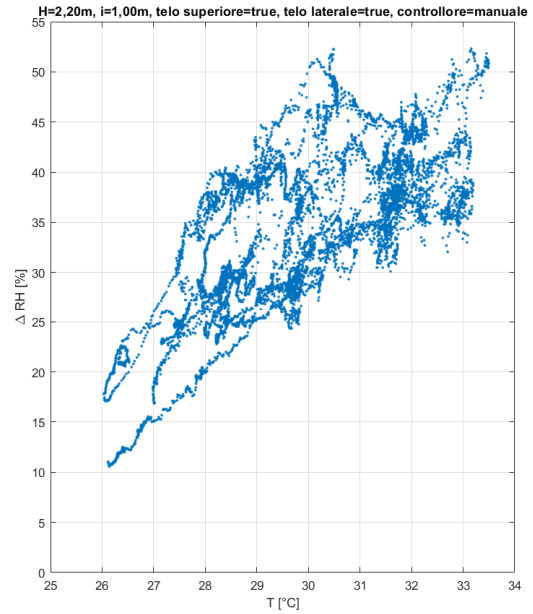
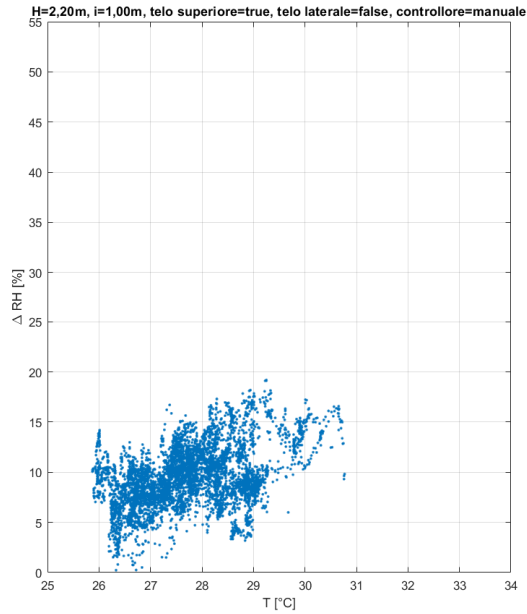


Fig. 133 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 4 vs Conf. 5)

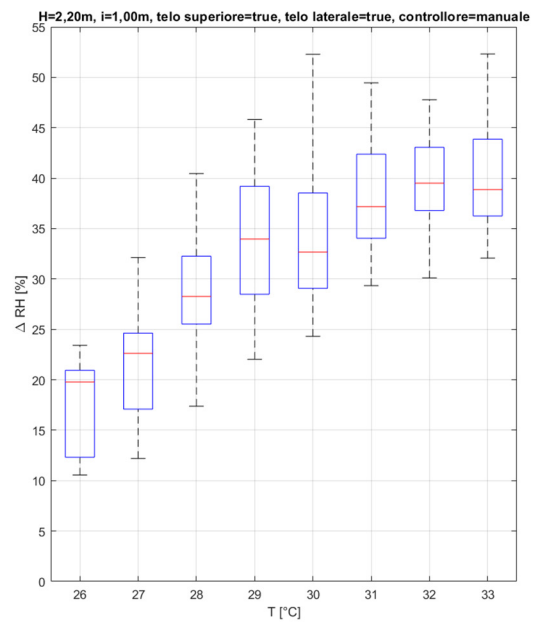
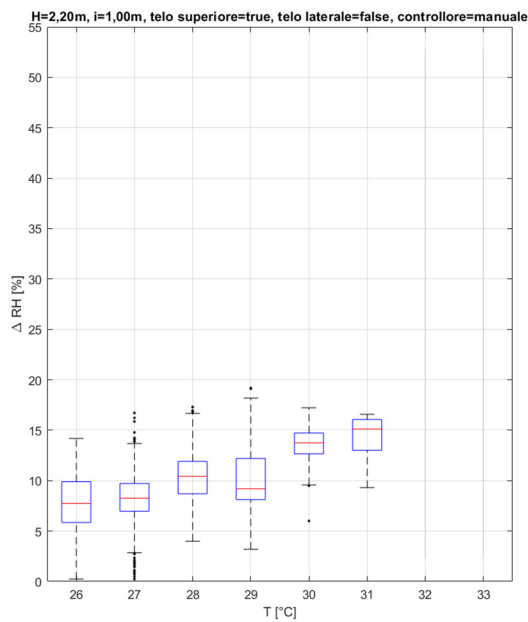


Fig. 134 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 4 vs Conf. 5)

Contrariamente alla variazione di temperatura, il  $\Delta RH$  segue un trend crescente con l'aumentare di  $T_a$ . La *configurazione 5* vede una maggior produzione di umidità relativa sotto la zona spray, dovuta alla presenza di entrambi i teli, che non permettono la stessa evaporazione della *configurazione 4*, dove il telo è posto solo superiormente. A sinistra abbiamo un incremento massimo di RH del 20%, a destra si supera anche il 50%.

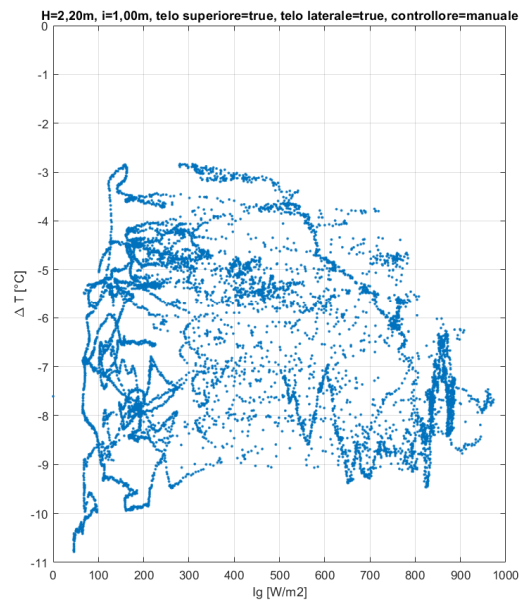
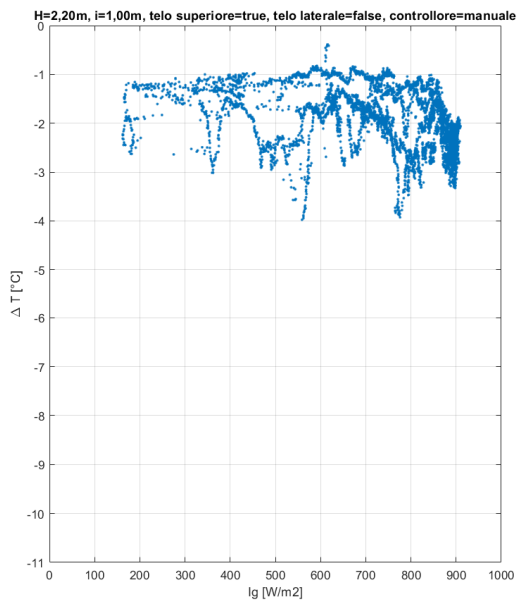


Fig. 135 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 4 vs Conf. 5)

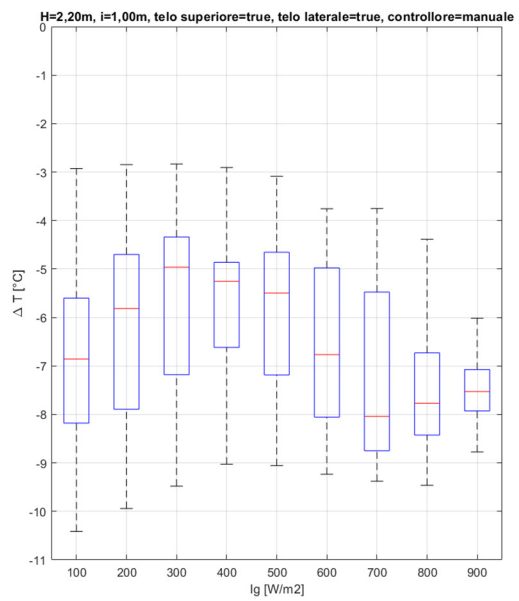
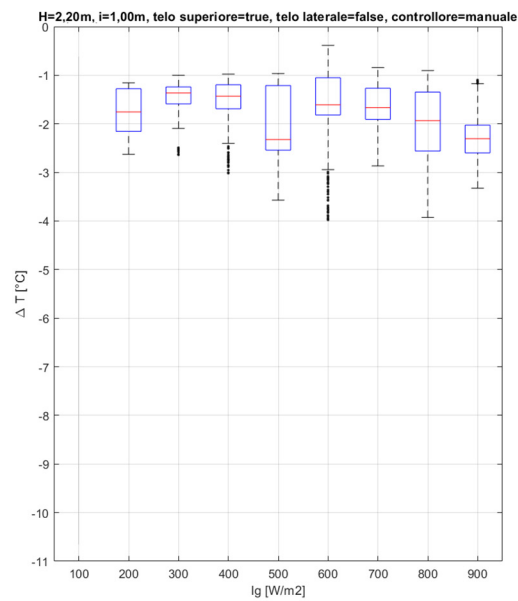


Fig. 136 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 4 vs Conf. 5)

Relazionando la variazione di temperatura tra zona spray e ambiente indisturbato con la radiazione solare media, notiamo anche qui come le due configurazioni occupino due parti differenti dei grafici. A sinistra vediamo la nuvola di punti e i box plots in alto ad indicare  $\Delta T$  inferiori, mentre a destra i dati sono concentrati tutti più in basso, con variazioni che sfiorano anche gli 11°C.

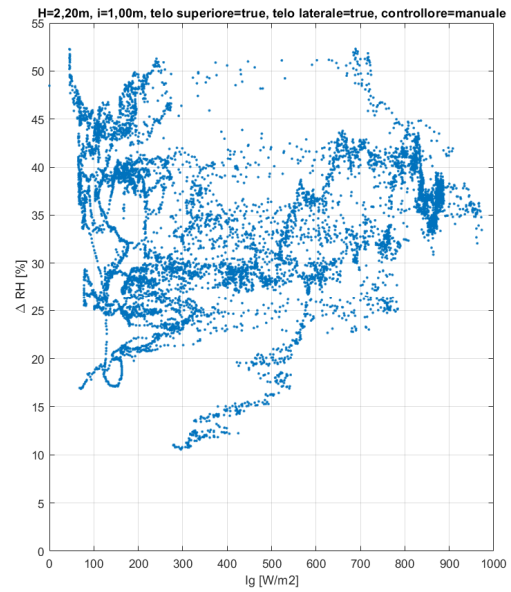
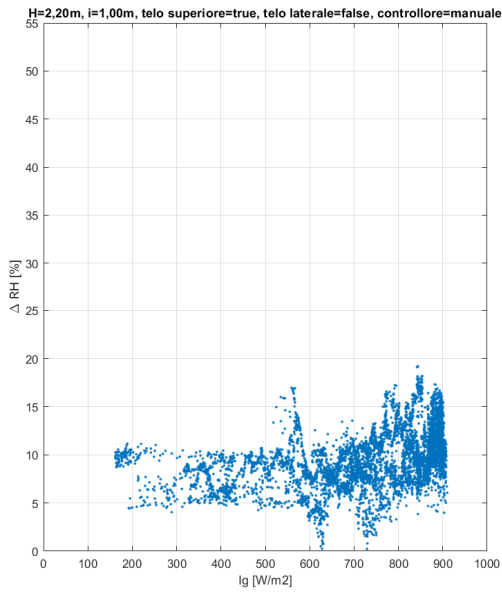


Fig. 137 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $Ig$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 4 vs Conf. 5)

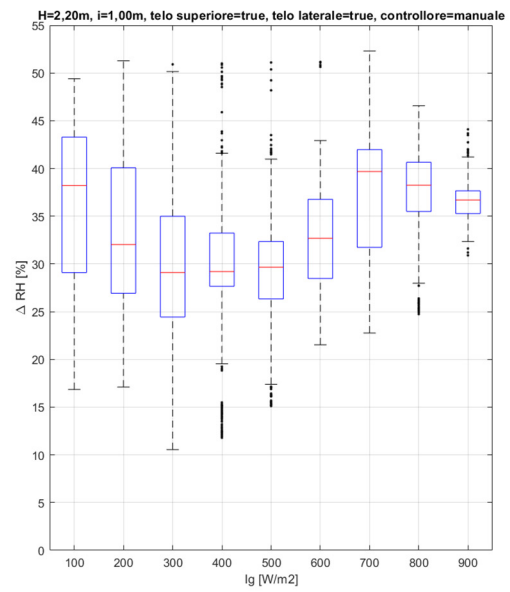
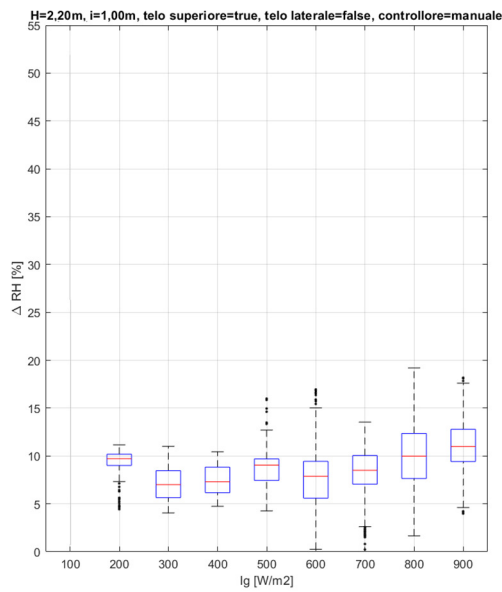


Fig. 138 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $Ig$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 4 vs Conf. 5)

Anche da queste immagini si vede come la configurazione con entrambi i teli porti ad un maggior innalzamento dell'umidità relativa. Contrariamente a quanto si vede nella pagina precedente i grafici sono opposti, quindi, a sinistra i dati si concentrano in basso, con un minore incremento di umidità, mentre a destra  $\Delta RH$  oscilla tra il +15 e il +50%. Si ha dunque esattamente ciò che è atteso: la schermatura ha come effetto quello di aumentare l'ombreggiamento e contenere la dispersione delle particelle, dunque l'effetto di raffrescamento è maggiore, come maggiore è la produzione di umidità relativa.



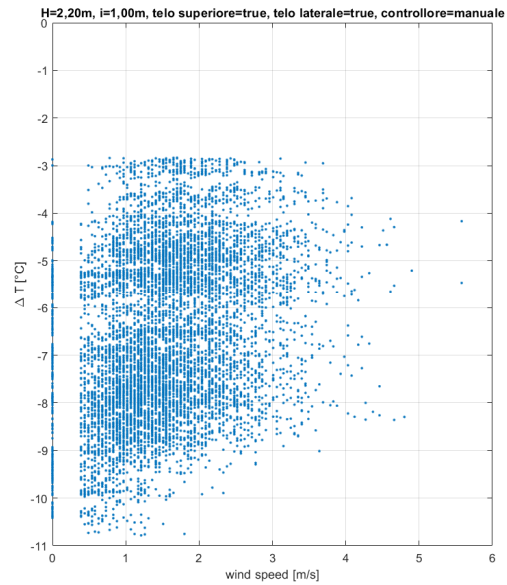
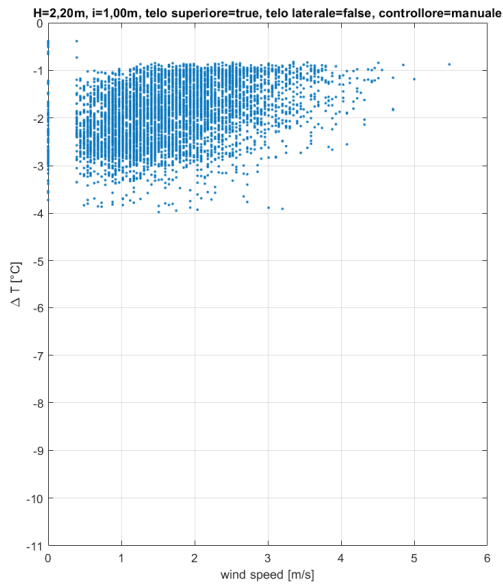


Fig. 139 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 4 vs Conf. 5)

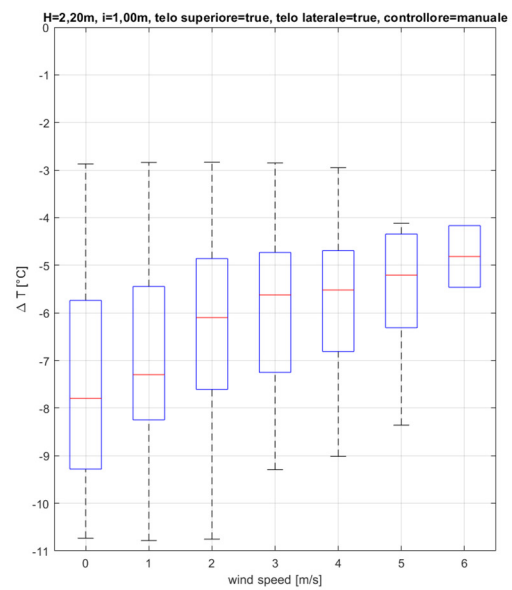
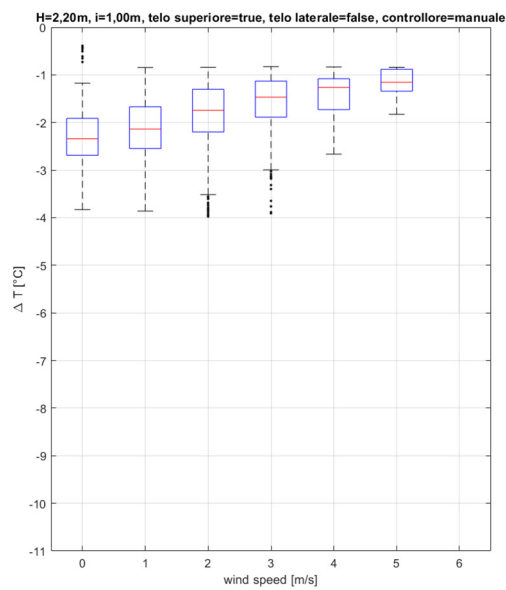


Fig. 140 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 4 vs Conf. 5)

La divisione tra le variazioni delle due configurazioni è netta anche in relazione alla velocità del vento. L'andamento dei grafici è crescente con l'aumentare del vento, poiché ad alti valori di  $ws$  i dati si disperdono e l'effetto di raffreddamento è meno evidente, la nuvola di nebbia, infatti, sarebbe trasportata via.

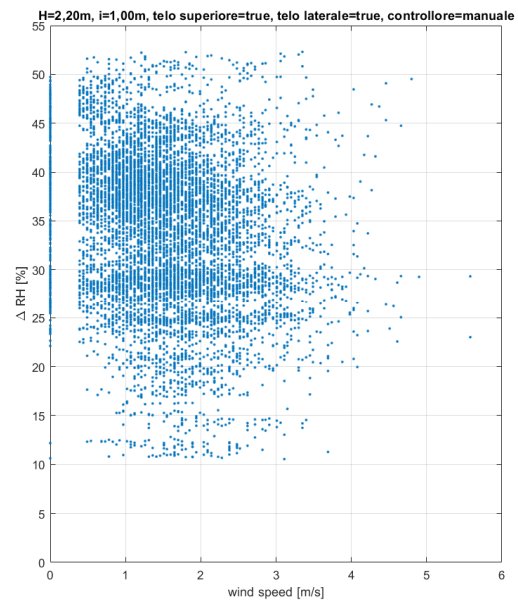
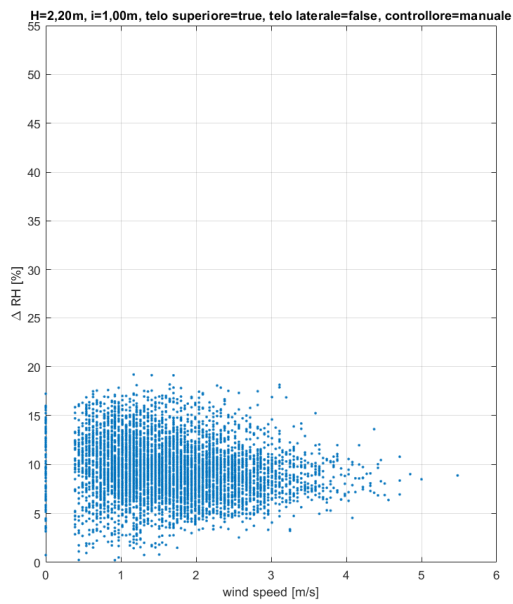


Fig. 141 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 4 vs Conf. 5)

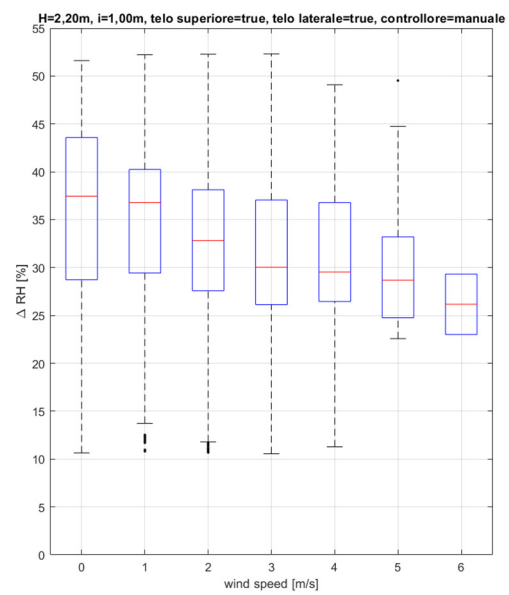
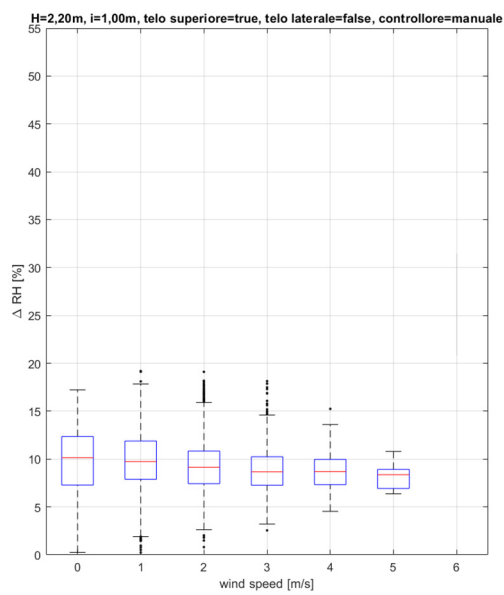


Fig. 142 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 4 vs Conf. 5)

In entrambi i casi si ha maggiore umidità per bassi valori di velocità del vento (0-3 m/s). Confrontando le due configurazioni, la *configurazione 4* rispetto alla *5* ha dei valori di  $\Delta RH$  minori; quindi, l'innalzamento di umidità relativa è minore: a sinistra non si arriva al 20%, mentre a destra si sfiora il +55%.

#### 4.1.5 Configurazioni in cui varia l'interasse degli ugelli

Le condizioni prese in considerazione prevedono la stessa configurazione in termini di altezza ugelli, teli di schermatura e controllore e variano soltanto per l'interasse degli ugelli. L'interasse degli ugelli poteva variare tra 0,80 m e 1,00 m.

In particolare, nelle immagini a sinistra rappresentative delle condizioni della *configurazione 3* mantenute nel periodo 11-15 luglio 2021 si hanno:

- $H = 2,60m$
- $i = 1,00m$
- Telo superiore = true
- Telo laterale = false
- Controllore = manuale

Nelle immagini a destra troviamo la *configurazione 7* (periodo: 30 luglio, 1-5 agosto, 10-11 agosto 2021) con:

- $H = 2,60m$
- $i = 0,80m$
- Telo superiore = true
- Telo laterale = false
- Controllore = manuale

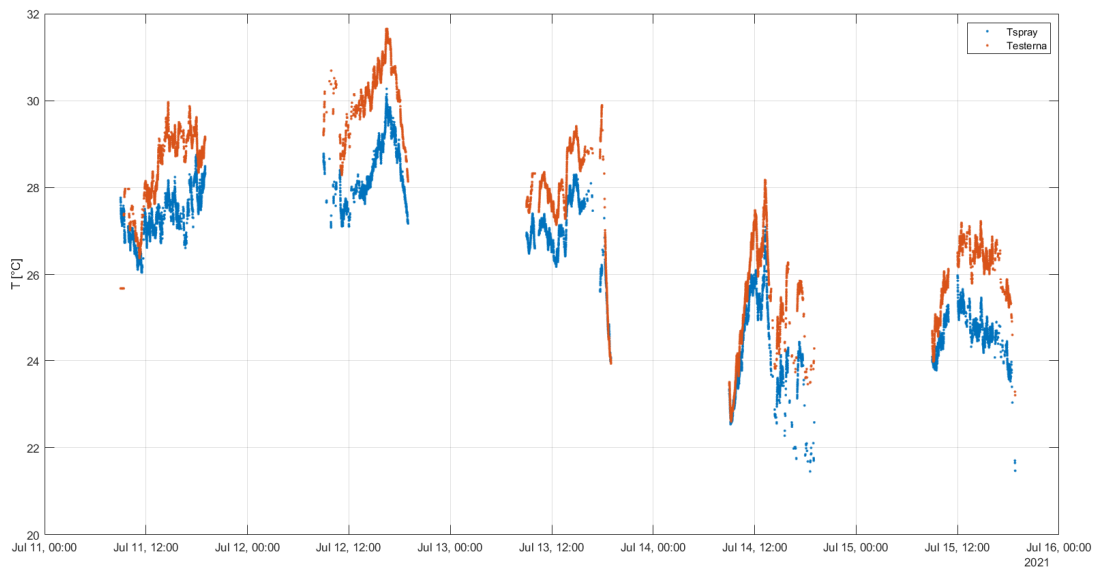


Fig. 143 – Rappresentazione andamento temperatura esterna e temperatura sistema spray (configurazione 3)

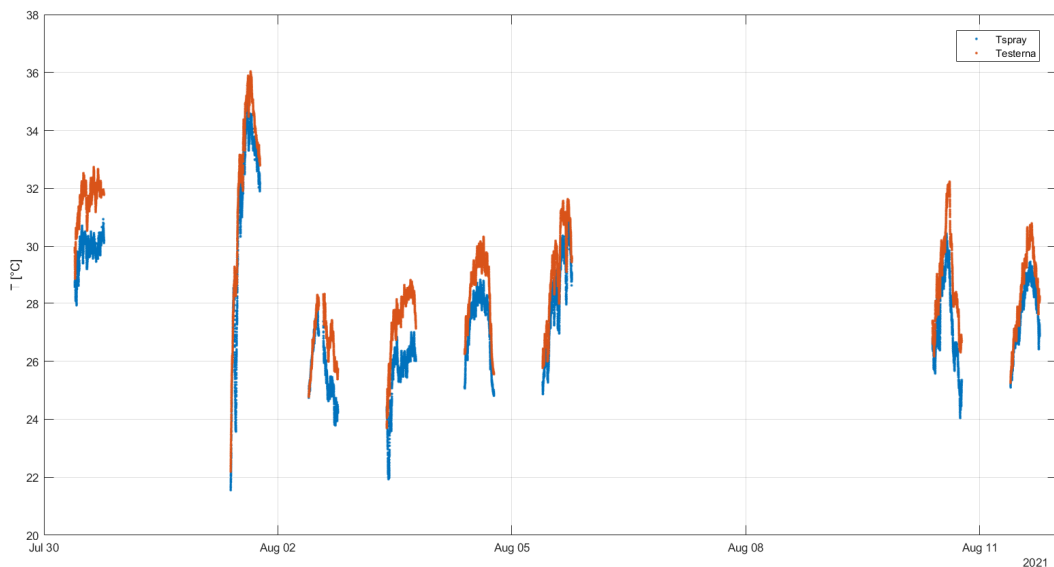


Fig. 144 – Rappresentazione andamento temperatura esterna e temperatura sistema spray (configurazione 7)

Questi ultimi due layout messi a confronto sono relativi di giorni diversi e distanti tra loro. La *configurazione 3* permane dall'11 al 15 luglio, mentre la 7 viene mantenuta per 8 giorni tra la fine di luglio e gli inizi di agosto. I punti azzurri sono sempre sotto quelli arancioni e questo significa che nel complesso il sistema è efficiente e sotto il sistema spray vi è un abbassamento della temperatura. Nella *configurazione 3* la temperatura dell'aria ambiente varia tra 22 e 32°C, mentre nell'ultimo layout progettuale la temperatura oscilla tra 22 e 35°C.

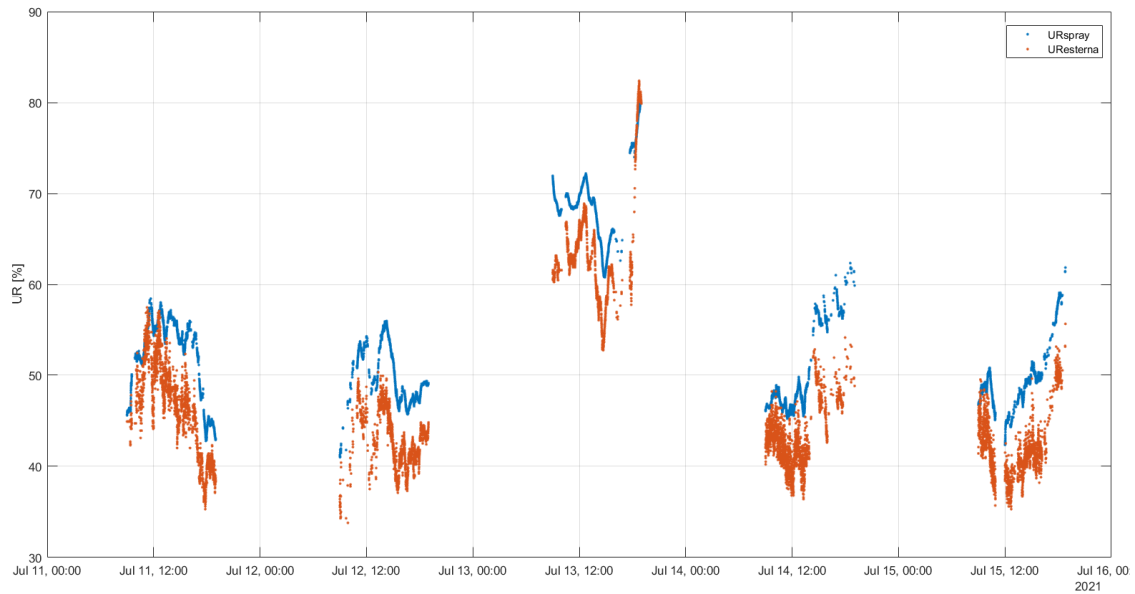


Fig. 145 – Rappresentazione andamento umidità relativa esterna e umidità relativa sistema spray (configurazione 3)

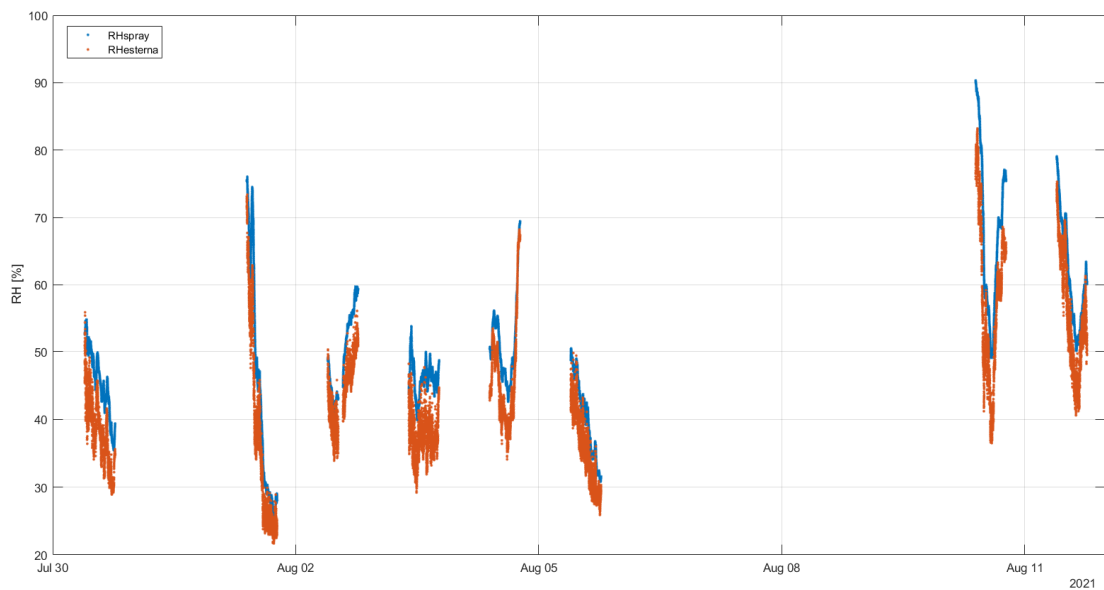


Fig. 146 – Rappresentazione andamento umidità relativa esterna e umidità relativa sistema spray (configurazione 8)

L'andamento dell'umidità relativa è diverso nelle due configurazioni, ma in entrambi i casi il valore massimo raggiunto è intorno all'80%. Nella configurazione 7 ci sono anche valori sotto il 30%, mentre nelle giornate centrali di luglio il minimo che si riscontra è intorno al 35%. Anche in questo caso l'umidità relativa prodotta dal sistema rappresentata con il colore azzurro è maggiore rispetto a quella misurata fuori dalla nebulizzazione, rappresentata con l'arancio.

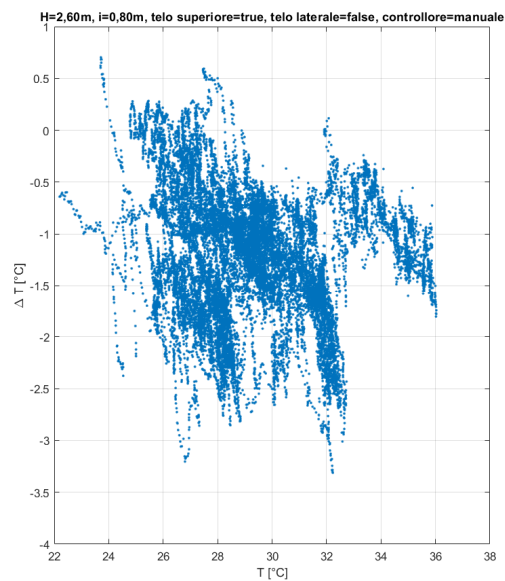
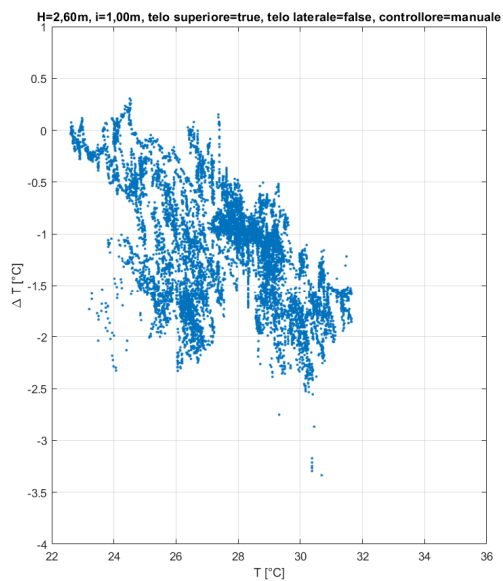


Fig. 147 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 3 vs Conf. 7)

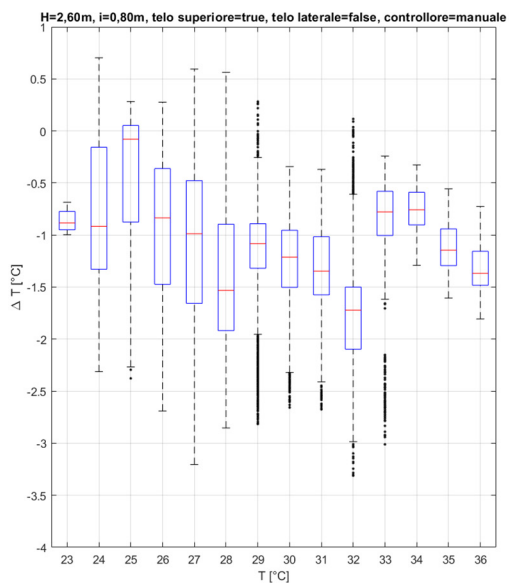
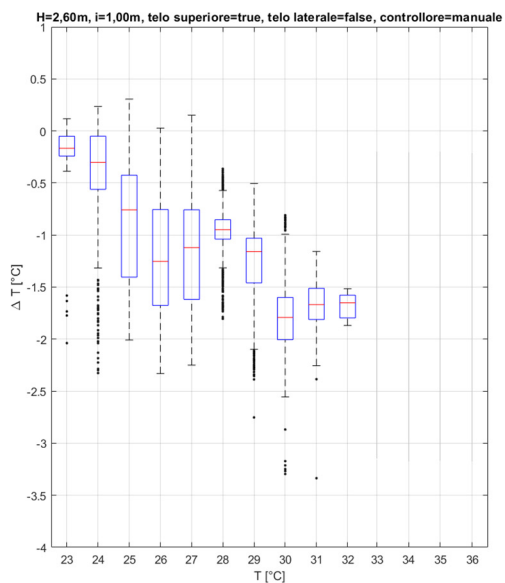


Fig. 148 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 3 vs Conf. 7)

Quest'ultima analisi vede relazionate due configurazioni in cui varia l'interasse degli ugelli. Non sono attese grandi differenze, infatti la nuvola di punti è localizzata indicativamente sullo stesso punto del grafico; anche se la *configurazione 7*, con interasse pari a 0,80 m, ha un maggior numero di dati, dovuta al fatto che quel tipo di layout dell'impianto è stato mantenuto per più giorni rispetto all'altro. I valori di  $\Delta T$  sono principalmente compresi tra 0 e  $-2^{\circ}\text{C}$ .

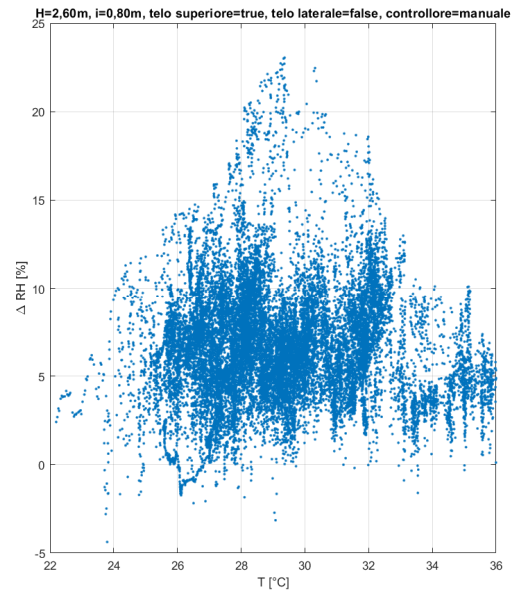
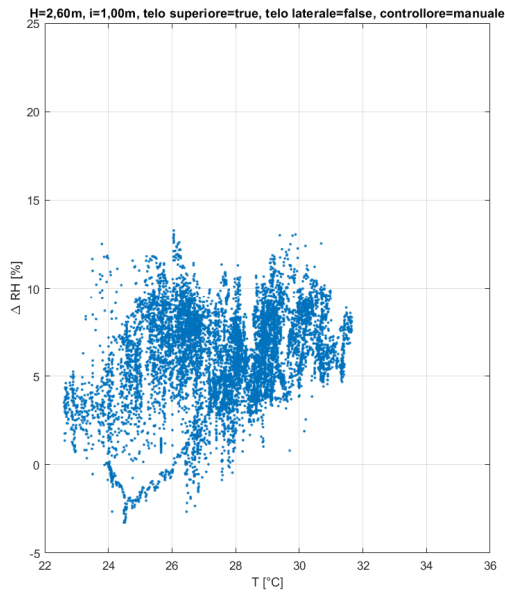


Fig. 149 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 3 vs Conf. 7)

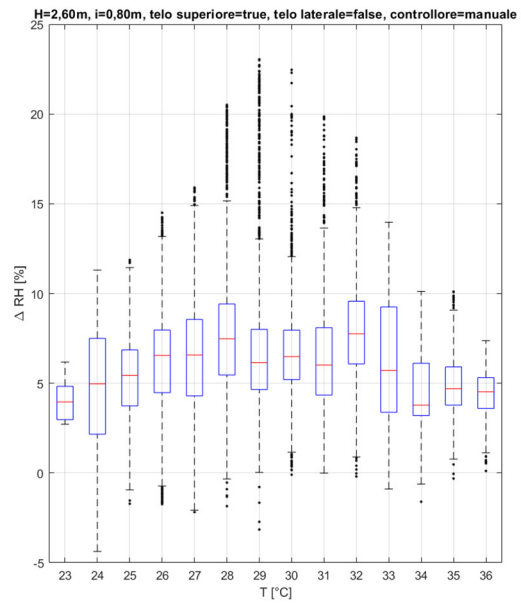
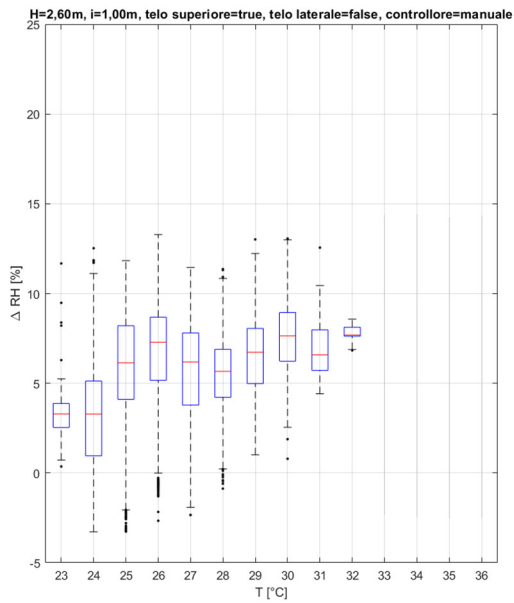


Fig. 150 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $T_a$  [°C] (Conf. 3 vs Conf. 7)

Anche per quanto riguarda  $\Delta RH$  le nuvole di punti e le scatole dei box plots sono posizionate nella stessa parte di grafico. Il range più occupato dai dati è quello compreso tra 0 e +10%. A destra si nota come il massimo incremento di RH sia raggiunto per Temperature dell'aria esterna pari a 29-30°C, dove si sfiora il 25% in più di umidità relativa.

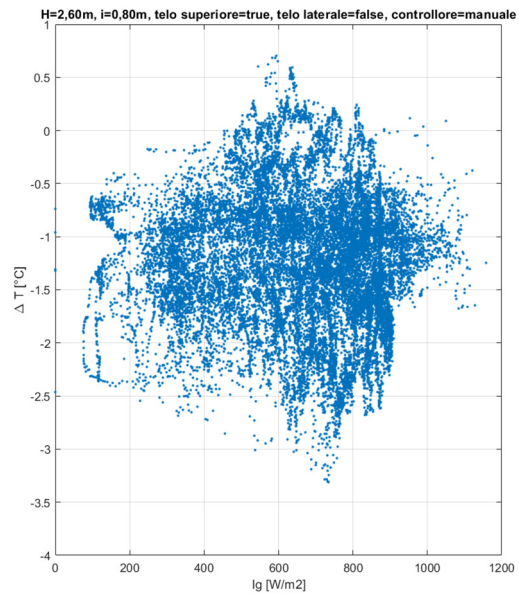
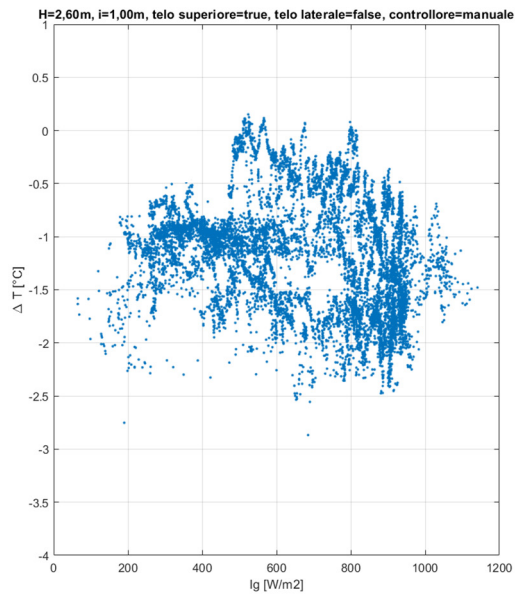


Fig. 151 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 3 vs Conf. 7)

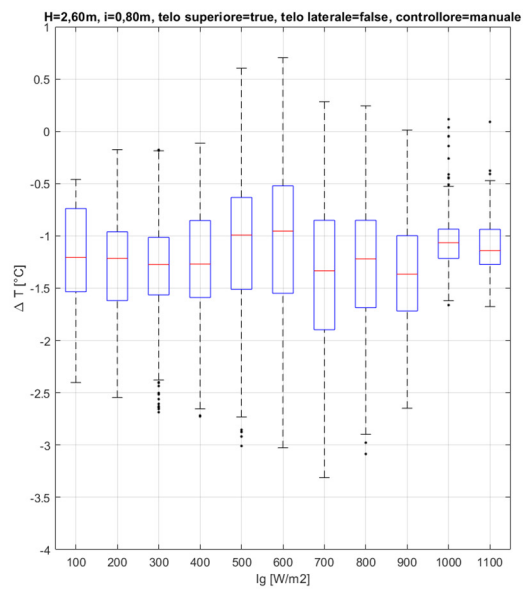
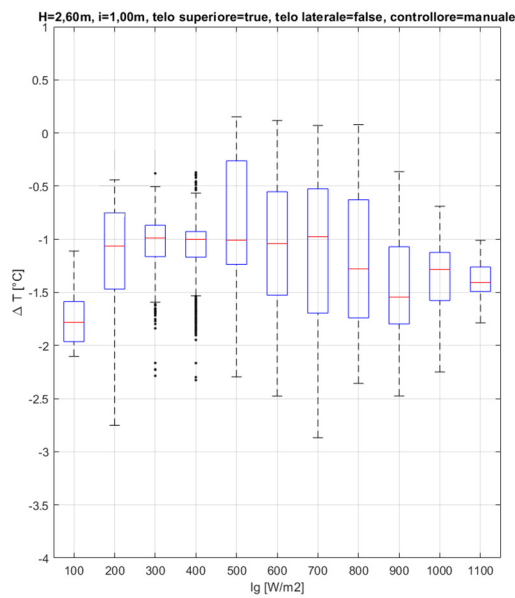


Fig. 152 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 3 vs Conf. 7)

In entrambi i casi non si nota un aumento di  $\Delta T$  al crescere della radiazione solare media, questo probabilmente per via del telo di schermatura posto superiormente all'impianto. Anche qui tra le due configurazioni non si evincono differenze sostanziali, l'effetto di raffreddamento è garantito con entrambi sia con gli ugelli distanti fra loro 1,00 m che con 0,80 m di distanza.



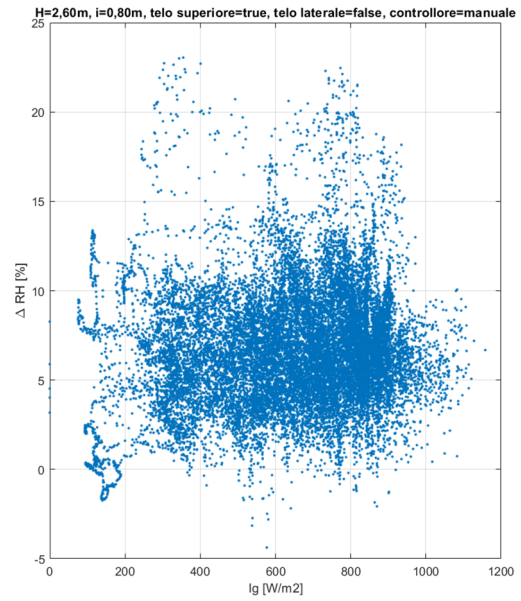
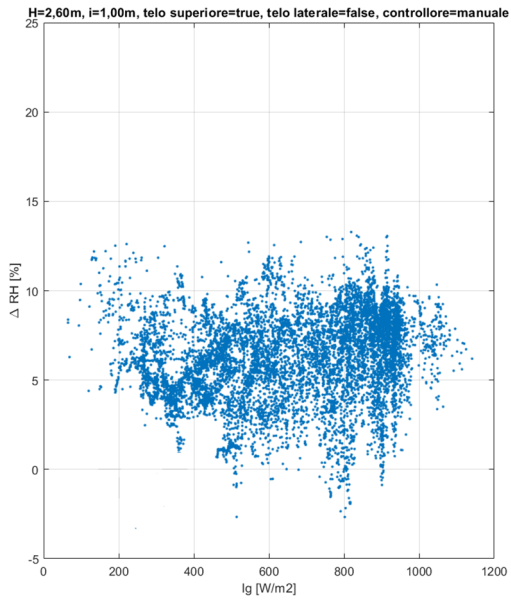


Fig. 153 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 3 vs Conf. 7)

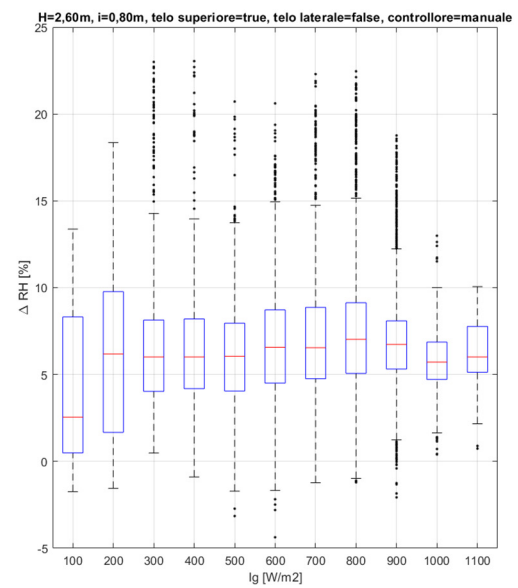
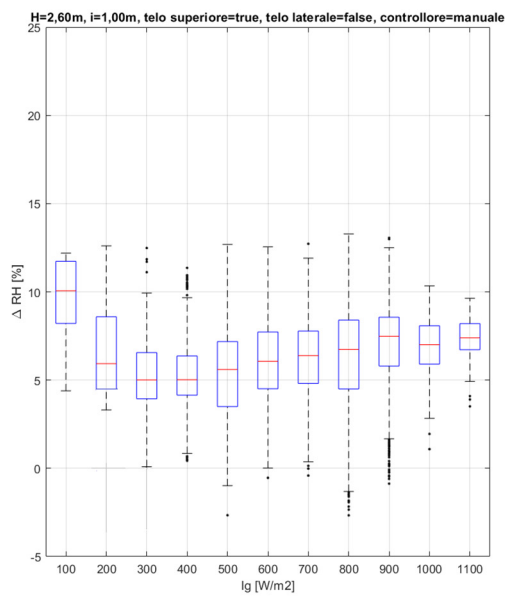


Fig. 154 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $I_g$  [ $W/m^2$ ] (Conf. 3 vs Conf. 7)

La *configurazione 7* presenta un maggiore incremento di umidità relativa, ma le scatole dei box plots, di entrambe le immagini, sono quasi tutte comprese tra 5 e 10%. Ciò sta ad indicare come la variazione di interassi tra gli ugelli non influenzi l'incremento di RH.

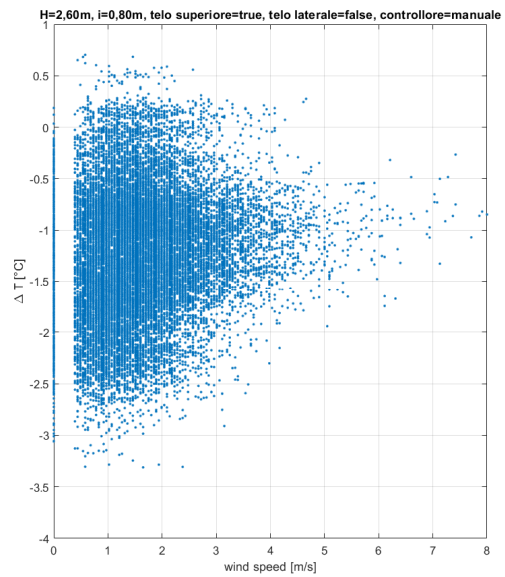
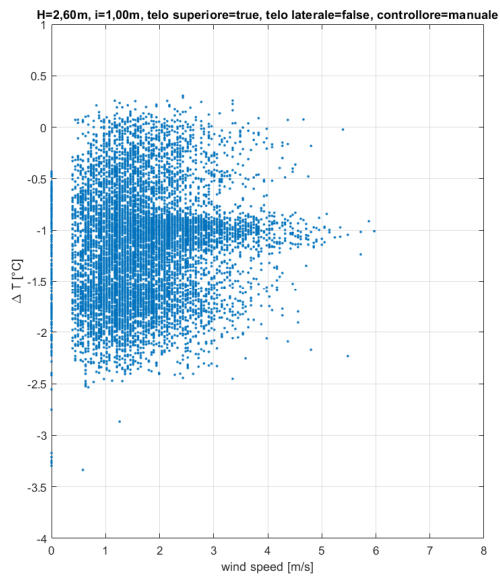


Fig. 155 – Grafici a dispersione di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 3 vs Conf. 7)

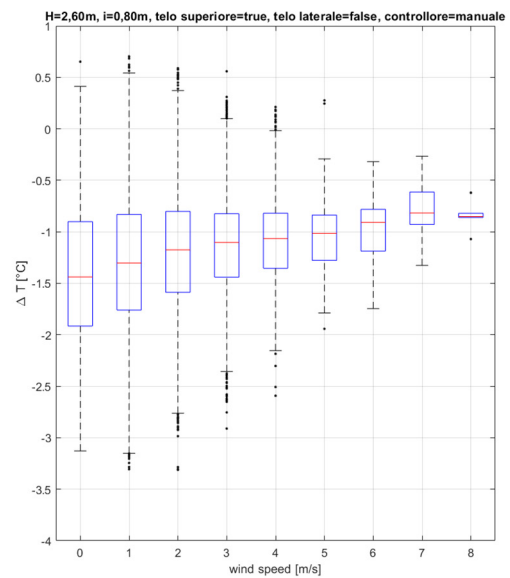
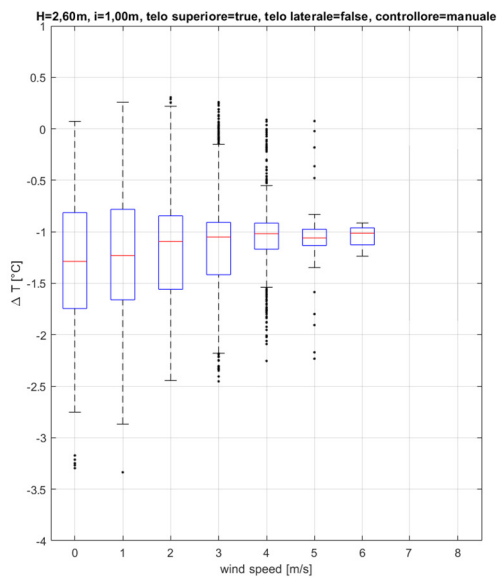


Fig. 156 – Box plots di  $\Delta T$  [°C] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 3 vs Conf. 7)

Come per le altre configurazioni, questi grafici che relazionano la variazione di temperatura alla velocità del vento, mostrano che al crescere di  $ws$  la nuvola di punti si disperde e quindi i  $\Delta T$  maggiori si hanno per 0-2 m/s di vento. Le giornate della *configurazione 7* sono state globalmente più ventose, con anche 8 m/s di  $ws$ .

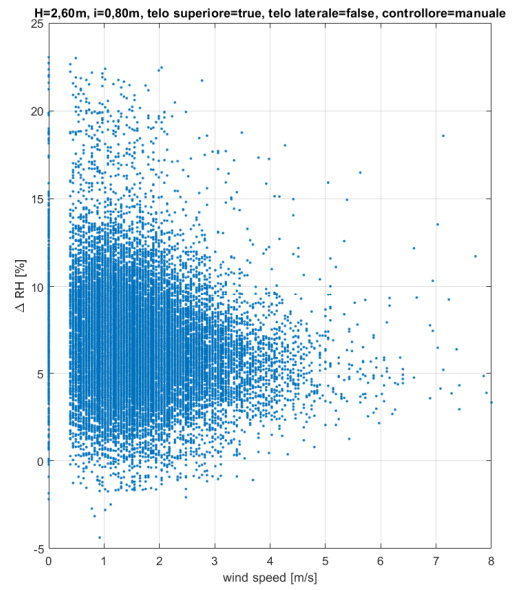
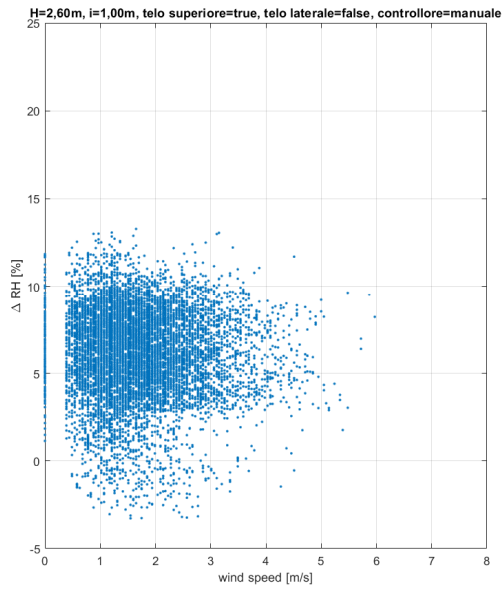


Fig. 157 – Grafici a dispersione di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 3 vs Conf. 7)

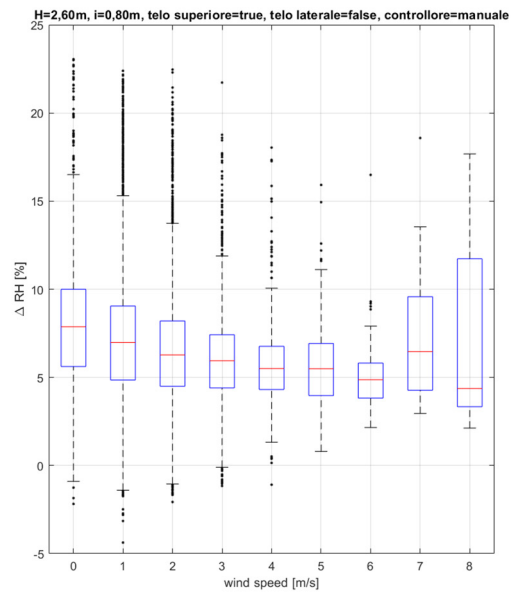
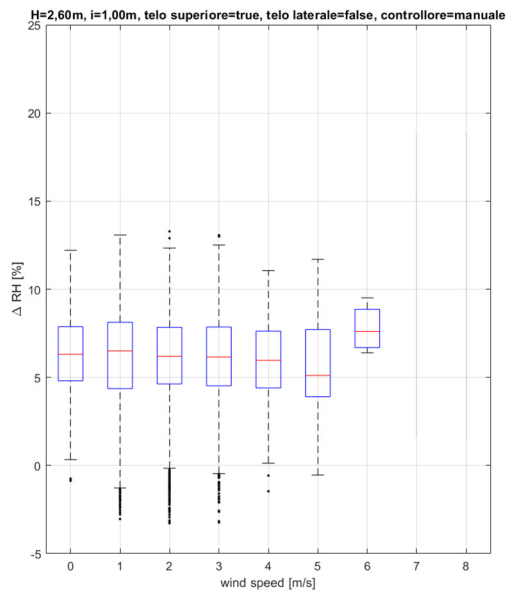


Fig. 158 – Box plots di  $\Delta RH$  [%] in funzione di  $ws$  [m/s] (Conf. 3 vs Conf. 7)

I box plots mostrano come la variazione di umidità sia maggiore nella configurazione 7, con outliers che sfiorano il 25%. Il maggior incremento di RH si ha per basse velocità del vento, perché all'aumentare di  $ws$  poi le particelle si disperdono.

## 4.2 Analisi dei dati climatici nei giorni dei questionari

La sperimentazione con compilazione di questionari sul comfort da parte degli utenti si è svolta nei giorni 21, 22 e 23 luglio. Facendo riferimento alle configurazioni trattate finora, si ha a che fare con la *configurazione 4*, per la quale si hanno:

- $H = 2,20\text{m}$
- $i = 1,00\text{m}$
- Telo superiore = true
- Telo laterale = false
- Controllore = manuale

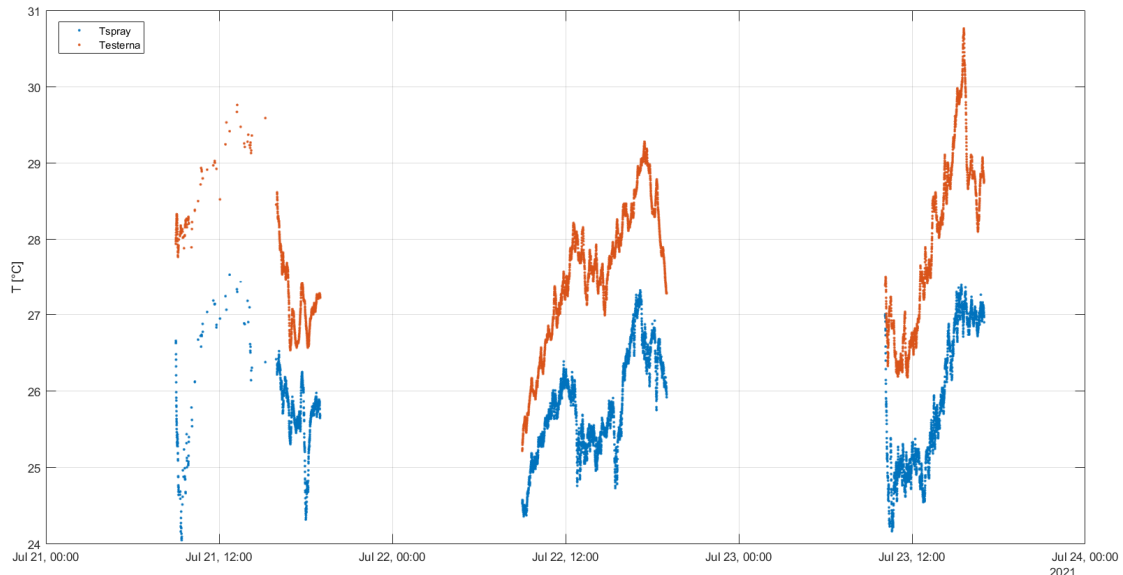
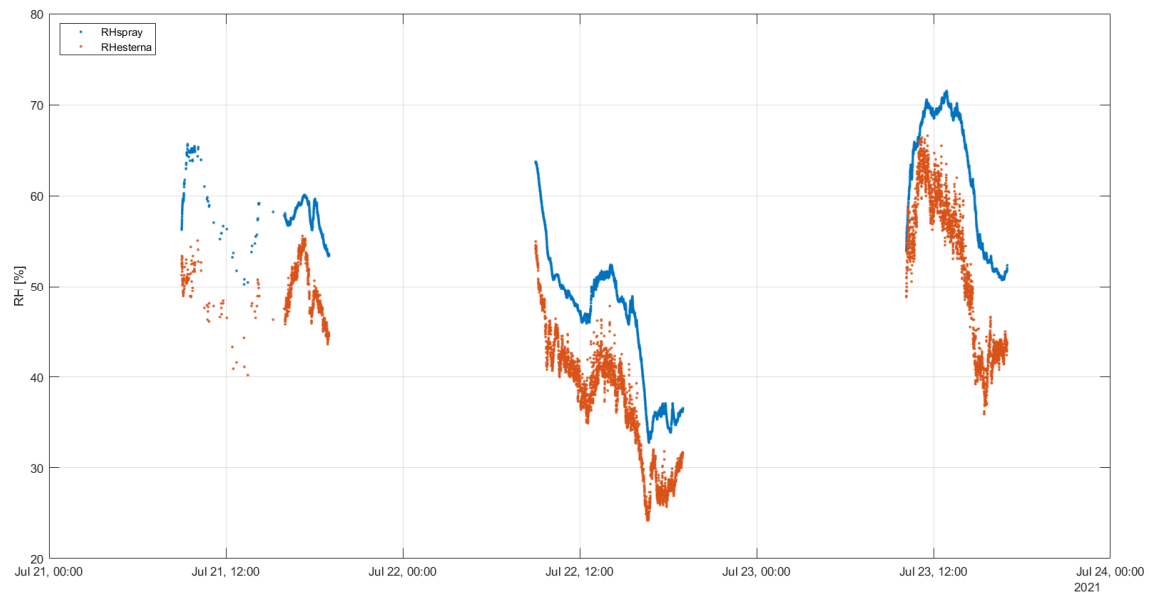


Fig. 159 – Andamento delle temperature durante i giorni di sperimentazione

In questa immagine vengono mostrati gli andamenti delle temperature durante la sperimentazione. I puntini arancioni raffigurano la Temperatura dell'aria esterna  $T_a$ , mentre i punti blu indicano la Temperatura rilevata sotto il sistema spray. Come si può notare, la giornata che ha raggiunto la massima temperatura è l'ultima, il 23 luglio, mentre nella prima giornata si hanno pochi valori, per un errore di salvataggio dei dati del sistema. In tutti e tre i giorni il sistema risulta efficiente dal punto di vista del raffrescamento, in quanto sotto lo spray le temperature rilevate sono inferiori a  $T_a$ . La minima temperatura riscontrata è di poco più di  $25^\circ\text{C}$  (22 luglio).



*Fig. 160* – Andamento dell'umidità relativa durante i giorni di sperimentazione

Lo stesso tipo di grafico viene riprodotto per quanto riguarda l'umidità relativa: con il colore arancione si fa sempre riferimento alle condizioni indisturbate, mentre il blu indica le rilevazioni dei sensori sotto il sistema spray. Anche in questo caso viene verificato quanto atteso, ovvero che il sistema water mist, immettendo acqua nebulizzata nell'ambiente, va ad aumentare l'umidità relativa presente. La giornata più umida è il 23 luglio, corrispondente alla giornata più calda.

In generale, essendo il sistema trattato un sistema di mitigazione dell'isola di calore urbano, si può dire che le condizioni climatiche siano non troppo favorevoli alla condizione di UHI, in quanto nei tre giorni viene registrata una temperatura minima superiore a 25°C. Se si considera però che questi due schemi sono rappresentativi della fascia oraria 9:30-18:30, mentre i questionari sono stati fatti tra le ore 10:00 e le ore 17:00 delle tre giornate, la temperatura non è mai sotto i 26°C.

Attraverso l'uso di box plot, si procede con la restituzione di:

- differenza di temperatura  $\Delta T$  [°C] (tra ambiente e sistema spray);
- differenza di umidità  $\Delta RH$  [%] (tra ambiente e sistema spray);
- velocità del vento  $WS$  [m/s] (misurata dalla centralina meteo vicino al sistema).

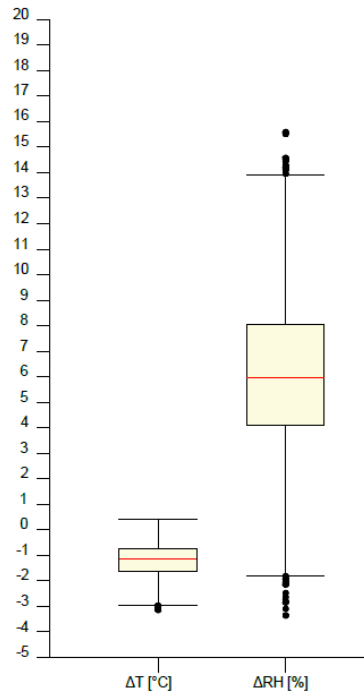


Fig. 161 – Box plots rappresentativi della variazione di Temperatura e di Umidità relativa

Attraverso questo grafico è possibile quantificare numericamente la variazione di temperatura e di umidità relativa tra ambiente spray e ambiente naturale durante i tre giorni di sperimentazione. La variazione di temperatura media è di circa 1°C, ma si arriva anche a differenze di temperatura di oltre 3°C. L'umidità cresce anche oltre il 10%, con outliers che sfiorano il 16%.

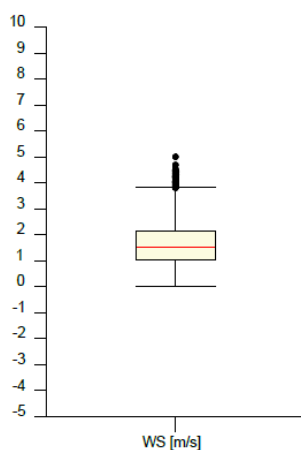


Fig. 162 – Box plots rappresentativo della velocità del vento

La velocità del vento varia tra 0 e 5 m/s nei tre giorni considerati, con una media di 1,63 m/s. La maggior parte dei dati è compresa tra 1 e 2 m/s.

### 4.3 Analisi dei dati personali dei questionari

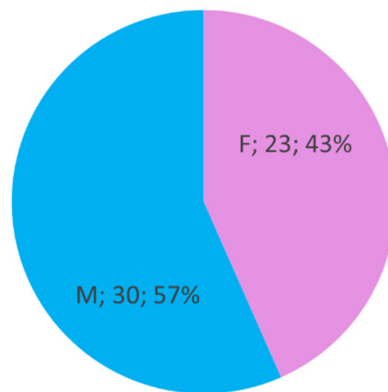
In questo paragrafo si vanno a mostrare le caratteristiche dei soggetti che hanno preso parte alla sperimentazione e hanno compilato il questionario di valutazione del comfort. Quest'ultimo prevedeva una prima parte in cui sono state formulate domande personali.

Sono state chieste agli utenti informazioni relative a:

- Genere;
- Stato di gravidanza;
- Altezza;
- Peso;
- Et ;
- Stato di Salute;
- Attivit  svolta fino a 30 minuti prima del test;
- Abbigliamento;
- Tempo speso all'aria aperta.

Di seguito si mostrano i risultati ottenuti per ciascun campo di interesse.

#### 4.3.1 Genere



*Fig. 163* – Rappresentazione con diagramma a torta del genere delle persone sottoposte al test

I soggetti che hanno preso parte alla sperimentazione sono in totale 53, suddivisi in 30 maschi e 23 femmine. In percentuale si hanno il 57% di uomini contro il 43% di donne. Quindi il numero dei soggetti di sesso maschile   super di 7 quello dei soggetti femminili.

### 4.3.2 Gravidanza

Nessun soggetto risulta essere in stato interessante.

### 4.3.3 Altezza

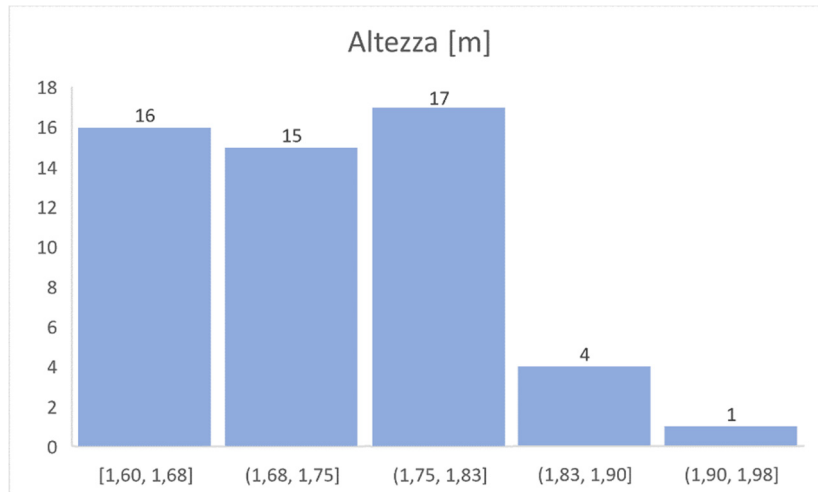


Fig. 164 – Rappresentazione con istogramma dell'altezza delle persone sottoposte al test

L'altezza minima riscontrata è di 1,60 m, mentre la persona più alta risulta essere 1,98 m; la media di tutti i 53 valori è di 1,74m. Osservando il grafico si nota come 31 persone (il 58,5%) risultino al di sotto di questa altezza. La maggior parte degli utenti è alta tra 1,60 e 1,74 m.



### 4.3.4 Peso

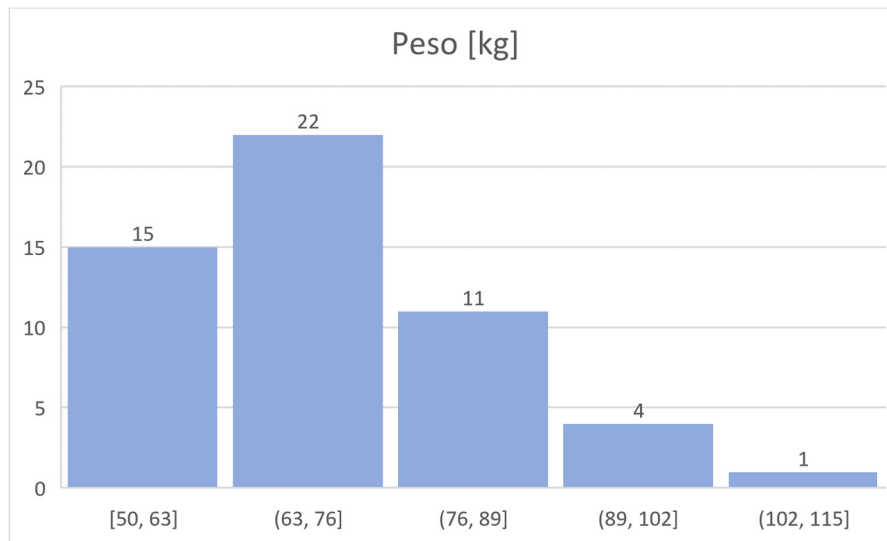


Fig. 165 – Rappresentazione con istogramma del peso delle persone sottoposte al test

Il range di peso delle persone che hanno preso parte alla sperimentazione varia tra 50 e 115 kg. Il peso medio calcolato sui 53 campioni risulta essere di 71,5 kg, più della metà dei soggetti è sotto questo peso.

Convertendo i dati in BMI si ottiene:

- 1 persona sottopeso ( $BMI < 18,5$ )  $\rightarrow$  1,88%
- 39 persone normopeso ( $18,5 < BMI < 25$ )  $\rightarrow$  73,58%
- 13 persone sovrappeso ( $BMI > 25$ )  $\rightarrow$  24,53%

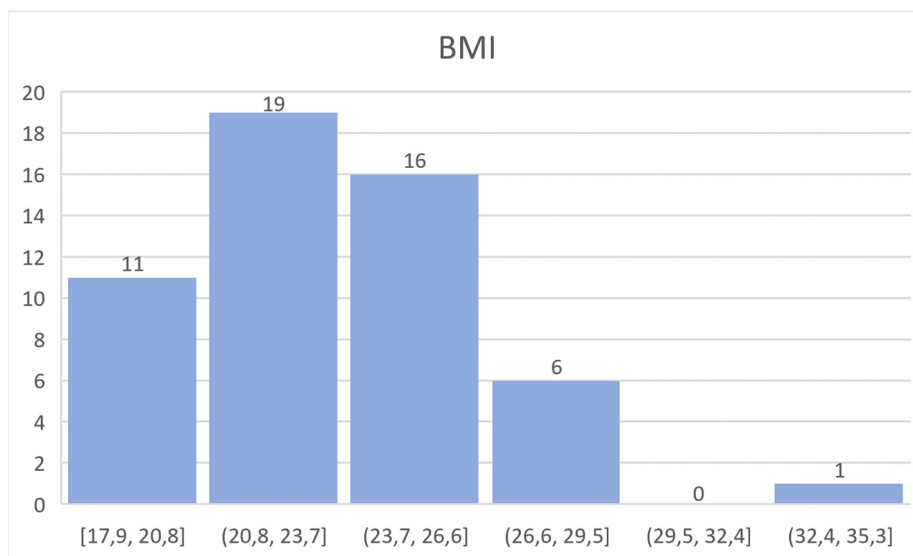


Fig. 166 – Rappresentazione con istogramma BMI delle persone sottoposte al test

#### 4.3.5 Età

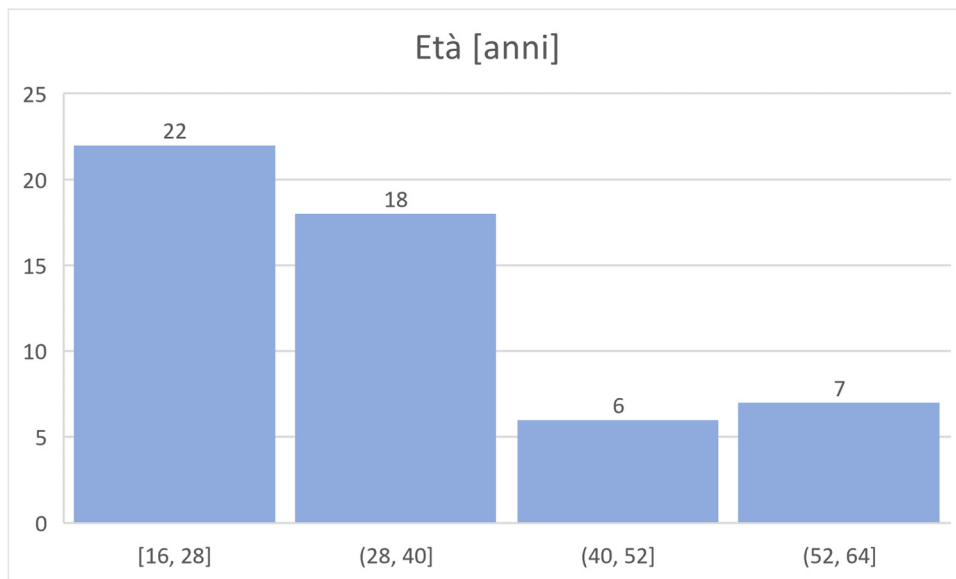


Fig. 167 – Rappresentazione con istogramma dell'età delle persone sottoposte al test

Dei 53 soggetti totali, 40 partecipanti alla sperimentazione hanno meno di 40 anni (75,47%). La sperimentazione ha visto la partecipazione di individui relativamente giovani. Questo è probabilmente influenzato dal fatto che l'apparato sperimentale era situato nei pressi dell'Università Politecnica delle Marche, dove è facile trovare persone giovani.

#### 4.3.6 Stato di salute

Nessuno dei partecipanti ha segnalato disturbi al proprio stato di salute.

#### 4.3.7 Attività

La domanda posta all'interno del questionario chiedeva al soggetto interessato che tipo di attività avesse svolto fino a 30 minuti prima del test sperimentale. Le risposte proposte erano: fermo (in piedi), fermo (seduto), camminando, giocando o altro. Successivamente le risposte sono state convertite in *met*, unità di misura del consumo di energia da parte dell'organismo.

Nei 53 questionari sono stati indicati 3 tipi di attività:

- Fermo (seduto) = 1 met
- Fermo (in piedi) = 1,2 met
- Camminando = 1,9 met

La maggior parte dei soggetti stava ferma (seduta): 36 persone = 67,92%

9 persone ferme (in piedi): 16,98%

8 persone stavano camminando: 15,10%

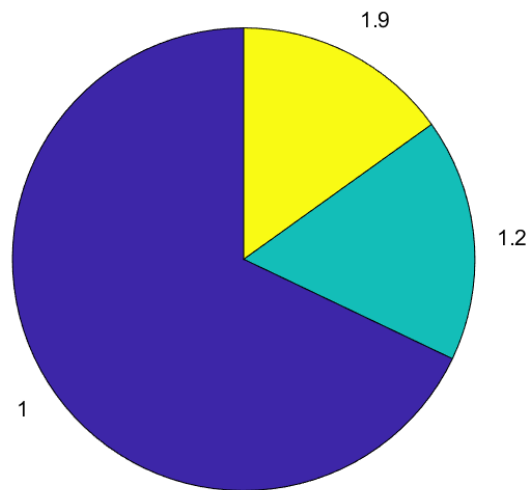


Fig. 168 – Rappresentazione con diagramma a torta dell'attività svolta dalle persone prima del test

#### 4.3.8 Abbigliamento

Il tipo di vestiario indossato da ogni soggetto risulta essere interessante per la valutazione del comfort; pertanto, si è disposta una domanda specifica su quali tipi di capi portava ciascun soggetto. Anche in questo caso poi si è convertita la tipologia di indumenti con un'unità di misura adeguata: i CLO, che esprimono la resistenza termica dell'abbigliamento. La domanda prevedeva di poter scegliere tra alcuni tipi di vestiti: t-shirt manica corta, t-shirt manica lunga, gonna o pantaloni corti, gonna o pantaloni lunghi, canottiera, giacca o altro.

Si riportano alcuni indumenti e il loro rispettivo valore in clo:

- Mutande (considerate per tutti): 0,04 clo
- T-shirt manica corta: 0,09 clo
- T-shirt manica lunga: 0,25 clo
- Pantaloni corti: 0,11 clo
- Pantaloni lunghi: 0,25 clo
- Vestito corto senza maniche: 0,25 clo

Per calcolare i clo globali relativi a ciascun soggetto è stata fatta la somma degli indumenti indossati, esclusi calzini e scarpe.

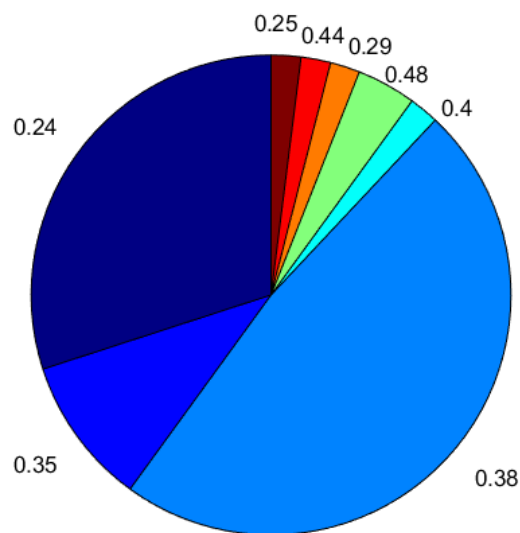


Fig. 169 – Rappresentazione con diagramma a torta dell'abbigliamento delle persone sottoposte al test

In particolare, notiamo come quasi la metà del grafico sia occupata da persone con 0,38 clo di vestiti addosso, questi corrispondono a pantaloni lunghi (0,25 clo) + t-shirt manica corta (0,09 clo) + slip (0,04 clo): tipico abbigliamento estivo universitario. Globalmente si ha:

- 15 persone = 0.24 clo
- 5 persone = 0.35 clo
- 25 persone = 0.38 clo
- 1 persona = 0.4 clo
- 2 persone = 0.48 clo
- 1 persona = 0.29 clo

- 1 persona = 0.44 clo
- 1 persona = 0.25 clo
- 2 persone = 0.21 clo

In conclusione, tra 0.24 e 0.38 clo è compreso l'88,68% dei campioni.

#### 4.3.9 Tempo speso all'aria aperta

L'ultima domanda di carattere personale ha chiesto agli utenti quanto tempo trascorressero all'aria aperta durante questa stagione. Le possibilità di risposta erano: raramente, 1 o 2 volte a settimana, 1 volta al giorno, 2 volte al giorno o altro.

Al fine di creare un grafico che traducesse queste risposte, è stato assegnato un valore numerico a ciascuna risposta, in ordine crescente con l'aumentare del tempo speso all'aria aperta:

- 0 = raramente;
- 1 = 1 o 2 volte a settimana;
- 2 = 1 volta al giorno;
- 3 = 2 volte al giorno;
- 4 = altro (nel nostro caso tutti gli utenti hanno espresso un numero maggiore di due volte al giorno).

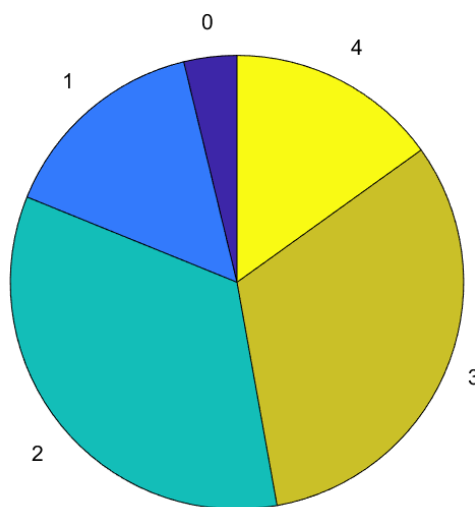


Fig. 170 – Rappresentazione con diagramma a torta del tempo speso all'aria aperta dalle persone sottoposte al test

Il grafico mostra come la maggior parte dei soggetti (66%) stia all'aperto 1 o 2 volte al giorno, in particolare 18 persone hanno risposto "2", e 17 hanno selezionato "3". Raramente è stato opzionato solo da 2 persone, mentre 8 soggetti hanno risposto che escono 1 o 2 volte a settimana mentre altri 8 escono più di 2 volte al giorno.

#### 4.4 Analisi globale dei risultati dei questionari

La seconda e la terza parte del questionario erano tutte relative alle valutazioni di comfort dell'individuo. La seconda parte riguardava l'ambiente naturale, dove si richiedeva di sostare seduti sotto un gazebo per 9 minuti, la terza parte riproponeva le stesse domande nella zona spray, dove veniva ripetuta la stessa condizione: seduti sotto un telo ombreggiante con in più il sistema water mist.

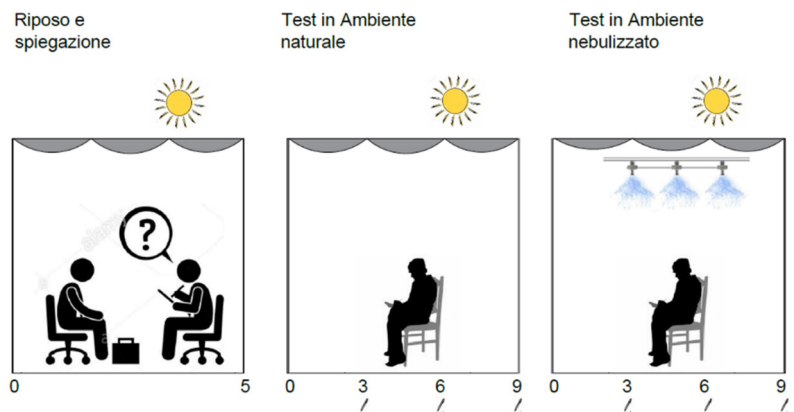


Fig. 171 – Diagramma esplicativo sperimentazione

In particolare, si è chiesto di valutare il comfort in termini di sensazione termica, sudore, umidità e comfort globale.

- Sensazione termica *TSV*: scala ASHRAE 7 punti (-3 Freddo; -2 Fresco; -1 Leggermente fresco; 0 Neutro; +1 Leggermente caldo; +2 Caldo; +3 Molto caldo);
- Sensazione di sudore: scala ASHRAE 4 punti (-3 Molto, -2 Abbastanza, -1 Leggermente; 0 no);
- Sensazione relativa all'umidità: scala ASHRAE 4 punti, poi ne è stato aggiunto uno per valutare l'effetto bagnatura (-4 Effetto bagnato; -3 Molto umido; -2 Umido; -1 Leggermente umido; 0 Non umido);

- Sensazione di Comfort *CSV*: scala 7 punti ASHRAE (-3 Molto sgradevole; -2 Sgradevole; -1 Leggermente sgradevole; 0 Neutro; +1 Leggermente confortevole; +2 Confortevole; +3 Molto confortevole).

Sotto il sistema spray le domande venivano ripetute, così si è potuto fare un confronto tra ambiente naturale e ambiente con sistema water mist. Inoltre, viene aggiunta una domanda che mira a valutare la soddisfazione globale dell'utente nei confronti del sistema.

- Soddisfazione: scala AHSRAE 5 punti (-2 Non soddisfacente; -1 Leggermente soddisfacente; 0 Neutro; +1 Abbastanza soddisfacente; +2 Soddisfacente).

Per prima cosa sono state osservate le risposte globali differenziate per ambiente naturale indisturbato e ambiente spray.

#### 4.4.1 TVS

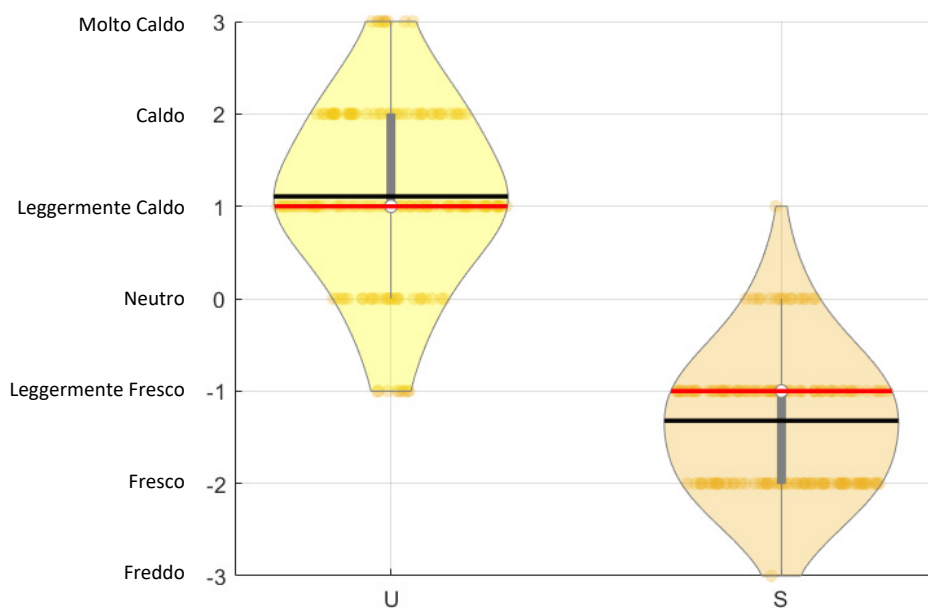


Fig. 172 – Box plots rappresentativi dei voti di sensazione termica

Il primo punto analizzato è relativo ai voti di sensazione termica, TSV (Thermal Sensation Vote). Si è deciso di rappresentare i dati attraverso l'uso di box plots a violino, così da

avere una più facile comprensione della distribuzione dei dati. La forma del box plot si allarga a seconda della quantità di voti, assumendo appunto la forma a “violino”. Con la lettera *U* si indicano i voti dell’ambiente indisturbato (undisturbed), il box plot a destra, relativo alla lettera *S*, è indicativo dei voti espressi sotto l’ambiente spray.

Da questo primo grafico il sistema risulta efficiente in termini di comfort termico, in quanto si passa da una sensazione di calore a una di fresco. Il box plot delle risposte date in ambiente naturale è tutto spostato verso i valori positivi, e arriva alla sensazione di “+3, Molto caldo”. Il box plot della zona spray invece è tutto verso valori negativi, la scatola (linea verticale grigia) oscilla tra “-1, leggermente fresco” (valore mediano) e “-2, fresco”, ma i baffi arrivano anche a “-3, freddo”. Valutando il comfort si dovrebbe pensare che per dichiarare efficiente il sistema, le risposte dei questionari sotto la zona spray dovevano essere intorno al valore “0, neutro”; tuttavia, essendo gli individui sottoposti al test in giornate estive molto calde, percepiscono il fresco come una situazione confortevole.

#### 4.4.2 Sudore

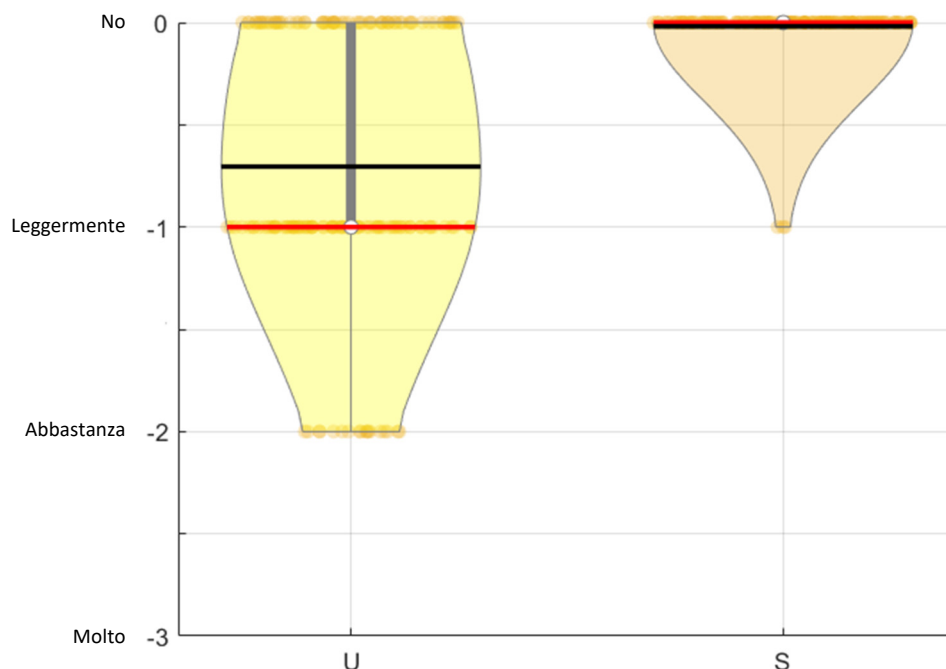


Fig. 173 – Box plots rappresentativi dei voti della sensazione di sudore



La seconda domanda chiedeva ai soggetti se durante il test questi stavano sudando. Da questo grafico è chiaro come la sensazione di sudore sia stata maggiormente percepita in ambiente naturale, dove la mediana (linea rossa) dei voti si posa su “-1, leggermente”. Alcuni utenti, di minor numero rispetto ai voti 0 e -1, scrivono che stanno sudando “-2, abbastanza”. Sotto lo spray invece il grafico è tutto concentrato sul “0, no”; dunque, risulta che gli utenti sotto il sistema water mist non hanno sudato, se non 3 soggetti che hanno espresso una leggera sensazione di sudore.

#### 4.4.3 Umidità

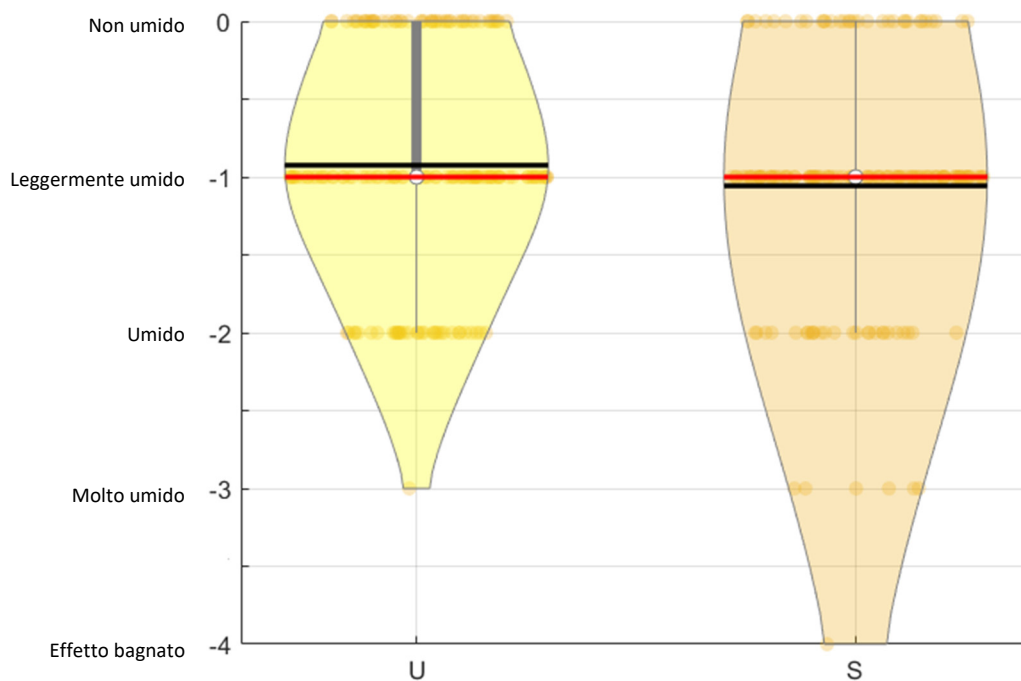


Fig. 174 – Box plots rappresentativi dei voti della sensazione di umidità

La valutazione relativa alla sensazione di umidità prevedeva cinque possibilità di risposta, in una scala che progrediva da “0, non umido” a “-4, effetto bagnato”. È possibile subito notare che il valore mediano (linea rossa) si trovi nel voto “-1, leggermente umido” in entrambe le condizioni, sia per quanto riguarda l’ambiente naturale che l’ambiente water mist. La sensazione di umidità, come ci mostra il grafico, aumenta con il sistema spray,

che vede alcuni soggetti esporre anche il giudizio di “-4, effetto bagnato”. Il violino a destra si allarga maggiormente rispetto a sinistra anche nei voti -2 e -3.

#### 4.4.4 CVS

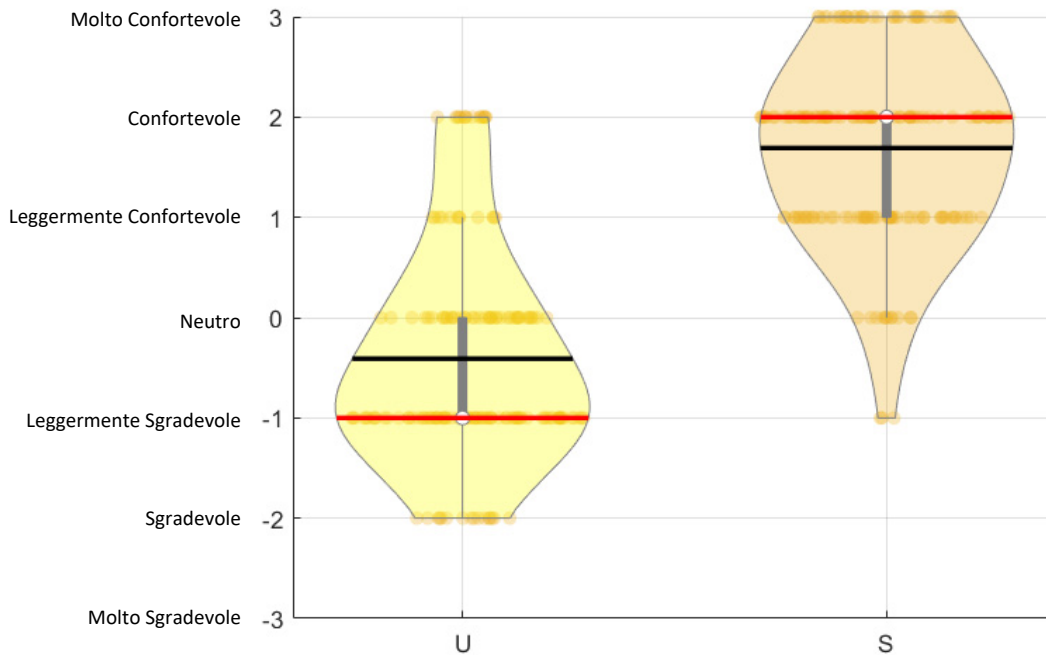


Fig. 175 – Box plots rappresentativi dei voti della sensazione di comfort

Attraverso questi box plots si può notare come l'ambiente spray sia risultato più confortevole rispetto all'ambiente naturale. È necessario riprendere la considerazione precedente secondo cui la sensazione “fresco” è stata considerata come una condizione di comfort, e questo grafico lo conferma, in quanto il violino relativo alla zona spray è quasi tutto in corrispondenza di voti confortevoli. Il valore mediano passa da “-1, leggermente sgradevole” in ambiente naturale a “+2, confortevole” sotto il sistema water mist. Sotto il gazebo esterno ci sono stati anche voti “-2, sgradevoli”, mentre la sensazione sotto lo spray per alcuni soggetti è “+3, molto confortevole”.

#### 4.4.5 Soddisfazione

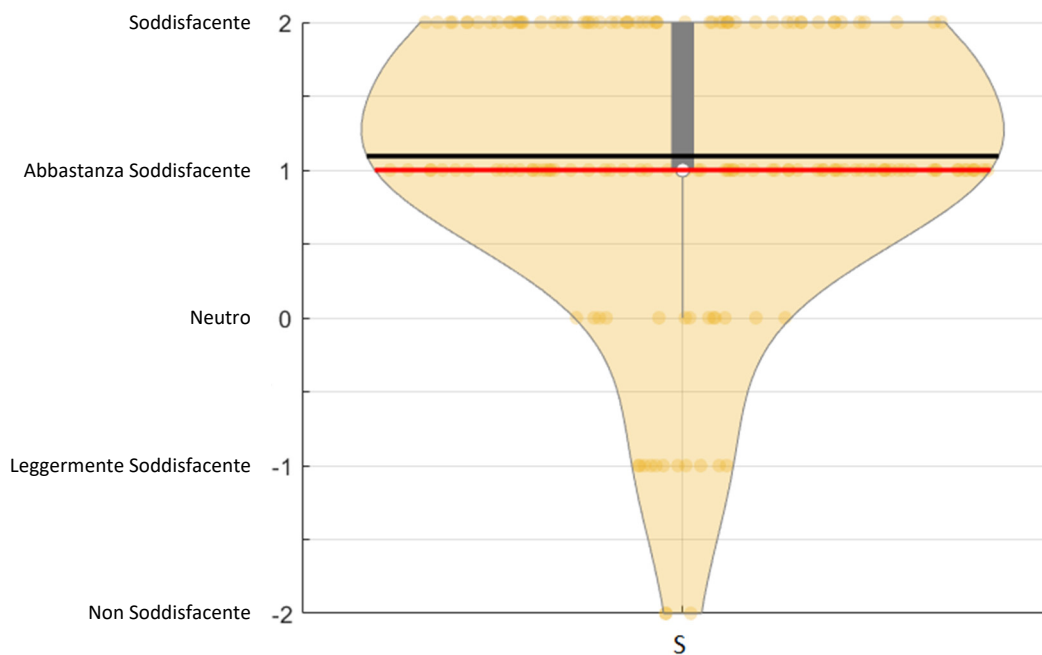


Fig. 175 – Box plots rappresentativi dei voti di soddisfazione

Sotto il sistema spray è stato chiesto se nel complesso il sistema risulta essere soddisfacente. Un solo soggetto ha espresso un giudizio “-2, non soddisfacente” nei confronti del sistema, mentre salendo verso l’alto nel grafico si nota come il violino si allarghi progressivamente fino ad “+1, abbastanza soddisfacente”, che risulta essere il voto maggiormente espresso, nonché il valore mediano. La media (linea nera) è poco sopra il voto +1 questo perché gran parte dei soggetti hanno conferito la massima soddisfazione al sistema. La scatola del box plot (linea grigia verticale spessa), infatti, è compresa proprio tra “+1, abbastanza soddisfacente” e “+2, soddisfacente”, i baffi (linea grigia verticale sottile) si estendono fino a “0, neutro”, lasciano i voti più negativi come outliers.

#### 4.4.6 Contatto tra le particelle di nebbia e la pelle

Un'altra parte del questionario è stata dedicata alla sensazione percepita dai soggetti nel momento in cui le particelle di acqua nebulizzata prodotte dal sistema water mist entrano in contatto con la pelle.

Le domande sono riproposte nella stessa formulazione delle precedenti e interessano la sensazione termica e di umidità. Non sono stata divise nel tempo perché si tratta di domande puntuali sull'effettivo momento di contatto tra spray e pelle.

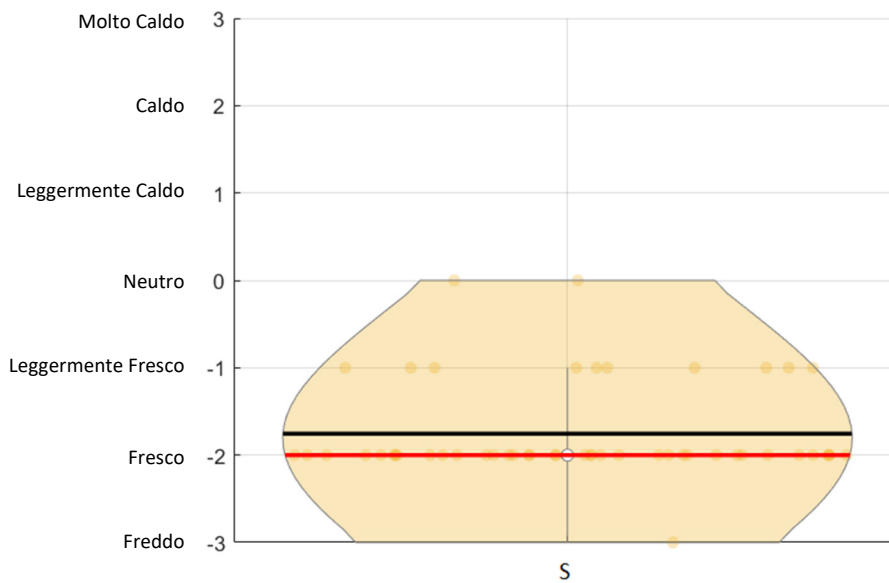


Fig. 176 – Box plots TSV contatto pelle-spray

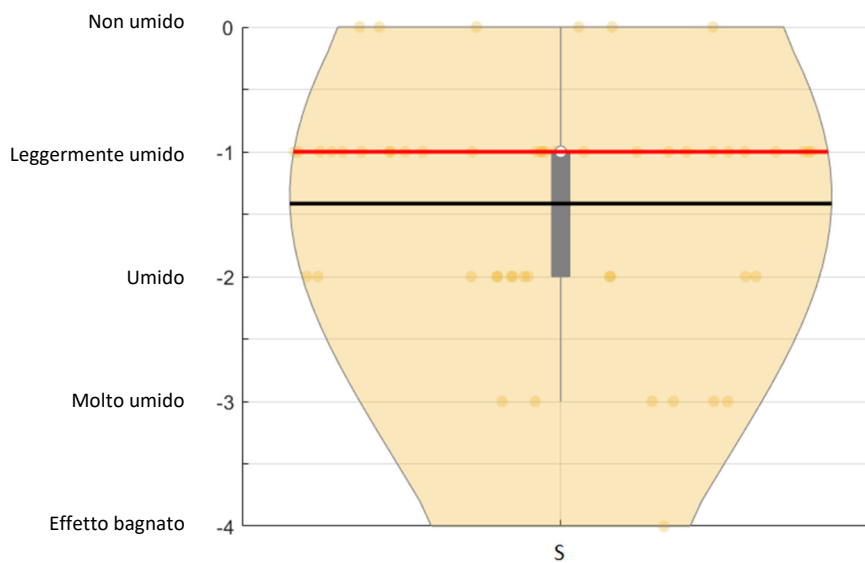


Fig. 177 – Box plots Umidità contatto pelle-spray

Analizzando i voti delle sensazioni percepite al contatto delle particelle di acqua nebulizzata con la pelle, si nota che per quanto riguarda la sensazione termica il contatto produce effetti che variano tra “0, neutro” e “-3, freddo”, mentre il grafico relativo all’umidità è occupato nella sua interezza, poiché i voti sono più distribuiti. La media dei voti relativa al TSV cade tra “-2, fresco” e “-1, leggermente fresco”. La mediana dei voti della percezione dell’umidità cade su “-1, leggermente umido”, anche se tutti i voti di comfort sono stati opzionati almeno da un soggetto. Il voto “-4, effetto bagnato” è quello che ha ricevuto meno preferenze e questo è un aspetto positivo, in quanto dimostra come nonostante l’immissione di particelle di acqua nebulizzata, l’umidità non crei un effetto troppo sgradevole sugli utenti.

Questo voto è stato espresso in maniera puntuale, stando attenti al momento di effettivo contatto delle particelle con la pelle, contatto disturbato in parte dalla presenza di vento, che a volte tendeva a spostare globalmente la nuvola di nebbia altrove o contrariamente la spostava interamente addosso alle persone, ottenendo in entrambi i casi un effetto indesiderato. Questo conferma quanto detto in precedenza sulla velocità del vento: i valori di  $w_s$  ottimali per il funzionamento del sistema sono relativamente bassi (1-2 m/s), altrimenti vi è troppa dispersione delle particelle.

#### 4.5 Analisi dei voti di comfort tenendo conto del tempo

I questionari prodotti e consegnati agli utenti per la sperimentazione prevedevano il fattore tempo come una variabile importante nella valutazione del comfort. In particolare, i soggetti hanno risposto ai quesiti posti ogni tre minuti, per un totale di nove minuti di sosta sotto il gazebo e nove minuti di permanenza sotto il sistema spray. Questi dati ci permettono di capire come varia il comfort delle persone ferme nelle condizioni imposte.

#### 4.5.1 TSV

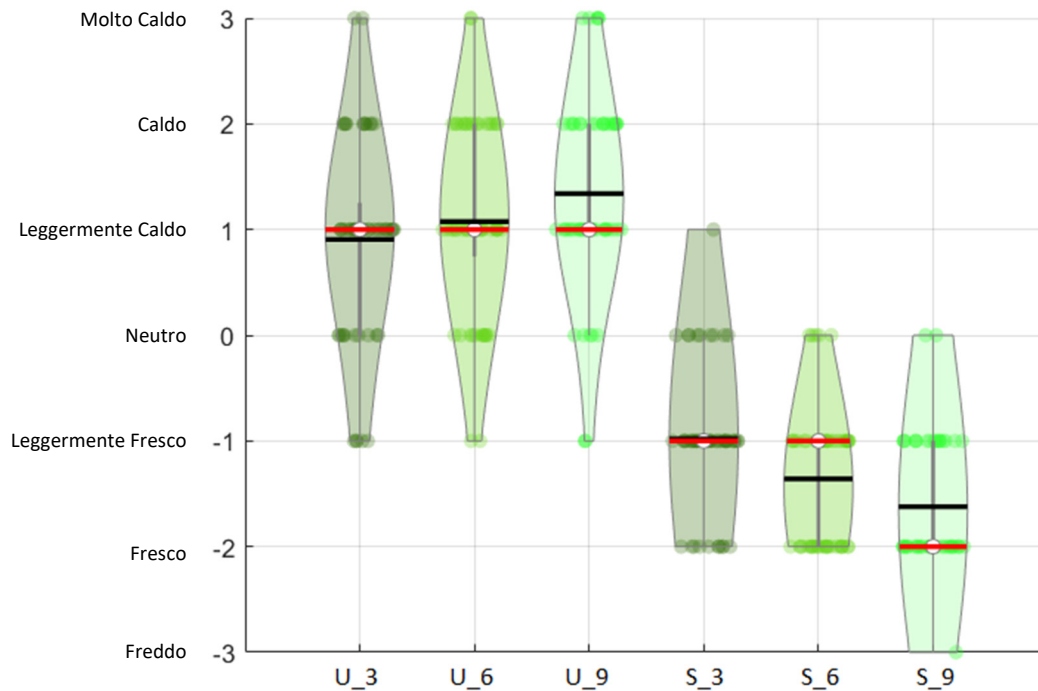


Fig. 178 – Box plot rappresentativi dei voti di sensazione termica distribuiti nel tempo

In generale, in ambiente naturale (*U*, box plots a sinistra) la mediana dei voti (linea rossa) si mantiene costante su “+1, leggermente caldo” per tutto il periodo considerato, anche se i soggetti hanno espresso voti che vanno da “-1, leggermente fresco” a “+3, molto caldo”. È interessante notare che con il tempo la distribuzione dei voti cambia, come si nota dai violini che si allargano e si stringono in base al numero di voti. A 3 minuti (*U\_3*) la maggior parte dei voti è tra “0, neutro” e “-1, leggermente fresco”, a 6 e a 9 minuti invece si procede verso sensazioni più calde, e più soggetti votano “+2, caldo” e “+3, molto caldo”. Questo indicherebbe che il comfort dei soggetti è stato influenzato negativamente dal tempo di permanenza nella condizione sperimentale.

Nell’ambiente con il sistema spray (*S*, box plots a destra) la mediana dei voti si colloca attorno al voto “-1, leggermente fresco” per i primi 6 minuti, ma analogamente all’ambiente *U*, il trascorrere del tempo sembra aver influenzato la sensazione termica dei soggetti, questa volta però in maniera positiva. Infatti, in corrispondenza di *S\_9* il valore mediano si sposta addirittura su “-2, freddo” e alcuni soggetti esprimono anche sensazioni

molto fredde (“-3, molto freddo”). Il grafico supporta quindi l’efficacia del sistema testato in condizioni climatiche esterne.

Per supportare le ipotesi ottenute da questa prima analisi qualitativa è stato applicato il *Wilcoxon signed-rank test*, per dimostrare statisticamente la presenza di differenze significative nelle condizioni di prova (U\_3 vs S\_3, U\_6 vs S\_6, U\_9 vs S\_9).

|            | Prova | Calcolati          |      | Critici |     | p value  | sig           |
|------------|-------|--------------------|------|---------|-----|----------|---------------|
|            |       | Z (media, dev std) | Tmin | z       | T   |          |               |
| TSV<br>U-S | 3     | -                  | 0    | -       | 415 | 6,83E-10 | significativo |
|            | 6     | -6,33              | 0    | ±1,96   | -   | 1,63E-10 | significativo |
|            | 9     | -6,33              | 0    | ±1,96   | -   | 1,72E-10 | significativo |

Tab. 13 – Wilcoxon test per TSV

Per tutti e tre i periodi di tempo analizzati (3, 6 e 9 minuti) sono state riscontrate differenze statisticamente significative nei voti. In particolare, i T-values (valore minore tra le somme dei due gruppi di ranghi) calcolati in questo caso specifico sono pari a 0, poiché le differenze nei voti di sensazione termica erano negative: passando da U a S i soggetti hanno diminuito i voti assegnati. Questo permette di concludere che l’utilizzo del sistema water mist influenza positivamente i voti relativi alla sensazione termica degli utenti.

#### 4.5.2 Sudore

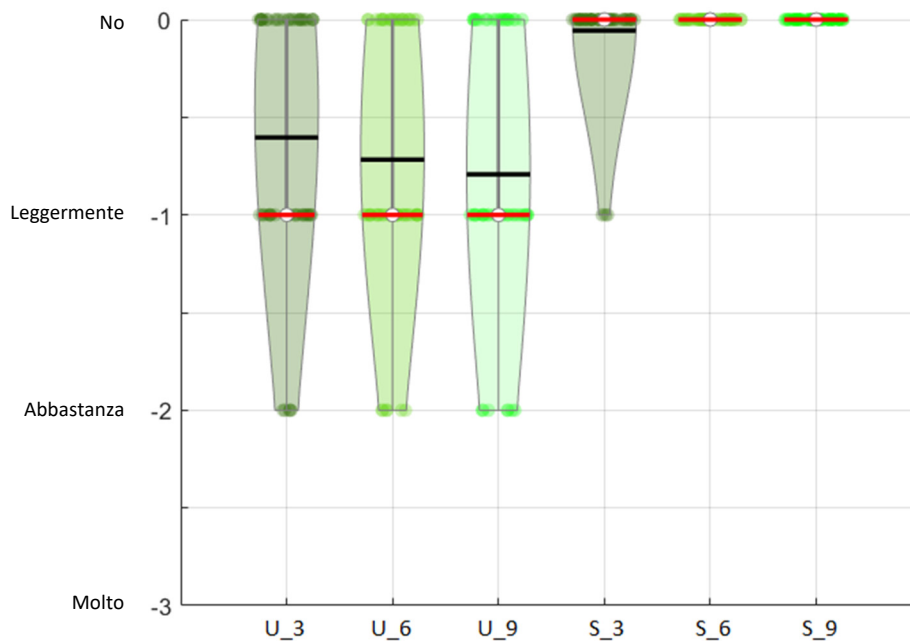


Fig. 179 – Box plot rappresentativi dei voti di sudore distribuiti nel tempo

La percezione del sudore rimane abbastanza costante nel tempo. Cambia leggermente il valore medio (linea nera), che indica come a 9 minuti si sudi maggiormente rispetto all'inizio nell'ambiente naturale (U\_9).

Nell'ambiente spray solo tre soggetti hanno espresso una sensazione di "leggermente" sudato nei primi 3 minuti, altrimenti nessuno stava sudando durante la prova.

Anche per questi voti è stato effettuato il *Wilcoxon signed-rank test*, per vedere se il sistema spray provoca un cambiamento significativo nei voti di comfort.

|               | Prova | Calcolati          |      | Critici |     | p value  | sig           |
|---------------|-------|--------------------|------|---------|-----|----------|---------------|
|               |       | Z (media, dev std) | Tmin | z       | T   |          |               |
| SUDORE<br>U-S | 3     | -4,37              | 0    | ±1,96   | 89  | 2,50E-06 | significativo |
|               | 6     | -4,94              | 0    | ±1,96   | 159 | 1,25E-07 | significativo |
|               | 9     | -5,16              | 0    | ±1,96   | 195 | 3,60E-08 | significativo |

Tab. 14 – Wilcoxon test per sensazione di sudore

Nella tabella si mostra come il test dia esito significativo sia confrontando T con T-critico, che usando la normalizzazione e dunque la Z-statistica. Per i voti espressi relativamente alla sensazione di sudore il sistema spray, e dunque il diverso ambiente sperimentale, influenza effettivamente la percezione e di conseguenza i voti.



### 4.5.3 Umidità

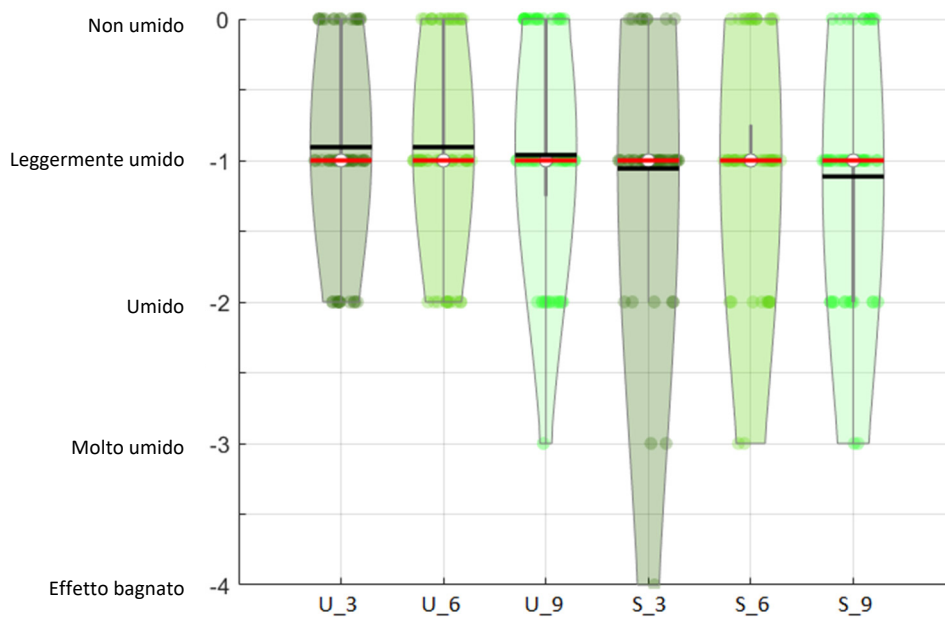


Fig. 180 – Box plot rappresentativi dei voti di umidità distribuiti nel tempo

Per avere piena comprensione dei dati raccolti bisogna considerare che la zona dove sono stati installati il gazebo per le prove in U e la struttura del sistema spray (S) è risultata particolarmente ventosa durante tutte le prove. Questo potrebbe aver provocato lo spostamento delle piccolissime particelle di acqua nebulizzata; quindi, non incrementano in maniera rilevante la sensazione di umidità.

Nell'ambiente non disturbato U i voti si concentrano tra “-2, umido” e “0, non umido”, con poche sensazioni molte umide espresse a 9 minuti (U\_9). Nell'ambiente spray invece i voti si distribuiscono tra “-3, molto umido” e “0, non umido”; la mediana e la media sono in tutti i casi attorno a “-1, leggermente umido”. In particolare, in S\_3, un soggetto ha assegnato il voto a “+4, effetto bagnato”. Dal grafico si nota comunque un leggero aumento della sensazione di umidità nella zona spray, dovuta all'immissione nell'aria ambiente di piccolissime particelle di acqua nebulizzata.

Anche in questo caso all'analisi qualitativa è stato associato il *Wilcoxon signed-rank test*, per verificare se il sistema spray ha effettivamente provocato un cambiamento nei voti di umidità.

|                | Prova | Calcolati          |      | Critici |     | p value | sig               |
|----------------|-------|--------------------|------|---------|-----|---------|-------------------|
|                |       | Z (media, dev std) | Tmin | z       | T   |         |                   |
| UMIDITÀ<br>U-S | 3     | -1,37              | 178  | ±1,96   | 147 | 0,28315 | non significativo |
|                | 6     | -0,60              | 329  | ±1,96   | 235 | 0,51448 | non significativo |
|                | 9     | -0,92              | 259  | ±1,96   | 195 | 0,33521 | non significativo |

Tab. 15 – Wilcoxon test per Umidità

I risultati del test non riportano differenze significative, ovvero l'utilizzo del sistema water mist *non* causa cambiamenti nei voti di umidità. Questo conferma che le particelle di acqua nebulizzata hanno un diametro talmente piccolo da evaporare in breve tempo e l'aumento di umidità è percepito dagli utenti, ma non in maniera tale da avere condizioni negative sulla loro percezione di comfort.

#### 4.5.4 CSV

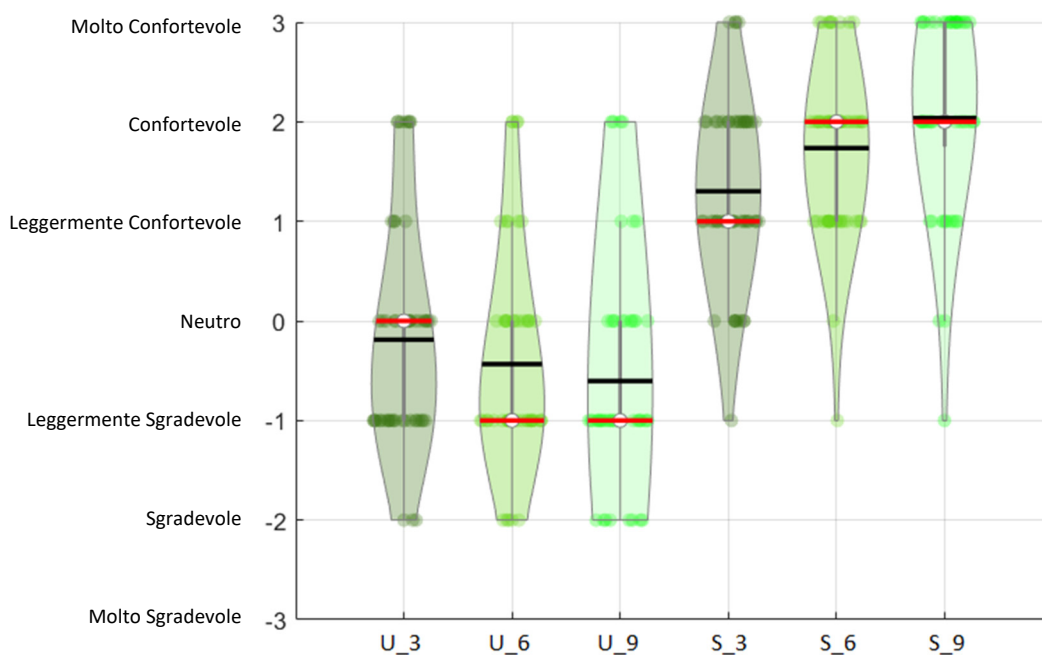


Fig. 181 – Box plot rappresentativi dei voti di CSV distribuiti nel tempo

Per quanto riguarda il comfort, si nota dai valori medi dei voti (linee nere), come in ambiente indisturbato *U* la sensazione diventi sempre più sgradevole con l'aumentare del tempo, mentre nell'ambiente spray *S* ci si avvicina a voti sempre più confortevoli. In *U\_3*, *U\_6* e *U\_9* i voti risultano globalmente compresi tra “+2, confortevole” e “-2,

sgradevole”, ma all’interno dei violini cambia la distribuzione: i voti positivi, “+2, confortevole” e “+1, leggermente confortevole” diminuiscono con l’aumentare del tempo, mentre crescono “-1, leggermente sgradevole” e “+2, sgradevole”.

Sotto il sistema spray avviene l’esatto contrario, diminuiscono le sensazioni negative, i voti “-1, leggermente sgradevole” e “0, neutro” sono via via opzionati da meno persone; mentre aumentano i voti positivi, a S\_9 il violino è più largo in “+2, confortevole” e “+3, molto confortevole”.

Per valutare statisticamente se il sistema spray provoca un cambiamento significativo nei voti di comfort si è utilizzato il *Wilcoxon signed-rank test*.

|            | Prova | Calcolati          |      | Critici |     | p value  | sig           |
|------------|-------|--------------------|------|---------|-----|----------|---------------|
|            |       | Z (media, dev std) | Tmin | z       | T   |          |               |
| CSV<br>U-S | 3     | -3,83              | 23   | ±1,96   | 343 | 1,36E-08 | significativo |
|            | 6     | -6,03              | 0    | ±1,96   | 396 | 1,16E-09 | significativo |
|            | 9     | -6,21              | -    | ±1,96   | -   | 3,99E-10 | significativo |

Tab. 16 – Wilcoxon test per CSV

Il test stabilisce che l’ambiente spray ha effetto significativo sui voti di comfort, a conferma di quanto si vede nel grafico con i box plots. A nove minuti, avendo un campione superiore a 50, è stato utilizzato solo il metodo normalizzato con Z-statistico.

#### 4.5.6 Soddisfazione

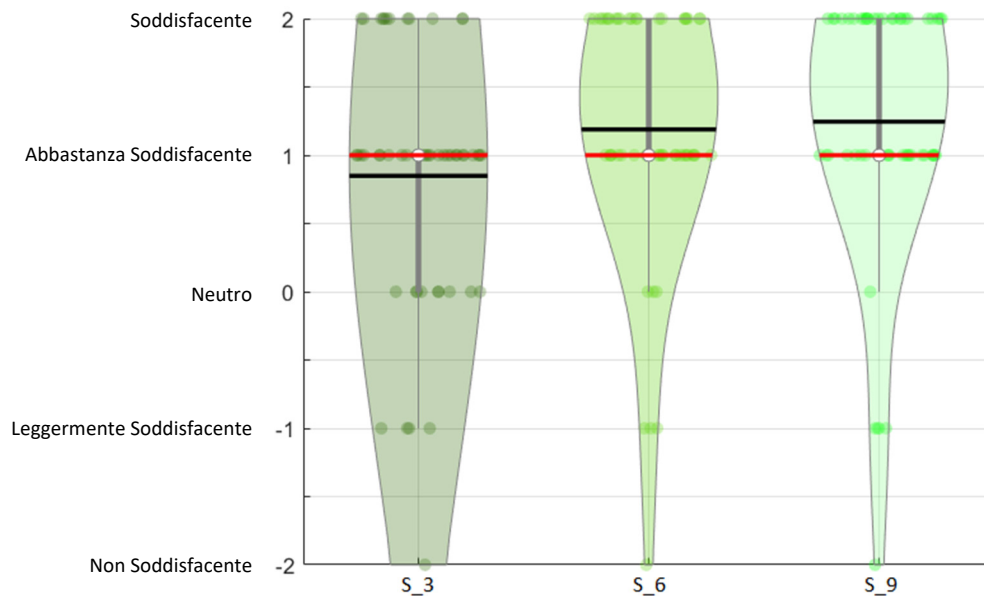


Fig. 182 – Box plot rappresentativi dei voti di soddisfazione distribuiti nel tempo

Per quanto riguarda i voti di soddisfazione globale del sistema, gli utenti hanno distribuito le loro sensazioni in tutte i voti possibili. La mediana (linea rossa) cade nel voto “+1, abbastanza soddisfacente” ed è costante nel tempo, mentre la media (linea nera) cresce nel tempo, suggerendo quindi come il sistema sia sempre più soddisfacente al passare del tempo. Soprattutto negli ultimi sei minuti, infatti, il violino si stringe in funzione dei voti negativi, mentre si allarga in “+1, abbastanza soddisfacente” e “+2, soddisfacente”. Con l’aumentare del tempo dunque aumenta anche la percezione positiva del sistema e globalmente quest’ultimo risulta soddisfacente.

#### 4.6 Differenze del campione tra maschi e femmine

L’ultima analisi dei dati acquisiti dai questionari di valutazione del comfort riguarda la differenza di genere tra gli utenti. In particolare, si vanno ad osservare e analizzare i voti espressi dai soggetti maschili e da quelli femminili per vedere se la percezione del comfort cambia in base al sesso degli utenti. Sarebbe stato interessante fare lo stesso tipo di analisi confrontando per esempio anche l’indice di massa corporea e il tipo di abbigliamento indossato; tuttavia, i soggetti che hanno preso parte alla sperimentazione erano troppo pochi per permettere un’analisi statisticamente efficiente.

### 4.6.1 TSV

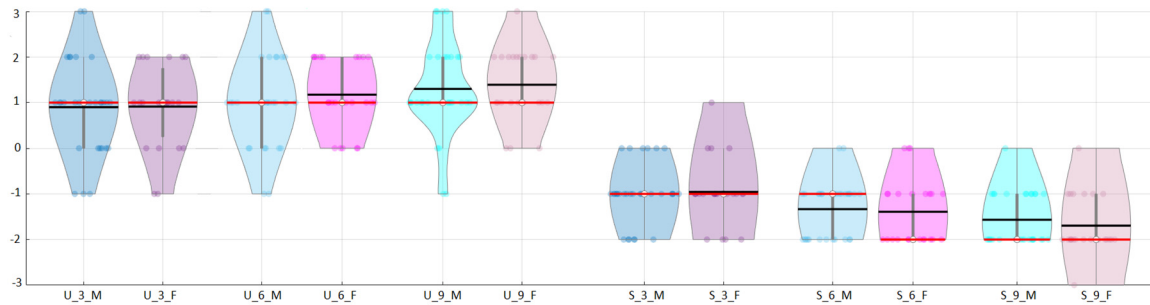


Fig. 183 – Box plot rappresentativi dei voti di sensazione termica M/F distribuiti nel tempo

Il campione non è distribuito in maniera equa: come già detto gli uomini che hanno preso parte alla sperimentazione sono 30, mentre le donne sono 23. Il grafico distingue i box plots in due colori principali: blu per i maschi e rosa per le femmine, poi sfumati al passare del tempo.

Le donne in ambiente naturale (*U*, parte sinistra del grafico) sembrano tollerare meglio il caldo, esprimendo solo a 9 minuti il voto “+3, molto caldo”. I voti degli uomini si distribuiscono tra “-1, leggermente fresco” e +3, molto caldo” per tutti i novini minuti della prova, ma con l’aumentare del tempo, i voti “-1, leggermente fresco” e “0, neutro” sono sempre meno selezionati.

In ambiente spray (*S*, parte destra del grafico) i voti degli uomini sono tutti compresi tra “0, neutro” e “-2, fresco”, con il passare del tempo il violino si allarga sulle sensazioni più fresche e si stringe su quelle neutre, come si nota anche dalle medie dei voti (linee nere) che scendono sempre verso voti più negativi. Per quanto riguarda i violini rosa, relativi ai voti delle donne, a *S\_3* ci sono anche dei voti “+1, leggermente caldo”, mentre a *S\_9* si scende a “-3, freddo”. Anche in questo caso, dal valore medio si percepisce come la sensazione termica delle femmine si sposti via via verso sensazioni fredde all’aumentare della permanenza sotto il sistema water mist.

Per supportare le ipotesi ottenute da questa prima analisi qualitativa è stato applicato il *Mann-Whitney U-Test*, per dimostrare statisticamente la presenza di differenze significative nei due gruppi di campioni (*U\_3\_M vs U\_3\_F*, *U\_6\_M vs U\_6\_F*, *U\_9\_M vs U\_9\_F*, *S\_3\_M vs S\_3\_F*, *S\_6\_M vs S\_6\_F*, *S\_9\_M vs S\_9\_F*).

|         | Num. MASCHI | Num. FEMMINE | Prova | Z-statistico | Z-critico | p-value | Sign              |
|---------|-------------|--------------|-------|--------------|-----------|---------|-------------------|
| TSV - U | 30          | 23           | 3     | -0,1974      | ±1,96     | 0,84070 | non significativo |
|         |             |              | 6     | -0,7178      | ±1,96     | 0,45160 | non significativo |
|         |             |              | 9     | -0,3679      | ±1,96     | 0,70080 | non significativo |
| TSV - S | 30          | 23           | 3     | -0,0538      | ±1,96     | 0,95861 | non significativo |
|         |             |              | 6     | -0,4666      | ±1,96     | 0,61194 | non significativo |
|         |             |              | 9     | -0,7089      | ±1,96     | 0,41135 | non significativo |

Tab. 17 – Mann-Whitney U-test per TSV

Il test dimostra come la differenza di genere non sia significativa in termini di sensazione termica. Questo conferma l'analisi qualitativa che vedeva i violini non troppo diversi tra loro.

#### 4.6.2 Sudore

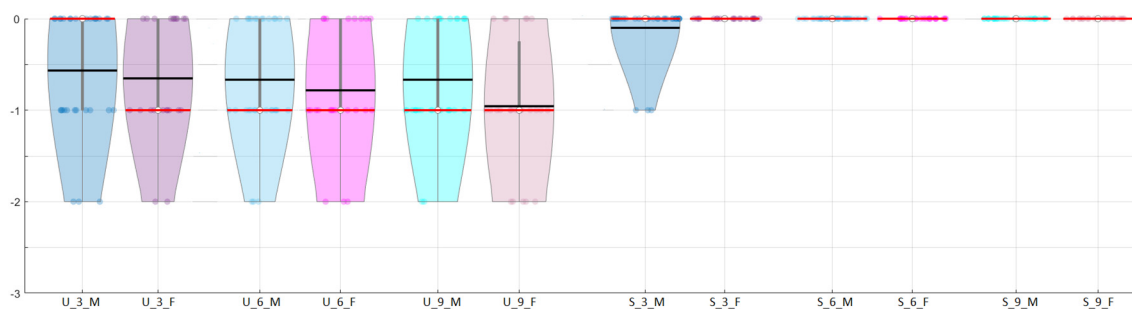


Fig. 184 – Box plot rappresentativi dei voti di sensazione di sudore M/F distribuiti nel tempo

Le situazioni relative al sudore sono abbastanza equivalenti, sia rispetto al tempo che rispetto ai due gruppi del campione. Nell'ambiente indisturbato *U* sia i voti degli uomini che quelli delle donne si distribuiscono tra “-2, abbastanza” e “0, no”; tuttavia, come indicano i valori medi dei voti (linee nere), la sensazione di sudore aumenta con l'aumentare del tempo. Nell'ambiente spray sono solo 3 uomini a sudare leggermente a 3 minuti, altrimenti nessun soggetto suda durante tutta la durata del test.

Anche in questo caso, per rendere valida questa ipotesi ottenuta qualitativamente è stato eseguito il *Mann-Whitney U-Test*, per vedere se i voti sono significativamente diversi tra uomini e donne.

|            | Num. MASCHI | Num. FEMMINE | Prova | Z-statistico | Z-critico | p-value | Sign              |
|------------|-------------|--------------|-------|--------------|-----------|---------|-------------------|
| SUDORE - U | 30          | 23           | 3     | -0,5115      | ±1,96     | 0,57659 | non significativo |
|            |             |              | 6     | -0,5832      | ±1,96     | 0,5256  | non significativo |
|            |             |              | 9     | -1,3639      | ±1,96     | 0,13253 | non significativo |
| SUDORE - S | 30          | 23           | 3     | -0,6191      | ±1,96     | 0,12746 | non significativo |
|            |             |              | 6     | -            | ±1,96     | -       | -                 |
|            |             |              | 9     | -            | ±1,96     | -       | -                 |

Tab. 18– Mann-Whitney U-test per sensazione di sudore

Il test conferma che la differenza tra i campioni di sesso maschile e quelli di sesso femminile non è rilevanti per la valutazione del sudore. In particolare, negli ultimi 6 minuti sotto il sistema spray non è stato eseguito il test in quanto tutti i voti sono pari a 0 ed è scontato che non ci sia alcuna differenza tra i voti maschili e quelli femminili.

#### 4.6.3 Umidità

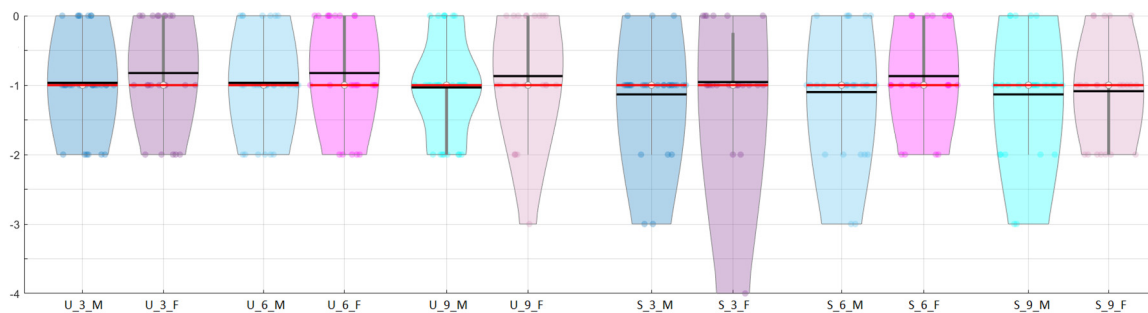


Fig. 185 – Box plot rappresentativi dei voti di sensazione di umidità M/F distribuiti nel tempo

Globalmente nell'ambiente indisturbato U, i voti sono distribuiti tra “-2, umido” e “0, non umido”. per gli uomini anche i valori medi e mediani sono costanti nel tempo e sempre a ridosso di “-1, leggermente umido”. Le donne a 9 minuti (U\_9\_F) hanno espresso anche voti di “-3, molto umido”, ma il valore medio dei tre violini è poco sopra la sensazione leggermente umida. All'interno del sistema water mist i voti dei maschi sono costanti nel tempo e compresi tra “-3, molto umido” e “0, non umido”; le femmine in S\_3\_F esprimono anche sensazioni di “-4, effetto bagnato” (un solo voto), mentre in S\_6\_F e in S\_9\_F i voti sono distribuiti tra “-2, leggermente umido” e “0, non umido”. Si nota dunque un aumento di umidità nell'ambiente spray, dovuto alle particelle di acqua nebulizzata che vengono spruzzate dagli ugelli.

Viene successivamente applicato il test statistico *Mann-Whitney U-Test* per vedere se vi è una differenza significativa tra i diversi gruppi del campione analizzato.

|              | Num. MASCHI | Num. FEMMINE | Prova | Z-statistico | Z-critico | p-value | Sign              |
|--------------|-------------|--------------|-------|--------------|-----------|---------|-------------------|
| UMIDITA' - U | 30          | 23           | 3     | -0,6999      | ±1,96     | 0,45249 | non significativo |
|              |             |              | 6     | -0,6999      | ±1,96     | 0,45249 | non significativo |
|              |             |              | 9     | -0,8794      | ±1,96     | 0,35028 | non significativo |
| UMIDITA' - S | 30          | 23           | 3     | -1,0229      | ±1,96     | 0,21921 | non significativo |
|              |             |              | 6     | -0,8614      | ±1,96     | 0,34557 | non significativo |
|              |             |              | 9     | 0,0000       | ±1,96     | 1,00792 | non significativo |

Tab. 19 – Mann-Whitney U-test per sensazione di umidità

Anche per quanto riguarda il voto relativo all'umidità, il test sostiene che non ci sia differenza significativa tra i voti degli uomini e i voti delle donne. Questo conferma l'analisi qualitativa fatta attraverso box plots a violino, che infatti mostrano forme piuttosto simili tra loro.

#### 4.6.4 CSV

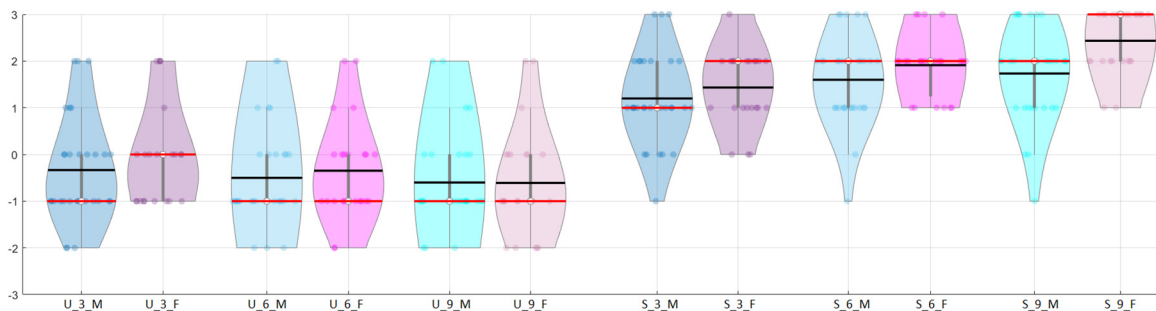


Fig. 186 – Box plot rappresentativi dei voti di sensazione di CSV M/F distribuiti nel tempo

In ambiente non disturbato *U* i voti degli uomini si distribuiscono tra “-2, sgradevole” e “+2, confortevole” in tutto il periodo considerato e il valore mediano rimane costante in “-1, leggermente sgradevole”. Il violino al passare del tempo si allarga in prossimità dei voti negativi, mentre si stringe nei voti positivi. La scatola del box plot (linea verticale grigia) dei voti delle donne a 3 minuti (*U\_3\_F*) è compresa tra “-1, leggermente sgradevole” e “0, neutro”, con outliers a “+1, leggermente confortevole” e “+2, confortevole”. A 6 e a 9 minuti i voti sono via via sempre più diretti verso i voti negativi.

In ambiente spray i violini si concentrano nella parte alta del grafico, perché i voti sono stati principalmente positivi. Per gli uomini c'è qualche voto “-1, leggermente



sgradevole” che permane in tutti i 9 minuti, mentre per le donne dopo i 3 minuti i voti si distribuiscono tra “+1., leggermente confortevole” e “+3, molto confortevole”.

Da questa distribuzione si nota come la condizione relativa all’ambiente spray sia ritenuta anche molto confortevole. Relazionando i voti a quelli di sensazione termica (TSV) si evince che gli utenti definiscono una situazione termicamente fresca come confortevole.

Per confermare questa ipotesi ottenuta da un’analisi qualitativa viene applicato il *Mann-Whitney U-Test*, per controllare se statisticamente c’è una differenza significativa tra i voti di comfort espressi dalle donne e quelli espressi dagli uomini.

|         | Num. MASCHI | Num. FEMMINE | Prova | Z-statistico | Z-critico | p-value | Sign              |
|---------|-------------|--------------|-------|--------------|-----------|---------|-------------------|
| CSV - U | 30          | 23           | 3     | -1,0768      | ±1,96     | 0,2585  | non significativo |
|         |             |              | 6     | -0,5922      | ±1,96     | 0,5307  | non significativo |
|         |             |              | 9     | -0,0628      | ±1,96     | 0,9536  | non significativo |
| CSV - S | 30          | 23           | 3     | -1,0140      | ±1,96     | 0,2856  | non significativo |
|         |             |              | 6     | -1,1934      | ±1,96     | 0,2024  | non significativo |
|         |             |              | 9     | -2,5124      | ±1,96     | 0,0078  | significativo     |

Tab. 20 – Mann-Whitney U-test per CSV

Analizzando statisticamente i voti relativi al comfort, il *Mann-Whitney U-Test* ci dice che nell’ambiente naturale la differenza tra i generi non è significativa al fine del voto di comfort. Stessa cosa vale per i primi 6 minuti nella zona spray, mentre negli ultimi 3 minuti la z-statistica è inferiore a quella critica, i p-value è minore di 0,05 e ciò significa che i voti delle donne sono significativamente diversi da quelli degli uomini.

#### 4.6.5 Soddifazione

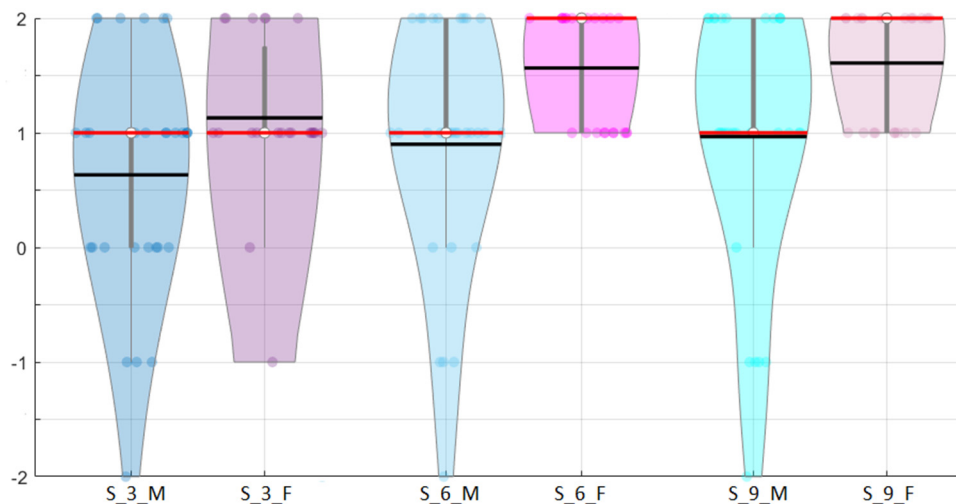


Fig. 187 – Box plot rappresentativi dei voti di soddisfazione M/F distribuiti nel tempo

Il sistema risulta essere più soddisfacente per le donne già dai primi minuti, questo è percepibile perché nessun voto è sotto “-1, leggermente soddisfacente”, mentre tra gli uomini ci sono anche voti “-2, non soddisfacente” espressi per tutta la durata della prova. A 6 e 9 minuti i violini rappresentativi dei voti delle donne si differenziano molto da quelli relativi agli uomini. Le risposte delle donne sono molto più positive e distribuite solo tra “+1, abbastanza soddisfacente” e “+2, soddisfacente”.

Per confermare l’ipotesi fatta basandosi su un’analisi qualitativa, viene applicato il *Mann-Whitney U-Test*, per controllare se statisticamente c’è una differenza significativa tra i voti espressi dai diversi generi.

|                   | Num. MASCHI | Num. FEMMINE | Prova | Z-statistico | Z-critico | p-value | Sign              |
|-------------------|-------------|--------------|-------|--------------|-----------|---------|-------------------|
| SODDISFAZIONE - S | 30          | 23           | 3     | -1,7497      | ±1,96     | 0,05918 | non significativo |
|                   |             |              | 6     | -2,2702      | ±1,96     | 0,01337 | significativo     |
|                   |             |              | 9     | -1,98304     | ±1,96     | 0,02959 | significativo     |

Tab. 21 – Mann-Whitney U-test per Soddisfazione globale sistema

Dall’analisi qualitativa i violini a 6 e 9 minuti sono di forma significativamente diversa. Questo viene confermato dal *Mann-Whitney U-Test* che afferma come ci sia differenza significativa tra i voti espressi dai due diversi generi.

#### 4.6.6 Contatto Particelle-Pelle

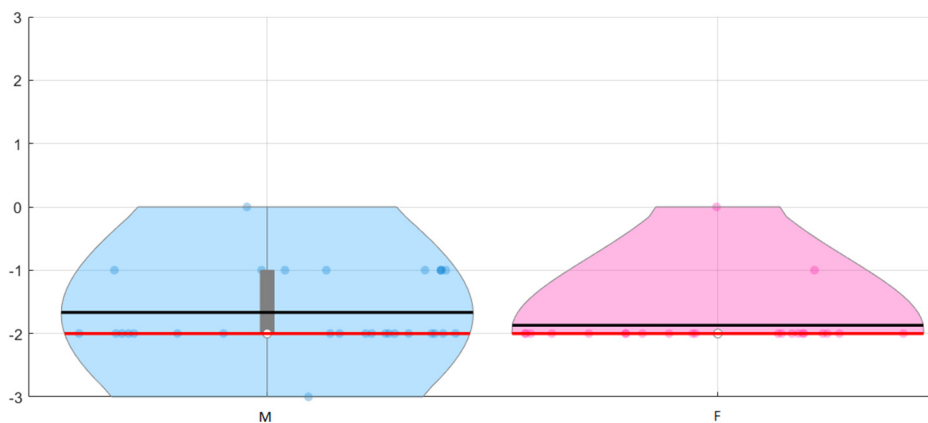


Fig. 188 – Box plots TSV contatto pelle-spray M/F

Per gli uomini la sensazione termica raggiunge anche il voto “-3, freddo”, mentre le donne esprimono al massimo una sensazione di “-2, fresco”; per entrambi la mediana dei voti cade in “-2, fresco”. La distribuzione dei voti non è mai sopra il voto “0, neutro” e questo

rappresenta un aspetto positivo, in quanto si verifica una condizione fresca nonostante le calde temperature estive.

|                | Num. MASCHI | Num. FEMMINE | Z-statistico | Z-critico | p-value | Sign              |
|----------------|-------------|--------------|--------------|-----------|---------|-------------------|
| TSV SKIN-SPRAY | 30          | 23           | -1,2652      | ±1,96     | 0,0942  | non significativo |

Tab. 22 – Mann-Whitney U-test per TSV contatto pelle-nebbia

Il *Mann-Whitney U-test* afferma che tra i voti delle donne e quelli degli uomini non c'è differenza significativa.

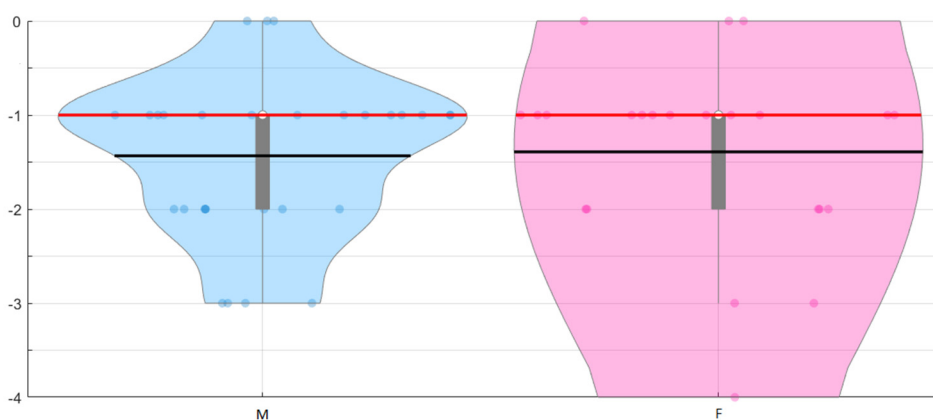


Fig. 189 – Box plots Umidità contatto pelle-spray M/F

Per quanto riguarda l'umidità provata al contatto della nebbia con la pelle, una donna riscontra una sensazione di “-4, effetto bagnato”, mentre nel violino degli uomini i voti sono distribuiti tra “-3, molto umido” e “0, neutro”. In entrambi i casi la mediana dei voti (linea rossa) cade nel voto “-1, leggermente umido”, mentre la media (linea nera) è in tutti e due i casi tra “-1, leggermente umido” e “-2, umido”.

|                    | Num. MASCHI | Num. FEMMINE | Z-statistico | Z-critico | p-value | Sign              |
|--------------------|-------------|--------------|--------------|-----------|---------|-------------------|
| UMIDITÀ SKIN-SPRAY | 30          | 23           | -0,3320      | ±1,96     | 0,7261  | non significativo |

Tab. 23 – Mann-Whitney U-test per sensazione di umidità contatto pelle-nebbia

Anche in quest'ultima analisi viene eseguito il *Mann-Whitney U-test*, che dimostra statisticamente la non significatività tra i voti espressi dalle donne e quelli degli uomini in termini di sensazione di umidità al contatto tra particelle e pelle.

## 5. Conclusioni

Questo studio sperimentale si è posto due obiettivi principali:

- valutare l'efficacia del sistema water-mist, studiato in diverse configurazioni progettuali;
- valutare le sensazioni di comfort di un campione di individui nell'ambiente naturale indisturbato e in quello nebulizzato, in termini di temperatura, umidità, sudorazione e soddisfazione globale per il sistema.

È stato ideato, installato e monitorato un sistema di nebulizzazione composto da 24 ugelli da 0,20 mm, posto su una struttura metallica nei pressi della facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona, precisamente tra la serra di Agraria e i Capannoni pesanti.

Per misurare le condizioni climatiche esterne al sistema è stata installata una centralina meteo poco distante da esso, mentre all'interno della zona di nebulizzazione sono stati installati 4 sensori di temperatura e umidità relativa, 2 globotermometri e 10 termocoppie: in questo modo è risultato possibile confrontare i dati climatici ambientali e quelli trattati dallo spray.

Sono stati proposti 7 layout progettuali del sistema, variabili per altezza degli ugelli (2,90, 2,60, 2,20 m), interasse tra gli ugelli (0,80 o 1,00m), per il tipo di schermatura (schermatura vento, schermatura solare o nessuna schermatura) e per il tipo di controllore (manuale o temporizzato). Queste configurazioni sono state confrontate a coppie, prendendo in esame due situazioni simili ma con una variabile diversa.

L'efficienza delle configurazioni è stata sintetizzata grazie a un'operazione che ha permesso di calcolare la variazione percentuale in termini di temperatura e di umidità relativa. Sulla base di queste, le soluzioni più performanti risultano essere quelle con entrambe le tipologie di schermatura: quella per il vento posta lateralmente alla struttura e quella per la radiazione solare posta superiormente.

Nella configurazione con entrambi i teli di schermatura, altezza degli ugelli pari a 2,20 m e controllore manuale, la temperatura scende anche di 10°C all'interno dello spray, con un aumento dell'umidità pari al 50%. Si ha dunque esattamente ciò che è atteso: la

schermatura ha come effetto quello di aumentare l'ombreggiamento e contenere la dispersione delle particelle, dunque l'effetto di raffrescamento è maggiore, come maggiore è la produzione di umidità relativa.

Attraverso l'uso di questionari di comfort sono stati raccolti i voti degli utenti in relazione alla sensazione termica, quella di sudore, di umidità, di comfort e di soddisfazione globale nei confronti del sistema. I voti sono stati espressi ogni 3 minuti, per un totale di 18 minuti di prova, 9 passati sotto un gazebo in ambiente naturale, 9 trascorsi sotto il sistema spray nell'area nebulizzata.

L'analisi qualitativa è stata fatta attraverso l'uso di violin plots e poi è stata confermata attraverso l'uso di test statistici: il Wilcoxon Signed-Rank test e il Mann-Whitney U-test.

Globalmente si verifica una situazione di maggiore comfort sotto lo spray, dove la sensazione termica è più fresca, non si suda è leggermente umido e piuttosto confortevole.

Confrontando i voti espressi a 3, 6 e 9 minuti nell'ambiente naturale con quelli espressi a 3, 6 e 9 minuti nell'area nebulizzata, questi risultano essere tutti significativamente diversi, e dunque il diverso ambiente fa sì che la percezione del comfort cambi. Gli unici voti a non essere significativamente diversi tra quelli espressi in zona spray e quelli in ambiente naturale sono quelli relativi alla sensazione di umidità e questo è a favore della nostra sperimentazione, in quanto significa che l'aumento di umidità che si verifica a livello di dati climatici, non è percepito negativamente dagli utenti in termini di comfort.

L'ultimo confronto fatto analizzando i voti degli uomini (30) con quelli delle donne (23) mostra come non ci sia differenza significativa tra i voti espressi dai due diversi generi. Quindi la percezione del comfort e delle altre variabili non cambia molto in base al sesso (sono in un voto di comfort e in due di soddisfazione).

Nel complesso questo studio ha permesso di capire meglio come questa tecnologia di mitigazione dell'isola di calore basata sull'uso di acqua nebulizzata ha un impatto positivo sul comfort esterno negli ambienti urbani.

Si è andati alla ricerca del layout ottimale per ottenere i migliori risultati possibili e l'utilizzo di teli di schermatura ha permesso di arrivare a buoni risultati. La combinazione di ombreggiatura e nebulizzazione meriterebbe analisi più approfondite, per vedere

quanto queste tecnologie sono efficienti da sole e quanto cresce poi l'efficienza combinandole insieme.

Sarebbe utile inoltre avere un campione più ampio per analizzare i questionari su più variabili personali, come il BMI e il vestiario.

## Bibliografia

- [1] L'ambiente in Europa: Stato e prospettive nel 2020 – Relazione di sintesi – Agenzia europea dell'ambiente, 2019  
<https://www.eea.europa.eu/it/publications/l-ambiente-in-europa-stato-e-prospettive-2020>
- [2] <https://ipccitalia.cmcc.it/climate-change-2021-le-basi-fisico-scientifiche-i-cambiamenti-climatici-sono-diffusi-rapidi-e-si-stanno-intensificando/ù>
- [3] T.R. Oke, G. Mills, A. Christen and J.A. Voogt – Urban Climates – Cambridge University Press – 2017
- [4] Wunch, D., P.O. Wennberg, G.C. Toon, G. Keppel-Aleks, & Y.G. Yavin, 2009: Emissions of greenhouse gases from a North American megacity. *Geophysical Research Letters*, 36, L15810.
- [5] Spinazzè, F. L'isola di calore urbana: Strategie passive di mitigazione. *Il Clima Cambia Le Città*.
- [6] Fanchiotti, A., & Carnielo, E. (2011). Impatto di cool material sulla mitigazione dell'isola di calore urbana e sui livelli di comfort termico negli edifici. Università degli Studi Roma Tre.
- [7] Domínguez, S. A., & Sánchez, F. J. (2016). The effect of evaporative cooling techniques on reducing urban heat. *Urban Climate Mitigation Techniques*
- [8] M. Santamouris, L. Ding, F. Fiorito, P. Oldfield, P. Osmond, R. Paolini, D. Prasad, A. Synnefa, Passive and active cooling for the outdoor built environment – analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects, *Sol. Energy* 154 (2017) 14–33, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>
- [9] Ulpiani, G., Di Giuseppe, E., Di Perna, C., D'Orazio, M., & Zinzi, M. (2019). Thermal comfort improvement in urban spaces with water spray systems: Field measurements and survey. *Building and Environment*, 156(February), 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.007>
- [10] Architectes Trevelo, Viger-Kohler, Urbanistes, TVK. Place de la République. In TVK/Press Kit—Place de la République, Paris, France; 2013.
- [11] Knuijt M. One Step Beyond. *Open Space Topos* 2013;85:60–7.

- [12] Nunes J, Zolio I, Jacinto N, Nunes A, Campos T, Pacheco M, Fonseca D. Misting/cooling systems for microclimatic control in public space. *Nunes J*, Ed 2013:1-16.
- [13] Barrow H, Pope CW. Droplet evaporation with reference to the effectiveness of water-mist cooling. *Appl Energy* 2007;84:404–12.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.09.007>.
- [14] Farnham C, Zhang L, Yuan J, Mizuno T, Emura K, Ashraful A. Cooling Effect of a Mist Fan for Large Indoor Spaces. *Proc. 9th Wind. Conf. Wind. UK*. 2016.
- [15] Farnham C, Emura K, Mizuno T. Evaluation of cooling effects: Outdoor water mist fan. *Build Res Inf* 2015;43:334–45.  
<https://doi.org/10.1080/09613218.2015.1004844> .
- [16] Ulpiani, G. (2019). Water mist spray for outdoor cooling: A systematic review of technologies, methods and impacts. *Applied Energy*, 254(April), 113647.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113647>
- [17] Huang C, Ye D, Zhao H, Liang T, Lin Z, Yin H, et al. The research and application of spray cooling technology in Shanghai Expo. *Appl Therm Eng* 2011;31:3726–35. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.039>.
- [18] Kim J-H, Lee M-H, Yoon Y-H. A verification study on the temperature reduction effect of water mist injection. *Int J Korea Inst Ecol Archit Environ* 2015;15:5–14.
- [19] Montazeri H, Toparlar Y, Blocken B, Hensen JLM. Simulating the cooling effects of water spray systems in urban landscapes: A computational fluid dynamics study in Rotterdam, The Netherlands. *Landsc Urban Plan* 2017;159:85–100. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.10.001>.
- [20] Oh, W., Ooka, R., Nakano, J., Kikumoto, H., & Ogawa, O. (2020). Evaluation of mist-spraying environment on thermal sensations, thermal environment, and skin temperature under different operation modes. *Building and Environment*, 168(October 2019), 106484. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106484>
- [21] Zhang, M., Xu, C., Meng, L., & Meng, X. (2021). Outdoor comfort level improvement in the traffic waiting areas by using a mist spray system: An experiment and questionnaire study. *Sustainable Cities and Society*, 71(October 2020), 102973. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102973>
- [22] Desert, A., Naboni, E., & Garcia, D. (2020). The spatial comfort and thermal delight of outdoor misting installations in hot and humid extreme environments.



*Energy and Buildings*, 224, 110202.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110202>

- [23] Massimo Palme, Francisco Flores, Leonardo Romero, Surface temperature variation and urban heat island intensity in Antofagasta, Chile, *Environ. Territ. Model. Plann. Design* (2018) 147–158, <https://doi.org/10.6903/978-88-6887-048-5.5>.
- [24] Vanos, J. K., Wright, M. K., Kaiser, A., Middel, A., Ambrose, H., & Hondula, D. M. (2020). Evaporative misters for urban cooling and comfort: effectiveness and motivations for use. *International Journal of Biometeorology*.  
<https://doi.org/10.1007/s00484-020-02056-y>
- [25] Hikmet Esen, Omer Tuna, Investigation of Photovoltaic Assisted Misting System Application for Arbor Refreshment, Volume 2015, Article ID 748219, 11 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2015/748219>
- [26] Farnham C., Alam M. A., Yuan J., Cooling Effect of a Mist Fan for Large Indoor Spaces, <https://www.researchgate.net/publication/295327614>
- [27] N.H. Wong, Adrian Z.M. Chong, Performance evaluation of misting fans in hot and humid climate, *Building and Environment* 45 (2010) 2666-2678
- [28] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 2004.4
- [29] Johansson E., Thorsson S., Emmanuel R., Krüger E., Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization, *Urban Climate* 10 (2014) 346-466
- [30] L. Pelagalli. (A.A 2020/2021) Dispense del corso di macchine e sistemi energetici: pompe volumetriche.
- [31] <https://www.asvstubbe.it/blog/le-valvole-tipologie-e-funzione/>, 10/2021
- [32] <https://www.marcaaperta.it/il-pannello-fotovoltaico/>, 10/2021
- [33] Chicchi, D. (2010). Le principali fonti di energia rinnovabile. *Bollettino ingegneri*, 3-12
- [34] Persegona, N. (2011). Le tecnologie fotovoltaiche.
- [35] Rodighiero, F. (2013). Integrazione di elementi di accumulo energetico in convertitori per impianti fotovoltaici domestici.

- [36] Picco, A. (2010). Analisi sui sensori: i sensori di temperatura.
- [37] <https://paolapozzolo.it/>
- [38] ASHRAE 55-1992. (1992). Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [39] F. J. Gravetter, L. B. Wallnau – Statistics for the Behavioral Sciences – Ninth Edition – 2013, 2010 Wadsworth, Cengage Learning