



Ricerca di Sistema elettrico

Studio della qualità ambientale indoor negli edifici pubblici del Sulcis: analisi del monitoraggio microclimatico della sede del Centro Ricerche Sotacarbo

G. Centi, D. Iatauro, C. Romeo, P. Signoretti, L. Terrinoni

STUDIO DELLA QUALITÀ AMBIENTALE INDOOR NEGLI EDIFICI PUBBLICI DEL SULCIS: ANALISI DEL MONITORAGGIO MICROCLIMATICO DELLA SEDE DEL CENTRO RICERCHE SOTACARBO

G. Centi, D. Iatauro, C. Romeo, P. Signoretti, L. Terrinoni (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Edifici a energia quasi zero (nZEB), Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici.

Parte B: Attività Polo Tecnologico del Sulcis

B.2 Attività ENEA

Obiettivo: Studio della qualità ambientale indoor negli edifici pubblici del territorio del Sulcis

Responsabile del Progetto: Luciano Terrinoni ENEA

Responsabile scientifico: Domenico Iatauro, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
SUMMARY	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 L'ANALISI DEL MICROCLIMA INDOOR E LA QUALITÀ AMBIENTALE NEGLI EDIFICI SOTTOPOSTI A RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA CON OBIETTIVO NZEB	5
1.2 L'ANALISI DEL THERMAL COMFORT NEGLI AMBIENTI CONFINATI	6
1.3 LA QUALITÀ DELL'ARIA INDOOR	7
1.4 OBIETTIVI DEL LAVORO	8
2 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO IN ESAME: IL COMPLESSO DEL CENTRO RICERCHE SOTACARBO	10
2.1 L'EDIFICIO PRINCIPALE	10
2.2 L'IMPIANTO TERMICO AL SERVIZIO DELL'EDIFICIO	13
3 IL MONITORAGGIO MICROCLIMATICO DELL'EDIFICIO	14
3.1 LA SCELTA DEI LOCALI DA MONITORARE	14
3.2 LE CENTRALINE DI MISURA.....	15
3.3 I DATI CLIMATICI ESTERNI	17
4 ELABORAZIONE DEI DATI MISURATI E ANALISI DEI RISULTATI	19
4.1 PROFILI ORARI DELLE GRANDEZZE MICROCLIMATICHE MISURATE.....	19
4.2 CALCOLO DEGLI INDICI DI FANGER PER LA VERIFICA DEL THERMAL COMFORT.....	27
4.3 INDICATORI DI DISCOMFORT LOCALE	39
4.4 IAQ ANALYSIS: LA CONCENTRAZIONE DI CO ₂ COME INDICATORE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA	42
5 CONCLUSIONI.....	47
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	48

Sommario

La direttiva 2010/31/UE sull'efficienza energetica negli edifici recepita in Italia dalla L. 90-2013, ha chiesto agli stati membri di definire dei requisiti minimi per la prestazione energetica ed ha introdotto, il concetto di edificio nZEB (nearly Zero-Energy Buildings) definito come: *"quell'edificio che ha prestazioni energetiche molto elevate e che richiede quindi un piccolo fabbisogno di energia, la maggior parte della quale deve essere fornita da fonti rinnovabili"*. In questo nuovo contesto particolare importanza ha assunto, nell'ambito delle diagnosi energetiche, la verifica della qualità dell'aria indoor e del benessere microclimatico.

Molti studi hanno, infatti, evidenziato che anche interventi efficaci dal punto di vista energetico possono influire negativamente dal punto di vista della qualità del microclima indoor, sia nei periodi di climatizzazione (es. insufficienti ricambi d'aria indotti dalla maggior tenuta dell'involucro) sia in quelli di non funzionamento degli impianti (overheating risk). Nel presente lavoro è presentata l'analisi del monitoraggio microclimatico dell'edificio sede del C.R. Sotacarbo, in Sardegna.

Le misure sono state condotte durante la stagione estiva del 2016 (Maggio-Luglio) in diversi ambienti selezionati e rappresentativi delle diverse tipologie presenti nell'edificio. Sono stati misurati i principali parametri microclimatici, (Tair, Trad, RH, Vair), e successivamente elaborati gli indicatori di comfort PMV e PPD, in conformità alle norme UNI 7730, e UNI 15251. E' stata inoltre analizzata la concentrazione di CO₂ quale indicatore della qualità dell'aria (IAQ analysis).

I risultati del monitoraggio, che potrà essere ripetuto in altri periodi dell'anno, consentiranno di avere un quadro completo del microclima indoor e potranno integrare quanto emerso dalla diagnosi energetica dell'edificio, per la definizione di interventi di energy saving e di miglioramento del comfort interno.

Parole chiave: edifici, efficienza energetica, benessere termoigrometrico, qualità dell'aria indoor

Summary

The European Directive 2010/31/EU on energy efficiency, transposed in Italy by Law 90/2013, asked to member state to setting up the minimum energy performance requirements for new and existing buildings that undergo major renovation, in order to achieve progressively, in the next years, the target of Nearly Zero Building (nZEB), defined as: "buildings that have very high energy performance, and the low amount of energy that these require, comes mostly from renewable sources".

Furthermore the directive highlights the importance of the indoor climate and air quality, in the evaluation method of energy demand of the building. Many studies, in fact, have shown how, the energy saving actions on the building can adversely affect the indoor microclimate, and lead to negative effects such as: inadequate ventilation induced by high air-tightness of envelope, increasing risk of overheating of building in the not air-conditioning season, increasing cooling energy demand in summer. In this new context, the assessment of thermal comfort and indoor air quality, will play a crucial role in the energy audit of buildings.

In this report is described the indoor monitoring of the C.R. Sotacarbo, located in Carbonia (Sardinia). The measurements were carried out in the Summer 2016 (June-July) in some selected room representative of the different type of environment present in the building (office, laboratory, conference room, etc). The main microclimatic parameters were measured and furthermore processed to evaluate the Fanger thermal comfort indexes PMV and PPD, in accordance with relevant standards (UNI 7730, UNI 15251). The carbon dioxide concentration CO₂, strictly linked to the ventilation rate of building, was also analyzed as indicator of the air quality. The results of monitoring, compared with findings of further measurements campaign, can provide an overview of the indoor microclimate of building and give important indications to address the energy saving measures, taking into account thermal and environmental comfort criteria.

Keywords: buildings, energy efficiency, Thermal comfort, IAQ analysis.

1 Introduzione

1.1 *L'analisi del microclima indoor e la qualità ambientale negli edifici sottoposti a riqualificazione energetica con obiettivo nZEB*

La *Direttiva 2010/31/UE*, recepita in Italia dalla legge 90/2013 e s.m.i. (ad integrazione del D.lgs. 192/2005), richiedeva agli stati membri dell'UE di definire dei requisiti minimi per la prestazione energetica di tutti gli edifici nuovi o sottoposti a ristrutturazione rilevante, con l'obiettivo di incrementare l'efficienza energetica del patrimonio immobiliare, che a livello europeo incide per circa il 40% degli usi finali di energia.

Tali requisiti, relativi ai componenti edilizi ed agli impianti, sono stati definiti in base ad una *Cost Optimal Analysis*, finalizzata ad individuare i livelli ottimali in funzione dei costi, intesi come quei livelli di prestazione energetica, che conducono al costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato dell'edificio. La Direttiva ha introdotto inoltre, il concetto di edificio nZEB (nearly Zero-Energy Buildings) definito come *“quell'edificio che ha prestazioni energetiche molto elevate e che richiede quindi un piccolo fabbisogno di energia, la maggior parte della quale deve essere fornita da fonti rinnovabili”*.

Gli standard energetici (MEPS), che caratterizzano gli edifici a energia quasi zero, nZEB, sono stati fissati successivamente dal DM 26/6/2015 e diventeranno obbligatori entro il 31 Dicembre 2020 per tutti gli edifici di nuova costruzione ed entro 31 dicembre 2018 gli edifici nuovi, occupati o di proprietà di enti pubblici. Sarà pertanto importante assicurarsi che, ad un elevato livello di efficienza energetica derivante dall'adozione di tali standard, segua un altrettanto elevato livello di comfort e qualità ambientale dell'edificio. La verifica dei parametri microclimatici indoor, infatti, è un aspetto cui non sempre, nelle diagnosi energetiche degli edifici, viene data la dovuta attenzione.

E' stato più volte riscontrato che anche interventi efficaci dal punto di vista energetico avessero effetti negativi sulla qualità del microclima indoor, come ad esempio: insufficienti ricambi d'aria indotti dalla maggior tenuta dell'involucro, surriscaldamento degli ambienti nei periodi di non climatizzazione (overheating risk), incremento della domanda energetica per la climatizzazione estiva, ecc.

Per evitare tali rischi, è pertanto necessario effettuare insieme alla diagnosi energetica, un'attenta analisi del microclima indoor dell'edificio, in modo da indirizzare gli interventi di riqualificazione verso opportuni standard di comfort termico e qualità dell'aria. Diverse ricerche (HealthVent project EU/2013) hanno infatti recentemente evidenziato la necessità di integrare l'implementazione delle norme relative all'efficienza energetica degli edifici (EPBD), con la definizione di standard e soluzioni tecniche avanzate per la qualità dell'aria indoor (IAQ), in modo da ottenere convergenza tra riduzione dei consumi energetici ed elevati livelli di comfort per gli occupanti.

Benché la Direttiva EPBD, infatti, richiami esplicitamente in più punti l'importanza della verifica del microclima interno, nell'ambito delle riqualificazioni energetiche degli edifici *(Le misure per l'ulteriore miglioramento della prestazione energetica degli edifici dovrebbero tenere conto delle condizioni climatiche e locali, nonché dell'ambiente termico internoLa prestazione energetica degli edifici dovrebbe essere calcolata in base ad una metodologia, che....comprende, oltre alle caratteristiche termiche, altri fattori che svolgono un ruolo di crescente importanza, come il tipo di impianto di riscaldamento e condizionamento, l'impiego di energia da fonti rinnovabili....la qualità dell'aria interna.)* ad oggi, non sono ancora previsti dalle normative nazionali, controlli obbligatori o valori limite per parametri indicativi del comfort termoigrometrico. D'altro canto, esistono normative tecniche specifiche che forniscono invece indicazioni precise sulle misure da effettuare, sull'elaborazione di opportuni indicatori in funzione del tipo di edificio, per raggiungere condizioni di benessere termoigrometrico e di qualità dell'aria indoor.

In quest'ottica appare evidente come, la verifica del thermal comfort e della qualità dell'aria indoor rappresenti un target fondamentale di cui tener conto nell'ambito di una riqualificazione energetica.

Tale aspetto, assume ancor più rilevanza nel caso riqualificazioni verso nZEB di edifici pubblici quali uffici, scuole, università, ospedali, in cui il rispetto del comfort e la qualità dell'aria risulta delicato ed al tempo stesso essenziale per garantire condizioni psicofisiche ottimali durante le attività svolte. Soprattutto nel caso di riqualificazioni avanzate, è importante infatti, che fin dalla fase di progettazione gli interventi siano indirizzati verso standard opportuni del microclima interno.

Negli edifici esistenti inoltre, i numerosi vincoli di natura costruttiva dovuti all'epoca degli immobili, possono rendere molto difficoltoso il raggiungimento di standard elevati in termini di risparmio energetico e comfort, e incidere notevolmente sulla fattibilità tecnica ed economica delle misure individuate. Sarà quindi opportuno nella scelta delle soluzioni tecnologiche più avanzate, atte a garantire condizioni ottimali di climatizzazione e qualità dell'aria, considerare anche le implicazioni economiche che esse richiedono.

1.2 L'analisi del Thermal comfort negli ambienti confinati

La percezione di comfort generale degli occupanti di un ambiente dipende da vari aspetti quali: il comfort termico, la qualità dell'aria interna, la qualità acustica e comfort visivo. Benché la sensazione di comfort sia di tipo soggettivo, essa può essere valutata attraverso la misura di una serie di parametri ambientali, nonché l'elaborazione di opportuni indicatori. A partire dagli anni '60, molti studi infatti sono stati indirizzati all'analisi del thermal comfort negli ambienti confinati, ed alla possibilità di definire degli indicatori, funzione dei parametri ambientali, che riuscissero ad esprimere una stima quantitativa della sensazione termica percepita dagli occupanti (Fanger 1970)

Questi indici, basati sulla teoria del bilancio termico del corpo umano, e supportati da studi statistici rappresentano ormai un approccio consolidato ed ad essi si rifanno le principali normative tecniche in materia quali la UNI 7730, UNI 15251. I modelli di calcolo principali per la valutazione del comfort termico sono:

- modello di Fanger, da usarsi in presenza di un sistema di condizionamento attivo
- modello di comfort detto *Adattivo*, dedicato invece agli edifici sprovvisti di un impianto di condizionamento meccanico (si considera la capacità di adattamento del corpo umano alle condizioni termoigrometriche dell'ambiente)

E' importante sottolineare che la sensazione termica dell'uomo non dipende dalla temperatura del posto in cui ci si trova, ma dalla quantità di energia che viene scambiata con l'ambiente circostante. Tale bilancio di energia termica, è influenzato oltre che dall'attività fisica e dall'abbigliamento, da 4 grandezze fisiche fondamentali:

- temperatura dell'aria,
- temperatura media radiante,
- velocità dell'aria
- umidità dell'aria.

Dalla misura o dal calcolo di questi parametri, è possibile quindi prevedere la sensazione termica del corpo ed esprimerla mediante opportuni indicatori (PMV e PPD).

L'indice PMV (*Predicted Mean Vote, voto medio previsto*) fornisce infatti una stima della sensazione termica espressa da un certo numero di persone esposte allo stesso ambiente. Esso rappresenta quantitativamente un valore medio, riferito all'utenza in esame, della sensazione di comfort o discomfort sentita.

L'indice PPD (*Percentage Predicted Dissatisfied, percentuale prevista d'insoddisfatti*), esprime invece il disagio termico percepito, stimando la percentuale di utenti che in un certo ambiente, manifestano

insoddisfazione per troppo caldo o troppo freddo. Il PPD è chiaramente correlato al valore assunto dal PMV.

Talvolta il disagio termico può essere causato anche da un eccesso raffreddamento o riscaldamento locale del corpo. Le cause più comuni di disagio locale sono:

- l'asimmetria della temperatura radiante (dovuta a superfici troppo calde o fredde),
- le correnti d'aria (raffreddamento di una parte del corpo causato dal movimento eccessivo dell'aria),
- eccessive differenze della temperatura dell'aria in funzione dell'altezza (distribuzione verticale della T)
- superfici eccessivamente (pavimenti o solai) fredde o calde.

Anche il discomfort di tipo locale può essere espresso mediante opportuni indicatori secondo la UNI 7730. La formulazione analitica, nonché i range di variazione dei principali indicatori di comfort, sarà meglio descritto nel capitolo 4.

1.3 La qualità dell'aria indoor

Altro aspetto di particolare importanza, nella verifica delle condizioni di comfort di un edificio è l'analisi della qualità dell'aria (*Indoor Air Quality*, IAQ), che come noto, è legata alla presenza di sostanze inquinanti all'interno degli ambienti confinati. Diverse sono infatti le possibili fonti di inquinamento dell'aria negli edifici, sia di provenienza esterna che interna, Figura 1 :

INQUINANTI	FONTI
Asbesto e Fibre minerali sintetiche	Materiali da costruzione, isolanti
Anidride carbonica (CO ₂)	Occupanti (respirazione), combustioni
Antiparassitari	Legno, aria esterna
Composti organici volatili (COV o VOC)	Arredamenti, fumo, prodotti per la pulizia, isolanti
Formaldeide (o Aldeide formica: HCHO)	Arredamenti
Fumo di tabacco (ETS)	Abitudine voluttuaria al fumo degli occupanti
Ossidi di azoto (NO e NO ₂)	Fumo di tabacco, stufe con bruciatore a camera aperta
Ossido di carbonio (CO)	Sistemi di riscaldamento e cottura, fumo di tabacco
Ozono (O ₃)	Aria esterna, strumenti elettrici ad alto voltaggio
Particolato inalabile	Fumo di tabacco, fonti di combustione, attività degli occupanti
Inquinanti microbiologici	Occupanti, animali domestici, impianti di condizionamento, aria esterna, piante
Radon	Suolo, acqua, materiali da costruzione

Fig. 1

Una elevata concentrazione, nei luoghi di lavoro o di residenza, influirà negativamente sulla qualità dell'aria stessa, portando ad una ampia serie di possibili disturbi, che possono essere definiti come *Sick Building Syndrome* (SBS), o sindrome da edificio malato.

In edifici in cui la presenza di sostanze inquinanti è ritenuta esigua, in quanto le fonti interne appaiono limitate (materiali ad elevato rilascio di sostanze VOC, fumo di sigaretta, polveri e particolato, ecc) come può accadere per scuole o uffici pubblici, l'analisi della qualità dell'aria indoor, può essere ricondotta alla misura della concentrazione di bioeffluenti, legati sostanzialmente alla presenza degli occupanti.

Tra questi, la concentrazione di CO₂ rappresenta un buon indicatore della qualità dell'aria in quanto, diversi studi hanno mostrato una buona correlazione al grado di soddisfazione degli utenti (Fig. 2, %, in ordinata)

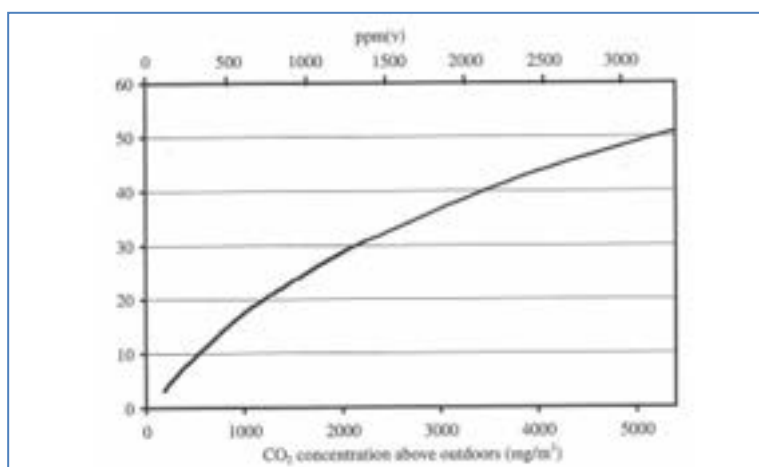


Fig. 2

Elevate concentrazioni di anidride carbonica, possono determinare non solo uno stato di disagio degli occupanti, ma influire direttamente sulle condizioni psicofisiche degli stessi fino a causare disturbi gravi nei casi più estremi.

La CO₂ può essere quindi considerata come un indicatore importante per la valutazione del tasso di ventilazione di un ambiente e per valutare l'eventuale installazione di impianti di ventilazione meccanica controllata (VMC). I sistemi più avanzati utilizzano sensori di misura della concentrazione di CO₂ per determinare le portate d'aria ottimali da immettere nell'ambiente. Valori raccomandati per i tassi di ricambio dell'aria in funzione della CO₂ sono inoltre riportati sulle normative tecniche quali la UNI 13779, e la UNI 15251.

1.4 Obiettivi del lavoro

L'edificio in esame, sede del Centro Ricerche Sotacarbo, a partire dallo scorso anno, è stato oggetto di un'analisi preliminare volta ad individuare possibili criticità dal punto di vista energetico: è stata infatti avviata un'attività di caratterizzazione dell'involucro edilizio e di valutazione dei consumi energetici relativi agli ultimi anni. Era stata inoltre predisposta una campagna di misure in sito per la verifica dei principali parametri microclimatici e ambientali, durante i periodi di climatizzazione.

Viste le differenti tipologie di ambienti presenti nel complesso (uffici di diversa superficie, laboratori, officine, archivi, auditorium) caratterizzati da un profilo di utilizzo e occupazione molto diverso, è sembrato opportuno infatti valutare le effettive condizioni del microclima interno attraverso misurazioni in loco, prima di procedere con eventuali simulazioni mediante software.

Il monitoraggio microclimatico indoor, sarà quindi di supporto alla diagnosi energetica in corso, in quanto per definire possibili interventi di riqualificazione energetica, miranti alla riduzione dei consumi di energia, è importante verificare se gli impianti, nel loro funzionamento, garantiscono un adeguato livello di comfort per gli occupanti.

La verifica del benessere termoigrometrico indoor infatti, spesso trascurata, rappresenta uno step essenziale di una diagnosi energetica, e andrebbe effettuata sia prima che dopo la realizzazione degli interventi, per verificare gli effetti delle misure di riqualificazione attuate.

L'acquisto e l'installazione di 5 centraline di misura per il monitoraggio microclimatico indoor avvenuta nel corso di quest'anno, ha consentito di avviare una campagna di monitoraggio sistematico dell'edificio per

verificare le condizioni microclimatiche sia durante i periodi di funzionamento degli impianti, sia nei mesi intermedi in cui gli ambienti non subiscono alcuna climatizzazione.

Dopo alcuni misure spot, eseguite durante il periodo invernale, in cui non sono emerse particolari anomalie, è stato deciso di focalizzare l'attenzione sul periodo estivo, nel quale, considerando la posizione geografica e le caratteristiche climatiche di Carbonia, la domanda energetica poteva risultare molto rilevante.

Il comune di Carbonia infatti, applicando la zonizzazione in fasce climatiche introdotta da ENEA e basata sull'Indice di Severità Climatica (ISC), risulta essere in zona E con un indice di 1866 [5], valore piuttosto alto.

Il monitoraggio descritto in seguito, è parte di una più ampia campagna di misure, che continuerà nei prossimi mesi allo scopo di valutare le condizioni ambientali generali indoor della sede di CR Sotacarbo: comfort termico, qualità dell'aria, e comfort visivo.

E' importante considerare che l'impianto installato, come meglio descritto nel capitolo successivo, è dotato di fan-coil la cui regolazione, è disposta dagli utenti. I risultati saranno quindi indicativi di come vengono effettivamente climatizzati i diversi ambienti in funzione delle caratteristiche dei locali, ma anche delle scelte degli occupanti, che durante il periodo di monitoraggio hanno mantenuto i comportamenti abituali. Di tale aspetto si dovrà tener conto nell'analisi e nel confronto dei risultati.

Le centraline installate continueranno inoltre a raccogliere dati relativi alle condizioni microclimatiche dell'edificio anche nei prossimi mesi. Ciò consentirà di poter disporre di un'ampia base di dati relativa a diversi periodi dell'anno.

I dati raccolti potranno quindi essere confrontati con quelli degli energy meters installati sugli impianti, in modo da essere correlati al consumo energetico. Essi inoltre potranno costituire una valida *baseline* per successive e ulteriori simulazioni necessarie alla definizione di interventi di energy saving sull'edificio.

2 Descrizione dell'edificio in esame: il complesso del Centro Ricerche Sotacarbo

2.1 L'edificio principale

La sede del Centro Ricerche Sotacarbo, oggetto del monitoraggio, sorge all'interno del complesso della Grande Miniera di Serbariu, costruito alla fine degli anni trenta. L'area complessiva, di circa 13000 m², è stata adibita a Centro Ricerche nel 2008 ed ospita attualmente diversi edifici ed impianti dimostrativi sperimentali, finalizzati alle tecnologie di trattamento del carbone.

L'edificio principale, ricavato all'interno di un ex Magazzino materiali e ristrutturato nel corso degli anni, è costituito da un corpo di fabbrica originario con struttura portante in pietra adibito oggi prevalentemente ad uffici e laboratori; e da un corpo nuovo, adibito ad uso officine, realizzato in calcestruzzo armato prefabbricato; E' presente inoltre, all'interno della corte centrale, una nuova costruzione adibita ad Auditorium, e 2 sale conferenze indipendenti dai corpi precedenti. La planimetria del complesso principale, piuttosto articolata, è riportata di seguito:

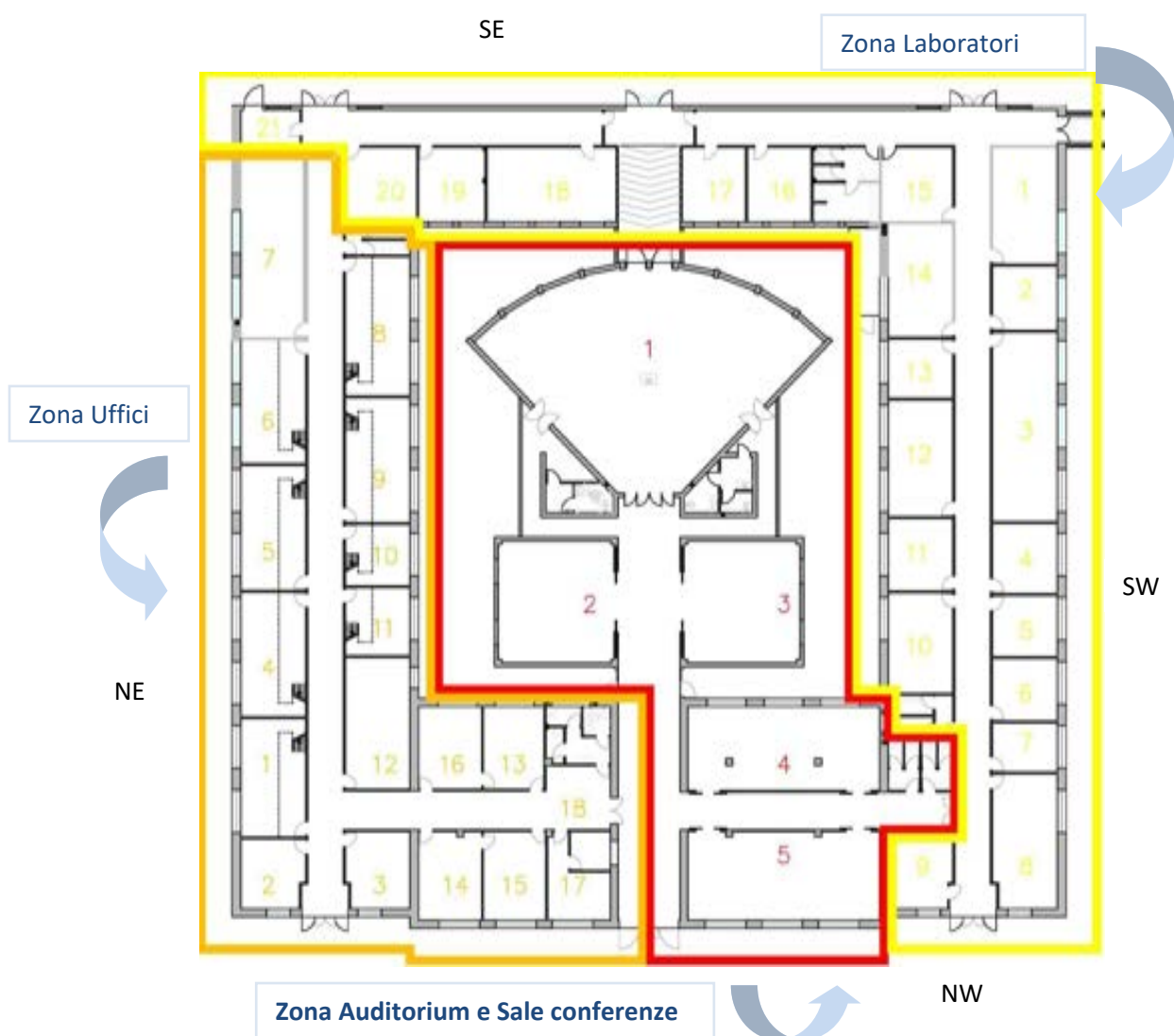


Figura 3 Planimetria generale

Le superfici vetrate sono dotate nella maggior parte dei casi di infissi con telaio in legno e vetro singolo (Figg. 4-5) (uffici e laboratori con esposizione a NE, SW e NW). Sono invece presenti delle finestre con telaio metallico e vetro singolo in alcuni locali con esposizione NW, ed alcune del tipo non apribili, a SW. Nessuna finestra è invece dotata di schermature solari.



Fig 4



Fig 5

Il monitoraggio è stato maggiormente focalizzato nella zona uffici, individuata con colore arancio nella planimetria, in quanto occupata dagli utenti in modo continuativo.

In questa, costituita da locali di diversa superficie ed esposizione, è possibile distinguere 2 tipologie di uffici: quelli grandi, dotati di soppalco, in cui sono presenti 4-5 postazioni di lavoro; quelli più piccoli occupati generalmente da uno o massimo due utenti. Altre misure sono state effettuate nei locali laboratori, cercando di individuare quelli maggiormente utilizzati.

Le figure (6-7-8-9-10-11) riportate di seguito mostrano degli esempi delle varie tipologie di ambienti:



Figg. 6-7 Ufficio grande: zona soppalco



Figura 8-11: Ufficio grande: zona sottostante (8-9), ufficio (10) singolo e laboratorio cromo ionico (11)

L'altro ambiente rilevante dal punto di vista dell'analisi del microclima indoor è l'Auditorium. Esso è utilizzato per convegni e conferenze in modo non continuativo, ha una superficie di circa e può ospitare fino a 150 persone circa. Costruito in calcestruzzo armato, è dotato di una copertura in legno in legno lamellare, Figg. 12-13



Figura 12-13 Auditorium

2.2 L'impianto termico al servizio dell'edificio

L'impianto termico, al servizio dell'intero complesso del C.R. Sotacarbo, è di tipo idronico. L'acqua, riscaldata nella stagione invernale e refrigerata nella stagione estiva, è distribuita quindi allo stesso tipo di terminali, i fancoils, nei vari ambienti climatizzati (Fig. 15). Il generatore (Fig. 14) è costituito da una Pompa di calore ad acqua con potenza di circa 180 kW per il riscaldamento ed è stato installato nel 2007.



Fig. 14

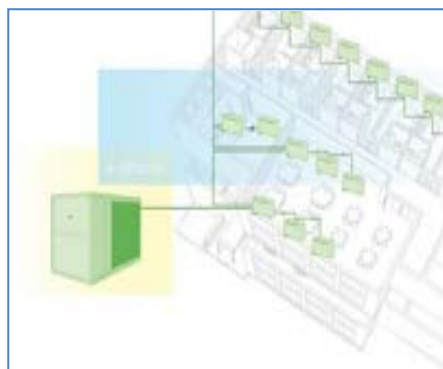


Fig. 15

I terminali sono costituiti da unità ventilconvettori (fan-coils) installati a soffitto nella zona uffici e nei laboratori, ed a parete nell'auditorium. (Figure 16-17)



Fig. 16



Fig. 17

Nei fancoils l'aria prelevata dal locale, dopo essere stata filtrata, è inviata alla batteria di scambio (aria-acqua), nella quale, a seconda della stagione, assorbe o cede calore; successivamente, mediante il ventilatore elettrico viene diffusa nell'ambiente alla temperatura di set-point regolata (generalmente 20°C riscaldamento, 26°C climatizzazione estiva).

La regolazione dei singoli ventilconvettori è gestita, seppur non in maniera fine, dagli utenti, che possono regolare sia l'intensità del flusso, sia qualitativamente, la temperatura.

Se non abbinati a impianti di ventilazione meccanica e/o UTA (unità trattamento aria) come avviene generalmente negli impianti di climatizzazione misti aria/acqua, i fancoils non garantiscono un completo controllo dell'umidità relativa dell'aria.

3 Il monitoraggio microclimatico dell'edificio

3.1 La scelta dei locali da monitorare

Per valutare le condizioni microclimatiche dell'edificio si è cercato di esplorare un numero elevato di locali, con caratteristiche diverse. Le centraline di misura sono state quindi poste in ambienti diversi e spostate ogni settimana.

La zona maggiormente esaminata è stata chiaramente la zona uffici : negli uffici più grandi, quelli soppalcati sono state poste due centraline per monitorare separatamente le due zone ed evidenziarne le differenze.

Le centraline di misura (numerate da C1 a C5 in Tab. 1), installate opportunamente in accordo alla UNI 7726, hanno acquisito i dati relativi alle principali grandezze termoigrometriche in continuo, con frequenza di acquisizione di 10 min.

La tabella 1 riportata di seguito riporta tutti i locali esaminati :

		Centraline Microclima indoor				
Settimana lavorativa		C1	C2	C3	C4	C5
1	23 Mag-28 Mag	Uff. 8 p.terra (3 persone)	Uff. 6 p.terra (3 persone)	Uff. 6 sop. (2 persone)	Uff. 14 (1 persona)	Uff. 8 sop. (2 persone)
2	30 Mag- 3Giu	Uff. 9 p.terra (3persone)	Uff. 5 p.terra (3 persone)	Uff. 5 sop. (2 persone)	Uff. 11 (1 persona)	Uff. 9 sop. (2 persone)
3	6 Giu -10 Giu	Uff. 8 p.terra (3persone)	Uff. 4 p.terra (3 persone)	Uff. 4 sop. (2 persone)	Uff. 10 (1 persona)	Uff. 8 sop. (2 persone)
4	13 Giu -17 Giu	Uff. 9 sop. (2persone)	Uff. 5 terra (3 persone)	Uff. 5 sop. (2 persone)	Uff. 9 p.terra (3 persone)	Uff. 8 sop. (2 persone)
5	20 Giu -24 Giu	Uff. 16 (1persona)	Uff. 14 (1 persona)	Uff. 15 (2 persone)	Uff. 10 (1 persona)	Lab 2
6	28 Giu -04 Lug	Stanza 2 Near Auditorim	Sala calcolo STANZA12	Stanza 3 Near Auditorium	Auditorium (Ala sinistra)	Auditorium (Ala destra)
7	04 Lug -11 Lug	Uff. 5p.terra (3 persone)	Uff. 6 sop. (2 persone)	Uff. 5 sop. (2 persone)	Lab 16 crom.ionico (1 persona)	Uff. 6 p.terra (2 persone)
8	11 Lug - 18 Lug	Uff. 5p.terra (3persone)	Uff. 6 sop. (2 persone)	Uff. 5 sop. (2 persone)	Lab 16 crom.ionico (2 persona)	Uff. 6 p.terra (2 persone)

Tab. 1

Come evidente dalla tabella, nel periodo in esame 23 Mag-18 Lug, sono stati complessivamente monitorati 15 diversi ambienti tra uffici, laboratori e sale conferenze, dando chiaramente maggior attenzione ai locali ad uso ufficio, caratterizzati da maggior presenza di personale.

Dopo aver analizzato a livello generale gli andamenti delle grandezze misurate per tutti i locali esaminati, sono stati selezionati 5 diversi ambienti ritenuti rappresentativi delle varie tipologie presenti:

- Ufficio 6 Piano terra e Soppalco
- Ufficio 9 Piano terra e Soppalco
- Ufficio 15
- Laboratorio 16
- Auditorium

Nei locali più grandi come gli uffici soppalcati e l'auditorium sono state installate due centraline per evidenziare eventuali difformità nelle condizioni indoor.

Gli altri locali esaminati, riconducibili alle stesse tipologie, hanno mostrato risultati sostanzialmente simili.

In alcuni casi i dati a disposizione presentavano mancanze dovute ad interruzioni della trasmissione dati da parte degli strumenti. Successivamente i dati di misura sono stati prima filtrati per escludere giorni festivi e poi elaborati.

I profili orari delle grandezze microclimatiche sono stati analizzati sia negli orari di funzionamento degli impianti sia nelle ore di assenza di climatizzazione.

Il calcolo degli indici di comfort (PMV e PPD) e l'analisi della concentrazione di CO₂, sono stati invece effettuati nell'orario di servizio 9,00 -17,00 in cui c'era piena occupazione dei locali.

3.2 Le centraline di misura

Per il monitoraggio delle principali grandezze microclimatiche e ambientali indoor, sono state installate delle centraline portatili integrate con diversi sensori di misura:

- Sensore termoigrometrico: per rilevare la temperatura e l'umidità relativa dell'aria, posto all'interno di uno schermo antiradiazione solare.
- Sensore globotermometrico: per la misura della temperatura media radiante.
- Sensore anemometrico per la misura della velocità e la direzione dell'aria.
- Sensore di CO₂: per misurare concentrazione di anidride carbonica nell'ambiente

Tutti i sensori sono stati installati in conformità a quanto previsto dalla UNI 7726.

Le figure riportate di seguito mostrano la stazione portatile integrata (Fig. 18) e i singoli sensori di misura Fig 19-22.



Fig 18



Fig 19



Fig 20



Fig 21



Fig 22

La strumentazione è inoltre dotata di un data-logger, alimentato a batteria, in grado di registrare i dati misurati e trasmetterli mediante collegamento di rete GSM/GPRS, consentendo così la lettura ed il controllo delle misure in corso mediante accesso remoto via web.

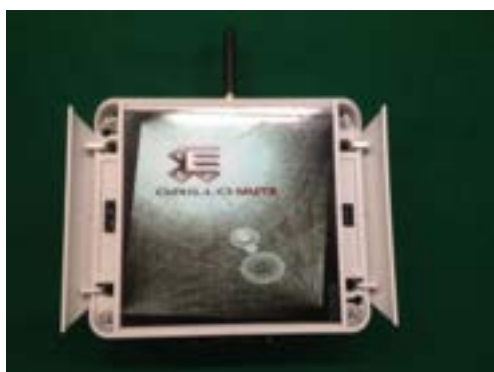
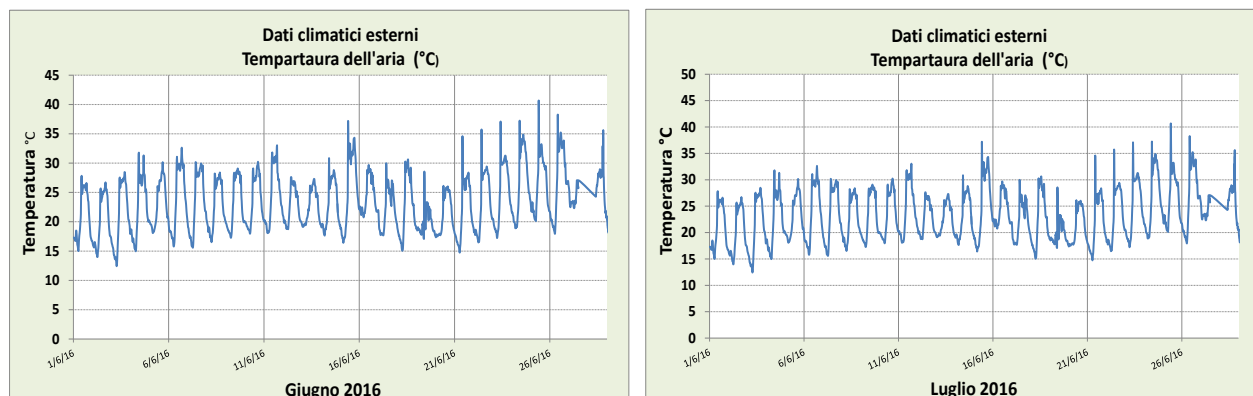


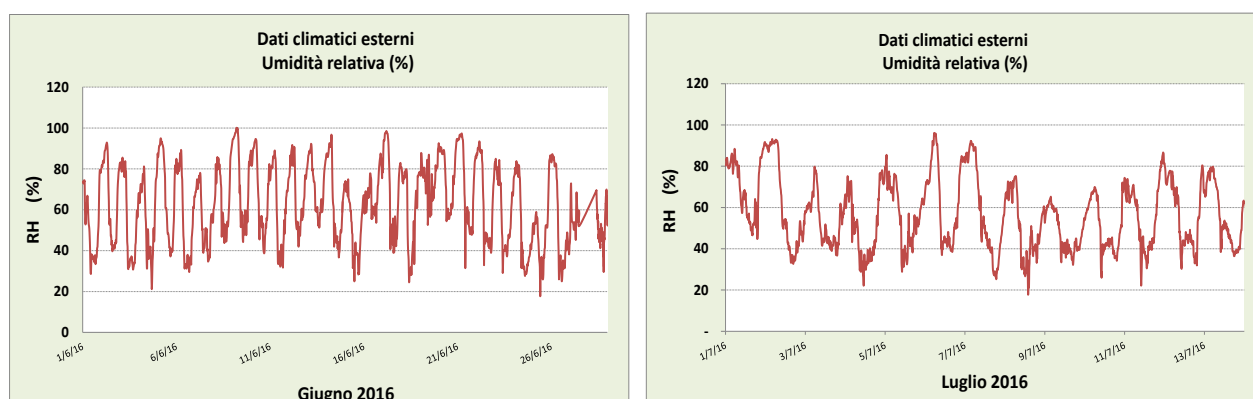
Fig 23

3.3 I dati climatici esterni

In parallelo al monitoraggio dei parametri microclimatici indoor sono state misurate le principali grandezze climatiche esterne: la temperatura dell'aria e l'umidità relativa. Ciò consente di poter verificare la situazione indoor al variare delle condizioni climatiche del luogo.



Figg. 24-25



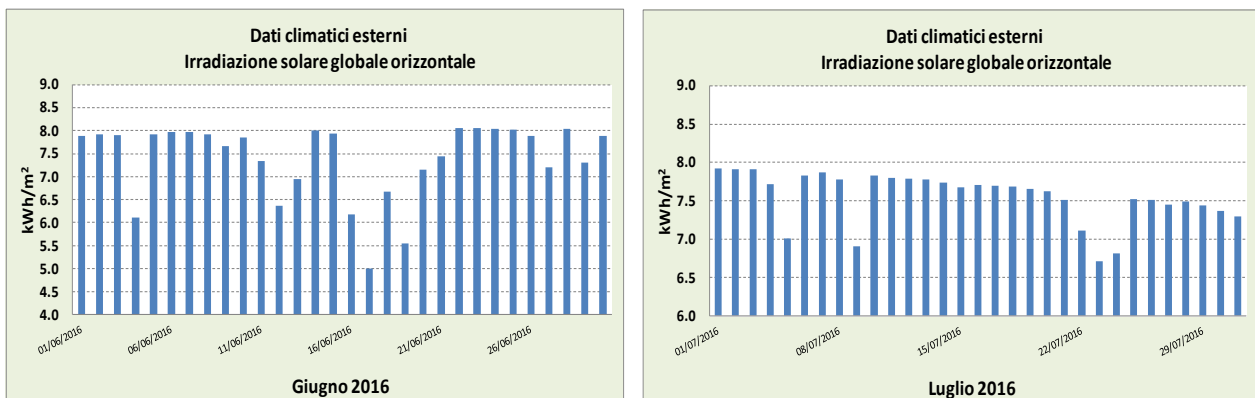
Figg. 26-27

L'analisi del microclima indoor in rapporto alle variabili climatiche esterne è utile per evidenziare la risposta dell'impianto, e degli utenti mediante la regolazione, alle diverse condizioni termiche del luogo. Per i vari locali esaminati, sono stati in seguito riportati i dati medi di temperatura e umidità relativa, calcolati nell'orario di servizio 9,00 - 17,00, in modo da poterli confrontare con i profili orari delle variabili microclimatiche.

Ai fini della climatizzazione estiva, oltre alla temperatura esterna dell'aria ed all'umidità relativa, assume grande rilevanza anche la radiazione solare incidente sull'edificio, che come noto, se non opportunamente schermata può determinare apporti termici notevoli sia attraverso le superfici trasparenti, sia quelle opache.

Il contributo della radiazione solare, certamente influente sul fabbisogno energetico, non è stato invece riportato nelle tabelle in quanto il calcolo dell'apporto termico dovuto all'irraggiamento sui diversi ambienti esaminati avrebbe richiesto la valutazione della radiazione incidente su una data esposizione, (variabile nelle diverse ore del giorno), nonché l'effettiva penetrazione nell'ambiente al netto di oggetti o eventuali schermature .

Sono di seguito riportati gli andamenti medi giornalieri dell'Irradiazione solare sul piano orizzontale relativa al Comune di Carbonia, relativi ai mesi di monitoraggio, Giugno-Luglio 2016 (Atlante della Radiazione solare ENEA [6])



Figg. 28-29

4 Elaborazione dei dati misurati e analisi dei risultati

4.1 Profili orari delle grandezze microclimatiche misurate

Prima del calcolo di specifici indicatori per la valutazione del thermal comfort e della qualità dell'aria, sono stati analizzati i profili orari delle principali grandezze termoigrometriche misurate nei 5 ambienti selezionati. Vengono di seguito riportati gli andamenti orari della **Tair**, **Trad**, **RH**, **Vair** sia per le ore di occupazione (orario uffici 9,00 – 17,00 zone in giallo), sia per quelle di non occupazione.

Ufficio 9 esposizione SW (Settimana 13 – 17 Giugno)

Presenze persone		Dati climatici esterni (media orario 9-17)	
Piano Terra	3	Tair (°C)	27,5
Soppalco	2	RH (%)	50,8

Tab 2-3

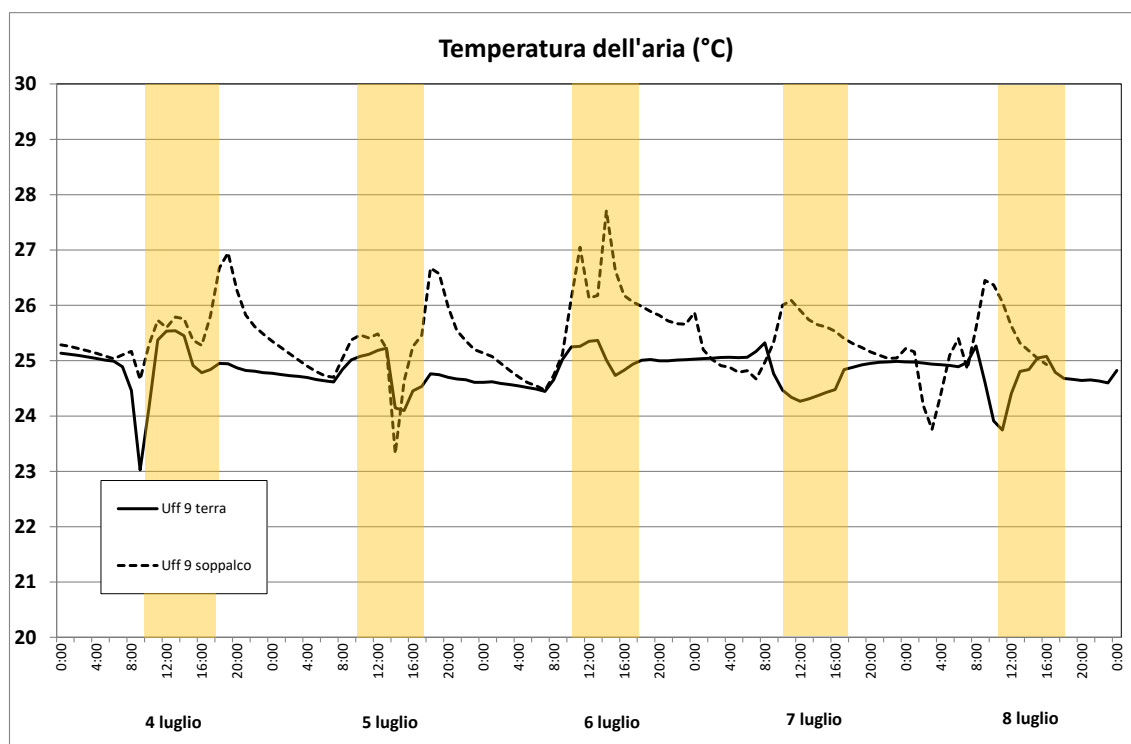


Fig 30

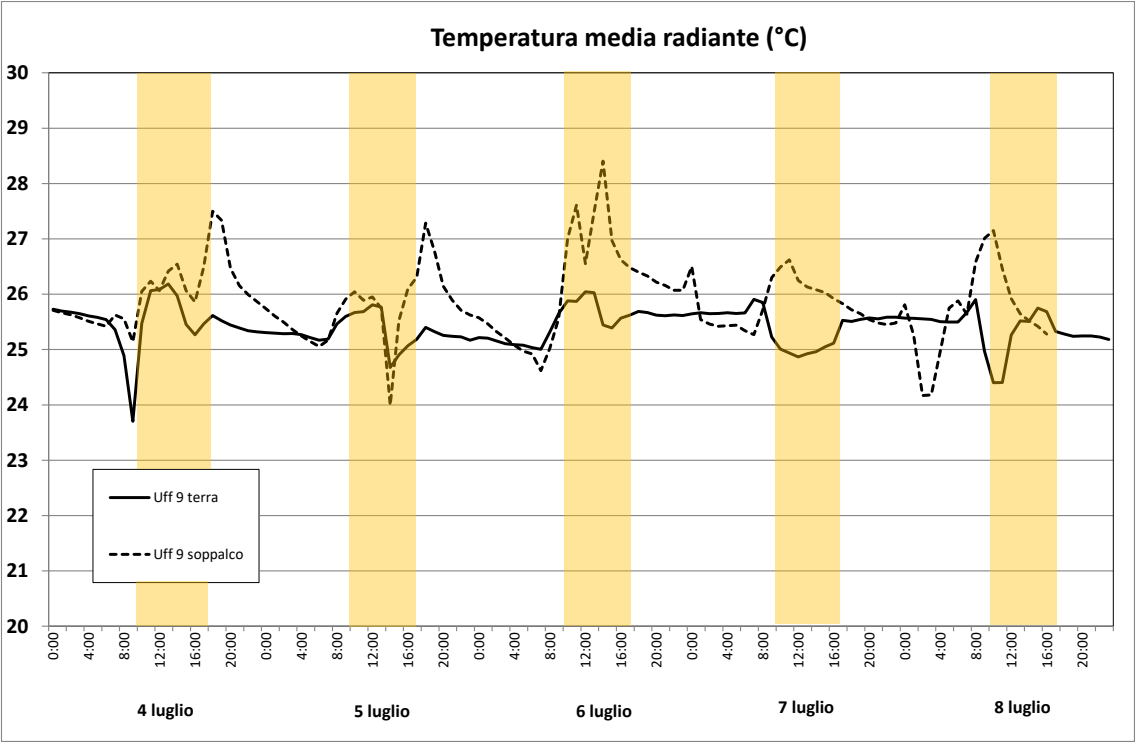


Fig 31

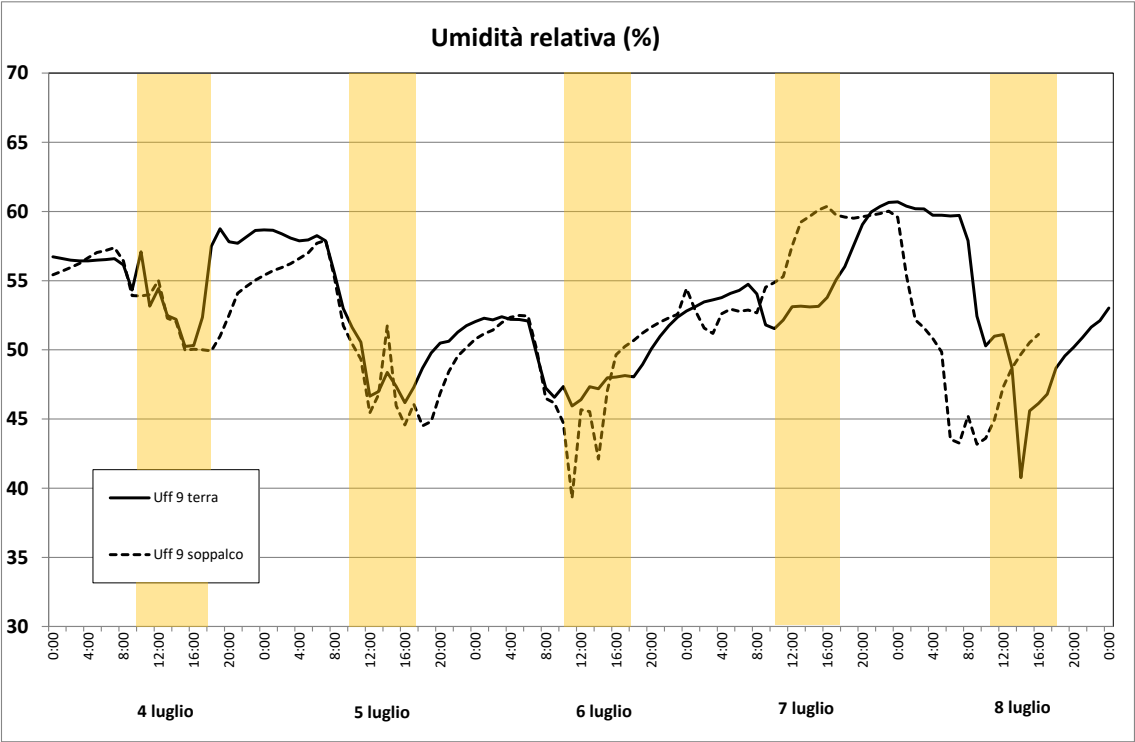


Fig. 32

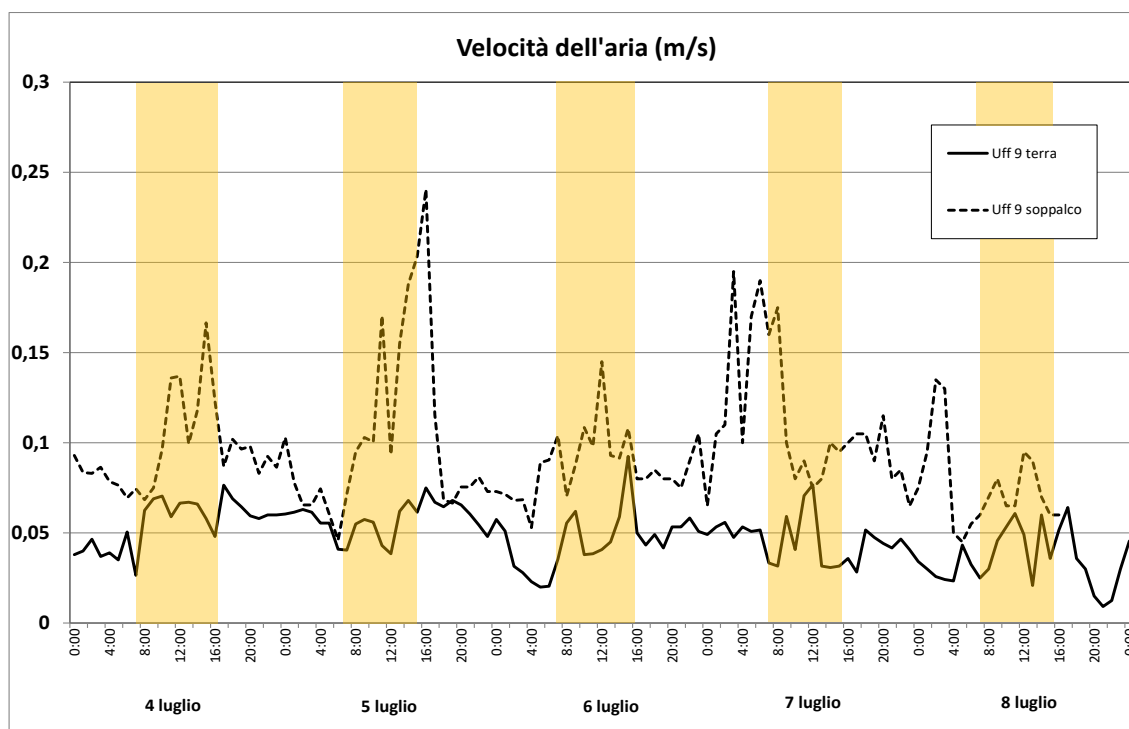


Fig 33

Ufficio 6 esposizione NE e Laboratorio 16 esposizione NW (Settimana 4-8 Luglio)

Presenze persone	
Uff. 6 Piano Terra	3
Uff. 6 Soppalco	2
Labor. 16	2

Dati climatici esterni (media)	
Orario 9-17	
Tair (°C)	31,8
RH (%)	39

Tab 4-5

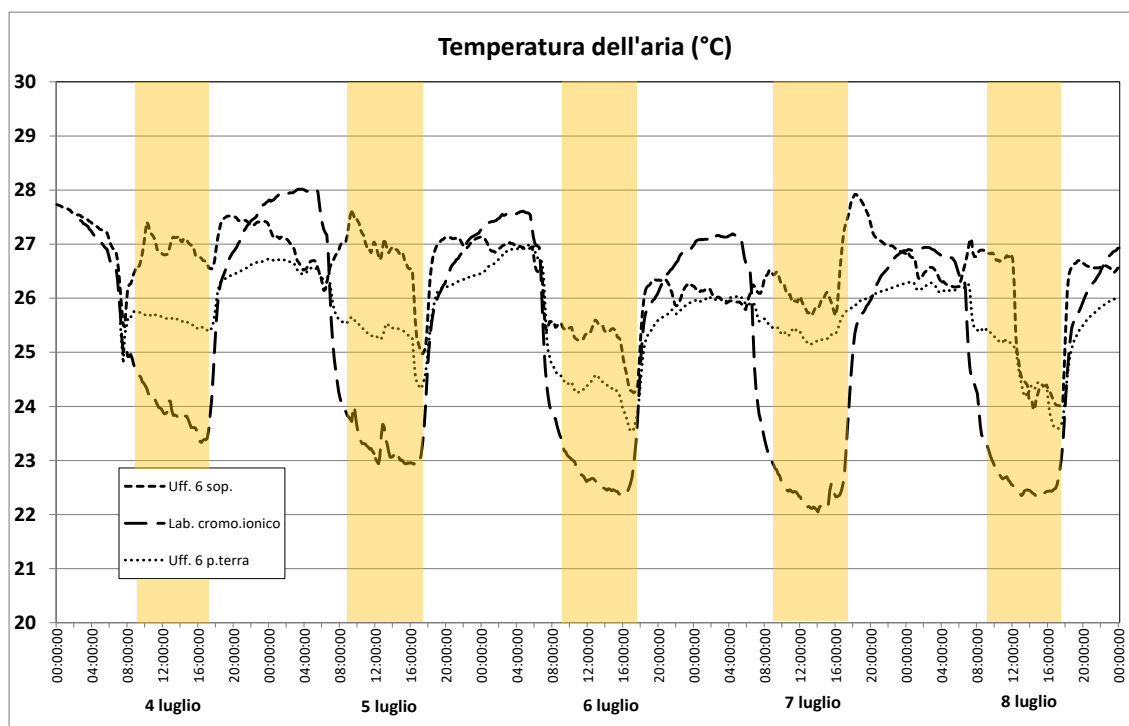


Fig 34

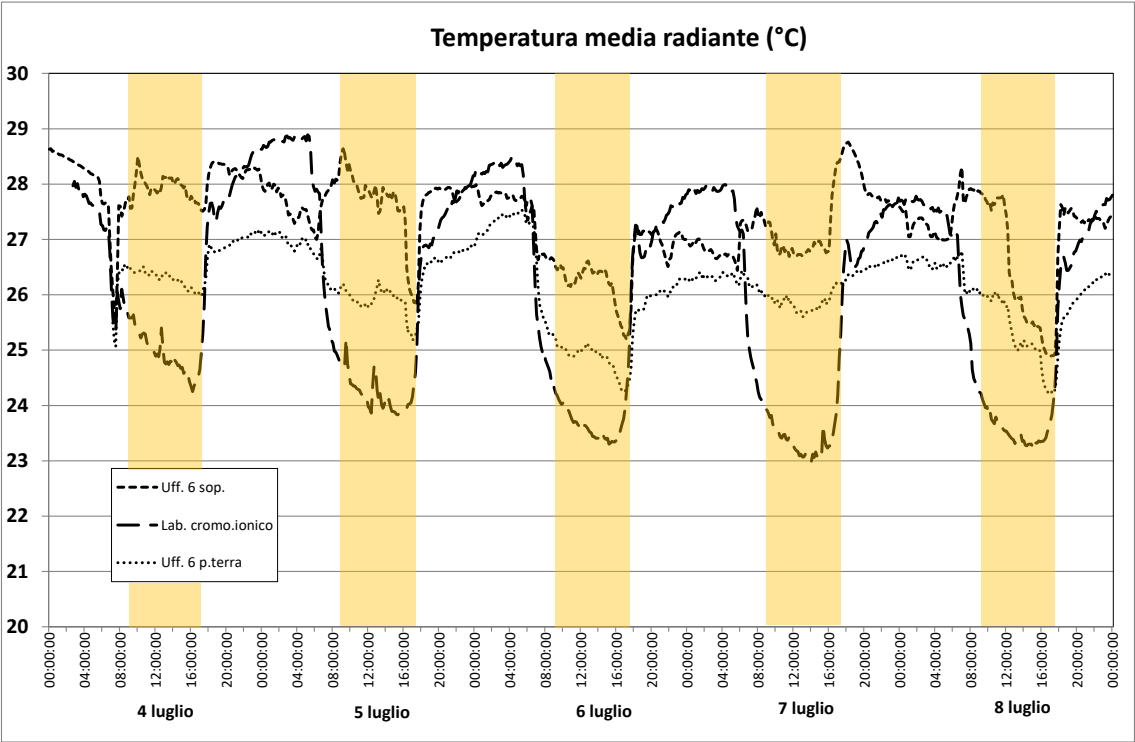


Fig. 35

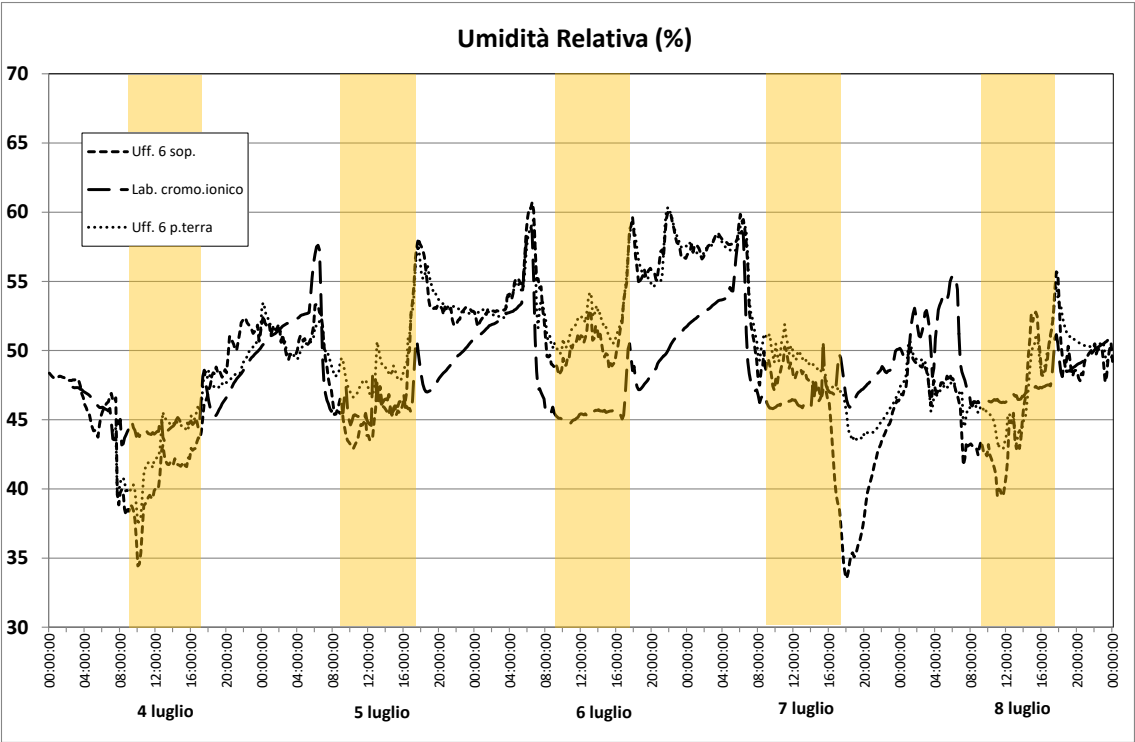


Fig. 36

Ufficio 15 esposizione NW (Settimana 20 – 23 Giugno)

Presenze persone		Dati climatici esterni (media)	
Piano unico	2	Tair (°C)	26,5
		RH (%)	53,80

Tabb. 6-7

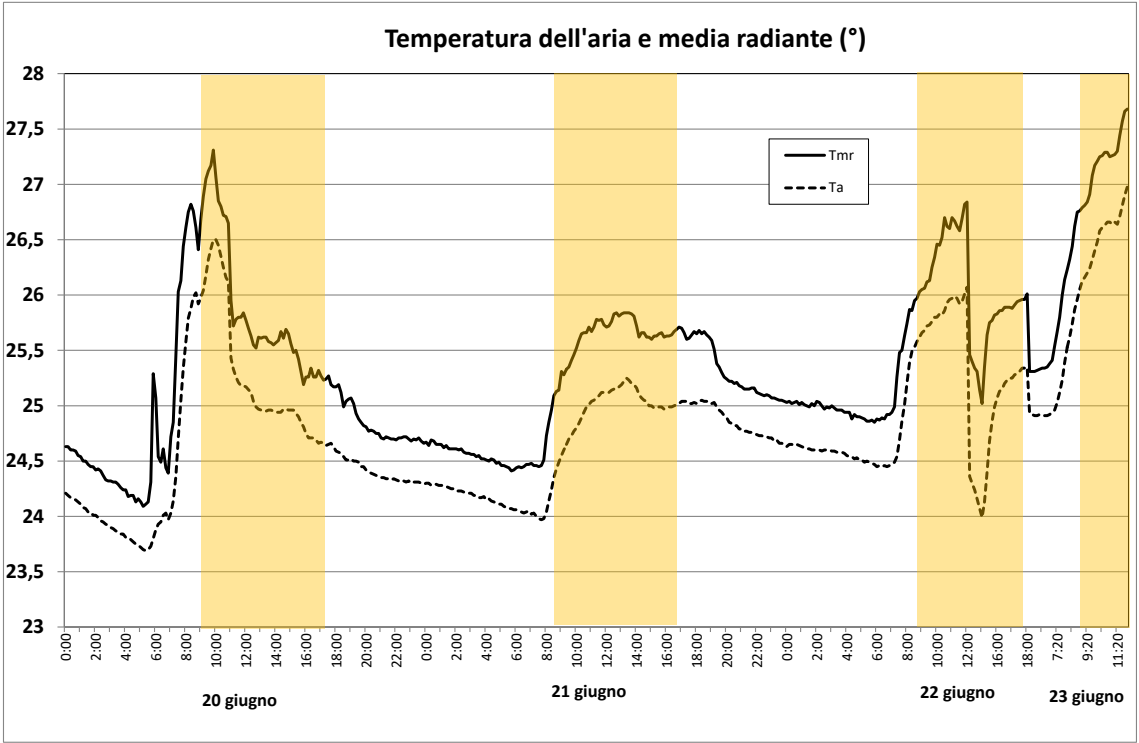


Fig. 39

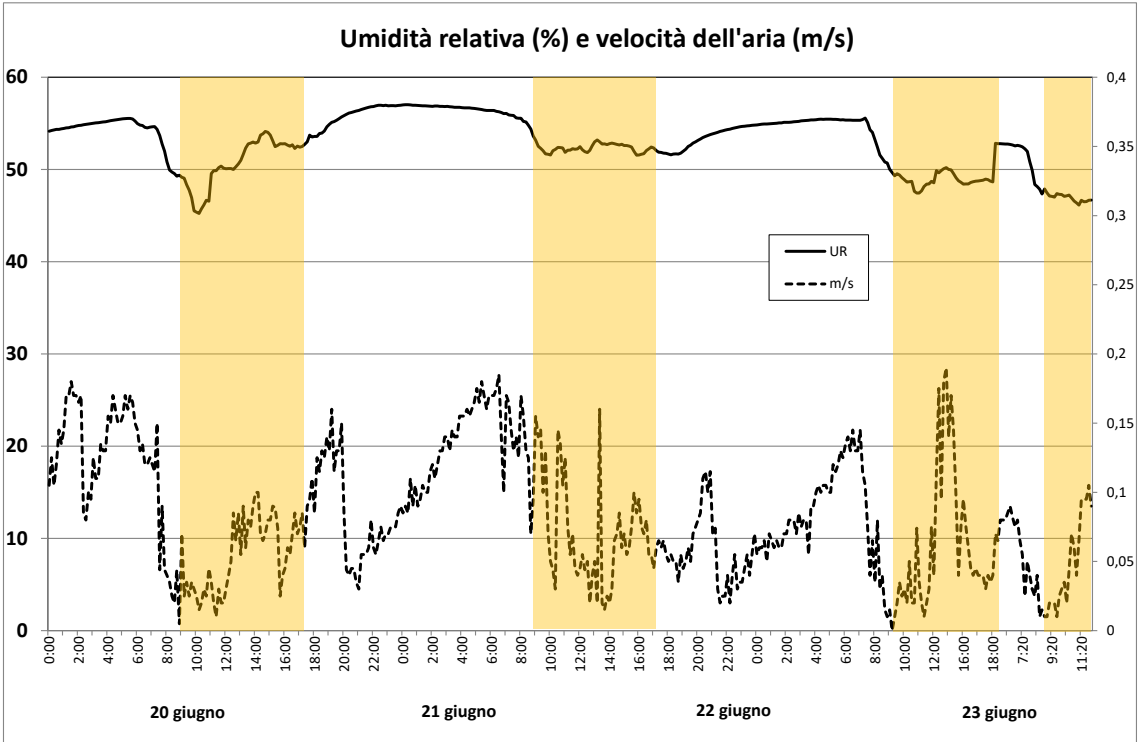


Fig. 40

Auditorium (Settimana 28 – 1 Luglio)

I giorni monitorati sono quelli in cui si sono svolte le lezioni della Summer school dal giorno 28 Giugno al 1 Luglio. Tuttavia nei grafici è stato inserito anche il giorno 27 per evidenziare meglio l'andamento dei parametri ambientali senza l'azione degli impianti.

Si è preferito inserire nel grafico anche il giorno 27 Giugno, in cui non c'era ancora presenza di persone, ma l'impianto era stato acceso. Le differenze rispetto agli altri giorni sono dovute alla diversa regolazione del set-point richiesta per far fronte agli apporti interni dovuti alla presenza massiccia di persone.

Presenza persone		Dati climatici esterni (media)	
Auditorium	50	Tair (°C)	27,4
		RH (%)	50,53

Tab 8-9

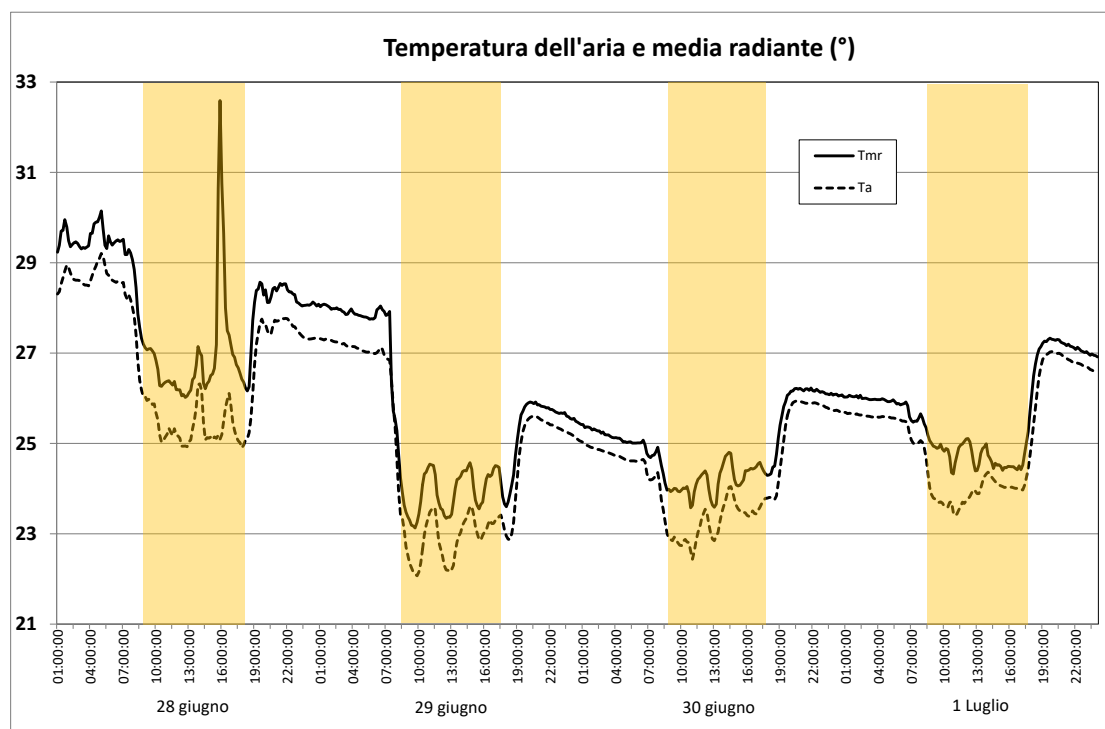


Figura 41

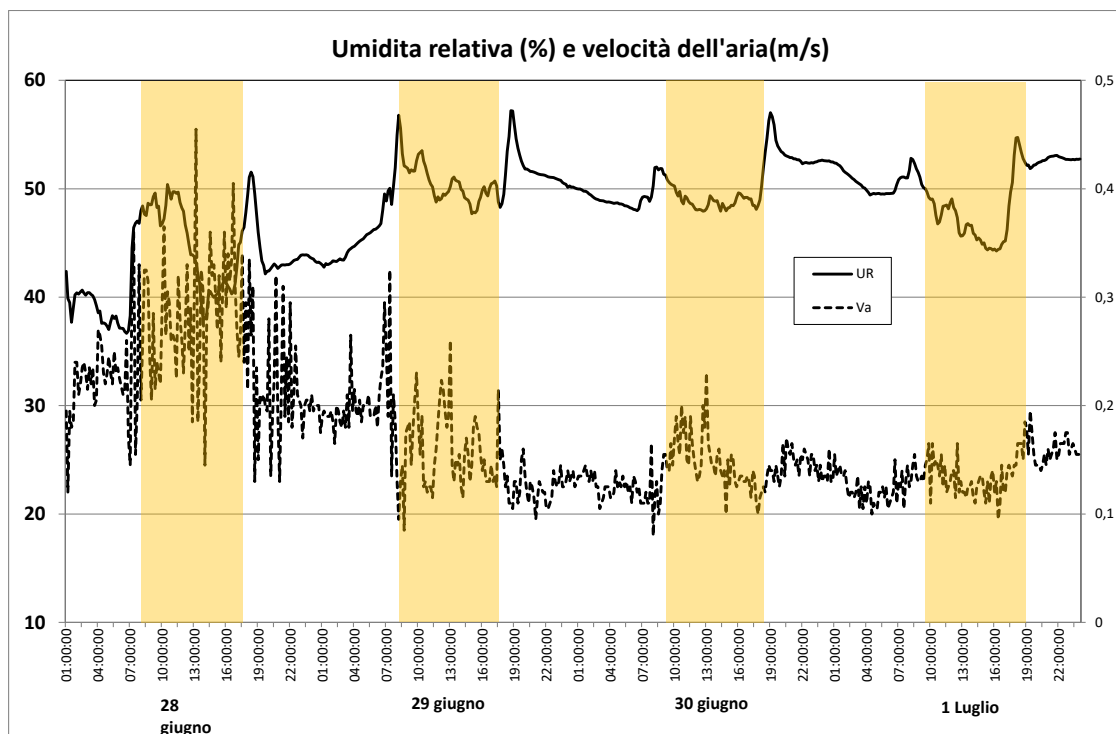


Figura 42

Dall'analisi dei profili orari delle diverse grandezze misurate è possibile trarre alcune osservazioni sui diversi locali esaminati:

negli uffici più grandi, dotati di soppalco e complessivamente di 5 postazioni di lavoro (Ufficio 6 ed Ufficio 9), sia la temperatura dell'aria, che quella radiante, tendono ad essere mediamente più elevate nelle zone soppalcate.

Ciò è dovuto, negli uffici di questo tipo, alla posizione delle finestre, che incidono direttamente sul soppalco, e a quella dei fan-coil posizionati sul soffitto in corrispondenza della zona non soppalcata (Foto cap 3). Per questo sui soppalchi la T di set-point viene quindi raggiunta con un certo ritardo rispetto alla zona sottostante, e questo può creare, in alcune ore della giornata, possibili problemi di regolazione tra gli occupanti. La posizione del soppalco, tra l'altro, sul lato delle finestre, impedisce in gran parte l'afflusso di luce solare nella parte sottostante e rende necessaria l'utilizzo dell'illuminazione artificiale anche negli orari di possibile sfruttamento della luce naturale, e contribuisce ad aumentare i carichi termici interni.

L'umidità relativa e la velocità dell'aria, sono invece sempre risultate comprese entro range di valori accettabili: $40\% < RH < 60\%$, $0,05 < Va < 0,2$.

Nell'ufficio 15, dotato di 2 postazioni di lavoro, non si rilevano particolari criticità, al di là di qualche picco di temperatura in alcuni momenti limitati, probabilmente dovuto a scelte di regolazione o disattivazione del fan-coil da parte degli utenti. La temperatura dell'aria e quella radiante mostrano andamenti molto simili, con differenze di circa 1°C , segno di una buona uniformità termica del locale. Tutte le grandezze registrate rientrano nei range ammissibili.

Il Laboratorio 16, in cui è prevista la presenza di una sola persona, mostra invece delle temperature che scendono fino a circa 23°C in alcune giornate. Tali valori, seppur ammissibili, sono in effetti da considerarsi un po' troppo bassi, considerando temperature medie all'esterno di oltre 30°C . Bisogna però considerare che l'attività di laboratorio sono spesso non continuative, per cui la T interna potrebbe essere legata all'assenza in alcune ore (o a scelte di regolazione) della persona occupante.

Infine nell'Auditorium che è stato monitorato durante i giorni della Summer school (28 Giu - 1 Lug) con una presenza media di 50 persone durante le lezioni e con 2 stazioni di misura, si registrano nell'orario 9-17 con l'impianto di condizionamento attivo, valori di temperatura e umidità accettabili, e distribuiti in modo uniforme tra le due zone della sala in cui erano state installate le centraline di misura.

4.2 Calcolo degli indici di Fanger per la verifica del Thermal comfort

In conformità alla norma UNI 7730, sono stati calcolati, per i diversi ambienti selezionati gli indicatori di Fanger, Voto medio Previsto (PMV) e la Percentuale di insoddisfatti (PPD) per valutare le condizioni di benessere termoisometrico indoor percepite dagli utenti.

Gli indici di Fanger, sono calcolabili in funzione di 6 grandezze caratteristiche dell'ambiente in esame: costituite da:

- Temperatura dell'aria
- Temperatura radiante
- Umidità relativa
- Velocità dell'aria

E due grandezze relative al tipo di attività svolta e all'abbigliamento degli occupanti degli ambienti in esame:

- coeff. di attività metabolica (Met)
- coeff. di resistenza termica dovuta all'abbigliamento (CLO)

Nel caso in esame sono stati assunti per i calcoli effettuati rispettivamente i valori di:

- 1,2 Met per l'attività metabolica (attività sedentaria -ufficio)
- 0,5 CLO (valore tipico per l'abbigliamento estivo)

Gli indici sono inoltre utilizzabili per la valutazione di ambienti moderati: cioè climatizzati e con fluttuazioni non eccessive dei valori previsti di set-point. Il PMV è dato dalla seguente equazione (UNI 7730) :

$$PMV = [0,303 \times \exp(-0,036 \times M) + 0,028] \times$$

$$\left\{ \begin{aligned} & (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \times [5\,733 - 6,99 \times (M - W) - p_a] - 0,42 \times [(M - W) - 58,15] \\ & - 1,7 \times 10^{-5} \times M \times (5\,867 - p_a) - 0,0014 \times M \times (34 - t_a) \\ & - 3,96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right\}$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \times (M - W) -$$

$$-I_{cl} \times \{ 3,96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \times f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \times |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{per } 2,38 \times |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \times \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \times \sqrt{v_{ar}} & \text{per } 2,38 \times |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \times \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{per } I_{cl} \leq 0,078 \, \text{m}^2 \times \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{per } I_{cl} > 0,078 \, \text{m}^2 \times \text{K/W} \end{cases}$$

In cui:

- M è il metabolismo energetico, in watt per metro quadrato (W/m^2);
- W è la potenza meccanica efficace, in watt per metro quadrato (W/m^2);
- I_{cl} è l'isolamento termico dell'abbigliamento, ($m^2 K/W$);
- f_{cl} è il coefficiente di area dell'abbigliamento;
- t_a è la temperatura dell'aria, in gradi Celsius ($^{\circ}C$);
- t_r è la temperatura media radiante ($^{\circ}C$);
- Var è la velocità relativa dell'aria (m/s);
- p_a è la pressione parziale del vapor d'acqua, in pascal, (Pa);
- h_c è il coefficiente di scambio termico convettivo, ($W/m^2 K$);
- t_{cl} è la temperatura superficiale dell'abbigliamento, in gradi Celsius ($^{\circ}C$).

L'unità metabolica = 1 met equivale a $58,2 W/m^2$; 1 unità di abbigliamento = 1 clo = $0,155 m^2 ^{\circ}C/W$.

L'indice dovrebbe essere usato solo per valori di PMV compresi tra -2 e +2 e quando i sei parametri principali sono compresi nei seguenti intervalli

- M tra $46 W/m^2$ e $232 W/m^2$ (0,8 met e 4 met);
- I_{cl} tra $0 m^2 K/W$ e $0,310 m^2 K/W$ (0 clo e 2 clo);
- t_a tra $10 ^{\circ}C$ e $30 ^{\circ}C$;
- t_r tra $10 ^{\circ}C$ e $40 ^{\circ}C$;
- var tra $0 m/s$ e $1 m/s$;
- p_a tra 0 e 2700 Pa.

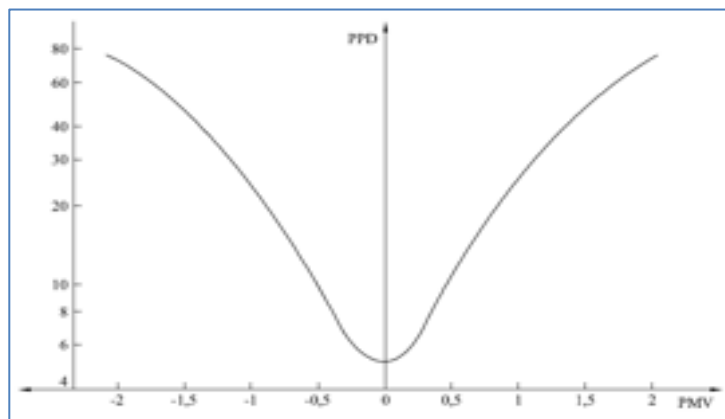
Il PPD (Percentuale di Insoddisfatti) può essere calcolato in funzione del PMV (UNI 7730) in base all'equazione:

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0,03353 \times PMV^4 - 0,2179 \times PMV^2)$$

In sintesi, in base ai valori assunti da questi due indicatori, è possibile dare una valutazione sul benessere termoigrometrico associato ad un dato ambiente: dal valore assunto dal PMV è possibile valutare un locale mediante la scala di sensazione termica percepita dagli occupanti (UNI 7730) (Fig.42); ad esso è inoltre correlata la percentuale di insoddisfatti, i cui valori sono calcolabili mediante la relazione precedente, o ricavabili graficamente dalla fig 43.

+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Abbastanza caldo
0	Né caldo né freddo
-1	Abbastanza freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Fig. 43



**Fig. 44 Percentuale di insoddisfatti (PPD)
in funzione del PMV (UNI 7730)**

Di seguito vengono riportati gli indicatori di thermal comfort per i 5 ambienti selezionati. Le 4 grandezze fisiche, T_{air} , T_{rad} , RH, V_{air} , necessarie al calcolo, sono state preliminarmente mediate per tutti i giorni di monitoraggio nell'intervallo orario 9,00-17,00. Gli indici PMV e PPD sono stati calcolati prima a livello giornaliero, per poi successivamente ricavare il valor medio, indicativo della settimana (Lun-Ven) in esame.

Ufficio 9 esposizione SW (Settimana 13 – 17 Giugno)

	Ufficio 9 Pterra			
	T_{Aria} (°C)	T_{rad} (°C)	$U_{r,aria}$ (%)	V_{air} (m/s)
13/06/2016	24,85	25,52	52,97	0,06
14/06/2016	24,77	25,38	48,71	0,06
15/06/2016	25,07	25,71	47,29	0,06
16/06/2016	24,43	25,02	52,77	0,05
17/06/2016	24,56	25,19	48,21	0,05
Totale periodo	24,69	25,31	49,86	0,05

Tab. 10 parametri microclimatici giornalieri Uff. 9 P. terra

	Ufficio 9 Soppalco			
	T_{Aria} (°C)	T_{rad} (°C)	$U_{r,aria}$ (%)	V_{air} (m/s)
13/06/2016	25.45	26.07	52.50	0.12
14/06/2016	25.03	25.66	48.12	0.16
15/06/2016	26.04	26.72	44.69	0.10
16/06/2016	24.92	25.50	52.64	0.13
17/06/2016	24.93	25.45	47.84	0.08
Totale periodo	25.27	25.88	49.49	0.13

Tab. 11 parametri microclimatici giornalieri Uff. 9 Soppalco

	Periodo 13 Giu - 17 Giu					
	13-giu	14-giu	15-giu	16-giu	17-giu	Media
PMV	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
PPD	5,8	5,2	5,8	5,2	5,2	5,2

Tab. 12 PMV e PPD giornalieri Uff. 9 P. terra

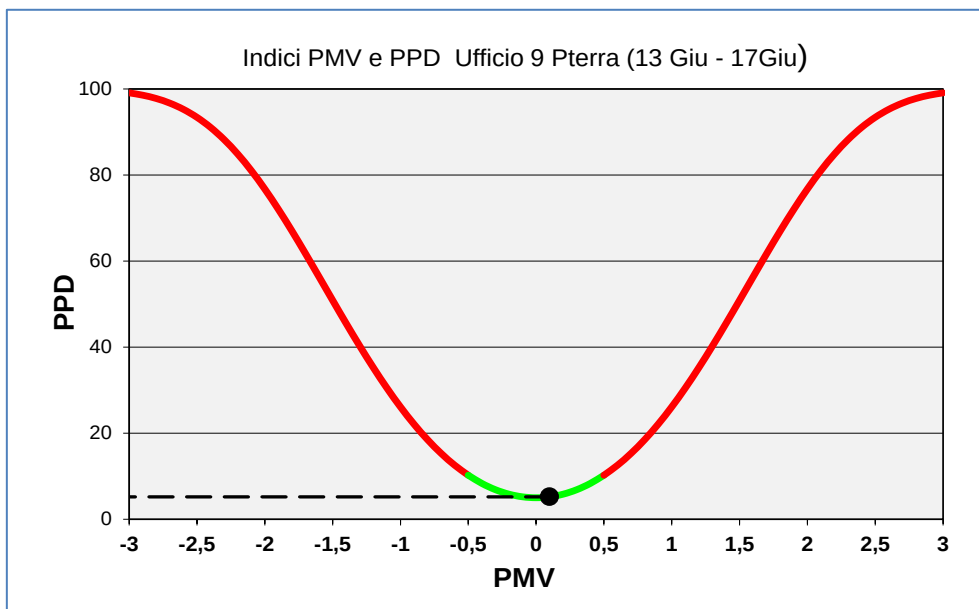


Fig. 45 PMV e PPD medio settimanale Uff. 9 P. terra

	Periodo 13 Giu - 17 Giu					
	13-giu	14-giu	15-giu	16-giu	17-giu	
PMV	0,3	0,0	0,5	0,1	0,2	0,2
PPD	6,9	5,0	10,2	5,2	5,8	5,8

Tab. 13 PMV e PPD giornalieri Uff. 9 Soppalco

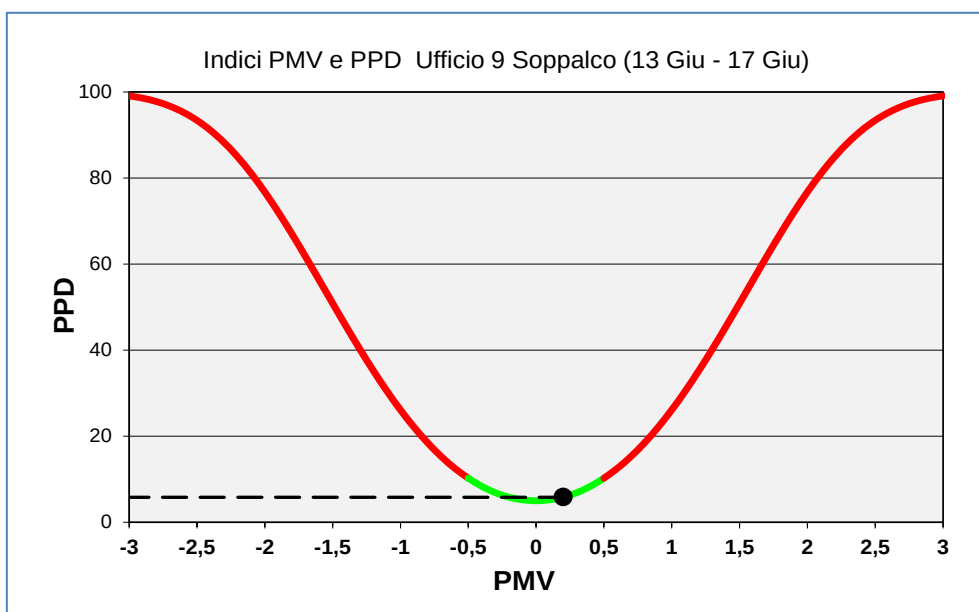


Fig. 46 PMV e PPD medio settimanale Uff. 9 Soppalco

Ufficio 6 esposizione NE (Settimana 4 – 8 Luglio)

Ufficio 6 Piano Terra				
	T_Aria (°C)	T rad (°C)	Ur_aria (%)	V air (m/s)
04/07/2016	25,6	26,3	43,0	0,14
05/07/2016	25,3	25,9	48,4	0,14
06/07/2016	23,5	24,3	54,0	0,13
07/07/2016	25,3	25,9	49,2	0,14
08/07/2016	25,3	25,9	44,6	0,13
Totale periodo	25,4	26,0	46,6	0,14

Tab. 14 parametri microclimatici giornalieri Uff.6 P. terra

Ufficio 6 Soppalco				
	T_Aria (°C)	T rad (°C)	Ur_aria (%)	V air (m/s)
04/07/2016	26,96	27,97	38,13	0,06
05/07/2016	26,80	27,68	45,53	0,06
06/07/2016	25,26	26,23	50,40	0,06
07/07/2016	26,07	27,00	47,32	0,05
08/07/2016	26,75	27,70	41,52	0,07
Totale periodo	26,1	27,1	46,2	0,06

Tab. 15 parametri microclimatici giornalieri Uff. 6 Soppalco

Periodo 4 Lug - 8 Lug						
	4-lug	5-lug	6-lug	7-lug	8-lug	Media
PMV	0.2	0.1	-0.3	0.2	0.1	0.2
PPD	5.8	5.2	6.9	5.8	5.2	5.8

Tab. 16 PMV e PPD giornalieri Uff. 6 P. terra

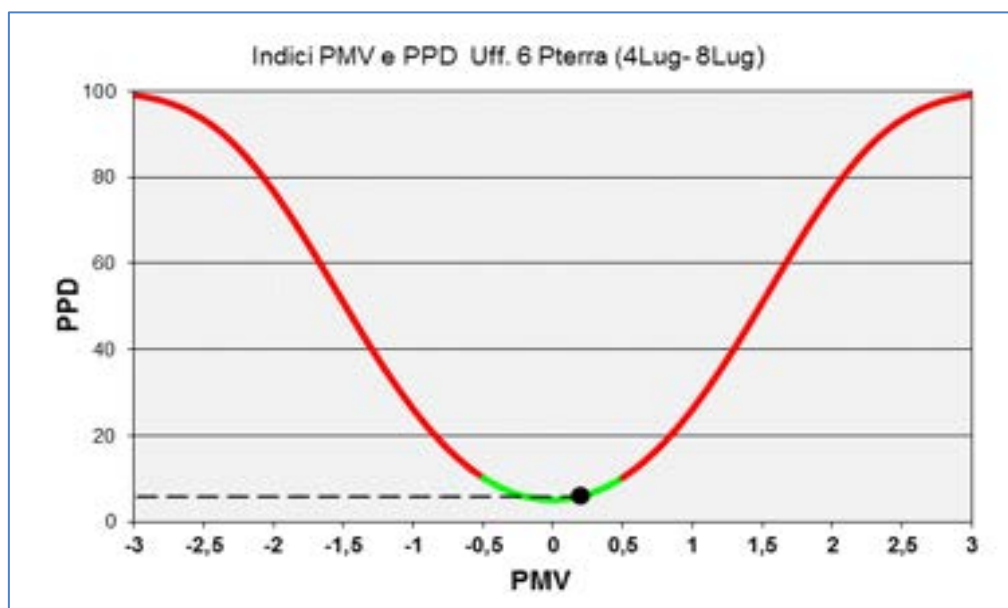


Figura 47 PMV e PPD medio settimanale Uff. 9 P. terra

	Periodo 4 Lug - 8 Lug					
	4-lug	5-lug	6-lug	7-lug	8-lug	Media
PMV	0,8	0,8	0,3	0,6	0,7	0,6
PPD	18,5	18,5	6,9	12,5	15,3	12,5

Tab 17 PMV e PPD giornalieri Uff. 6 Soppalco

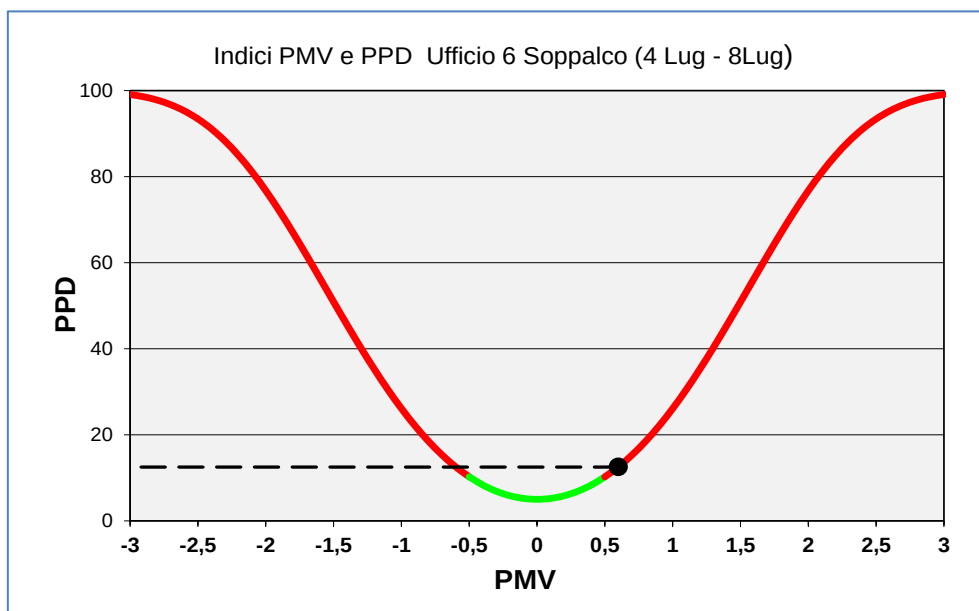


Fig. 48 PMV e PPD Uff.

Laboratorio 16 esposizione NW (Settimana 4 – 8 Luglio)

	Laboratorio 16			
	T_Aria (°C)	T_rad (°C)	Ur_aria (%)	V air (m/s)
04/07/2016	23,9	24,9	44,4	0,08
05/07/2016	23,3	24,3	45,7	0,09
06/07/2016	22,7	23,7	45,4	0,09
07/07/2016	22,4	23,4	46,6	0,08
08/07/2016	22,7	23,7	46,7	0,08
Totale periodo	23,0	24,0	45,6	0,09

Tab 18 parametri microclimatici giornalieri Lab. 16

	Periodo 4 Lug - 8 Lug					
	4-lug	5-lug	6-lug	7-lug	8-lug	Media
PMV	-0,1	-0,2	-0,5	-0,6	-0,5	-0,4
PPD	5,2	5,8	10,2	12,5	10,2	8,3

Tab 19 PMV e PPD giornalieri Lab. 16

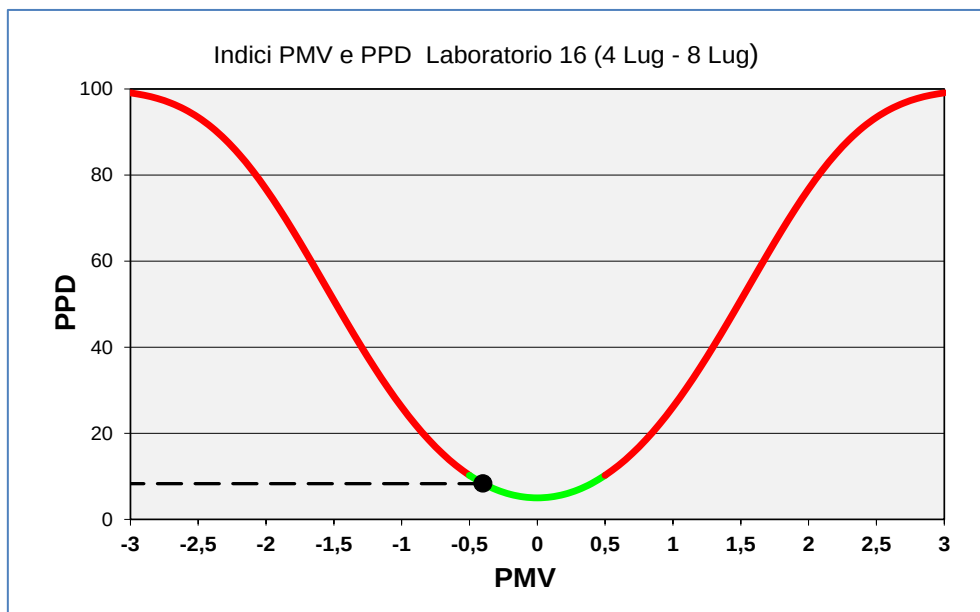


Fig. 49 PMV e PPD settimanale Laboratorio 16

Ufficio 15 esposizione NW (Settimana 20 – 23 Giugno)

	UFFICIO 15			
	T_Aria (°C)	T rad (°C)	Ur_aria (%)	V air (m/s)
20/06/2016	25,3	25,9	50,7	0,05
21/06/2016	25,0	25,7	52,3	0,07
22/06/2016	25,3	26,0	49,0	0,06
23/06/2016	26,5	27,2	46,9	0,05
Totale periodo	25,3	26,0	50,3	0,06

Tab. 20 parametri microclimatici giornalieri Uff 15

	Periodo 4 Lug - 8 Lug				
	20-giu	21-giu	22-giu	23-giu	Media
PMV	0,3	0,2	0,3	0,7	0,3
PPD	6,9	5,8	6,9	15,3	6,9

Tab. 21 PMV e PPD giornalieri Uff. 15

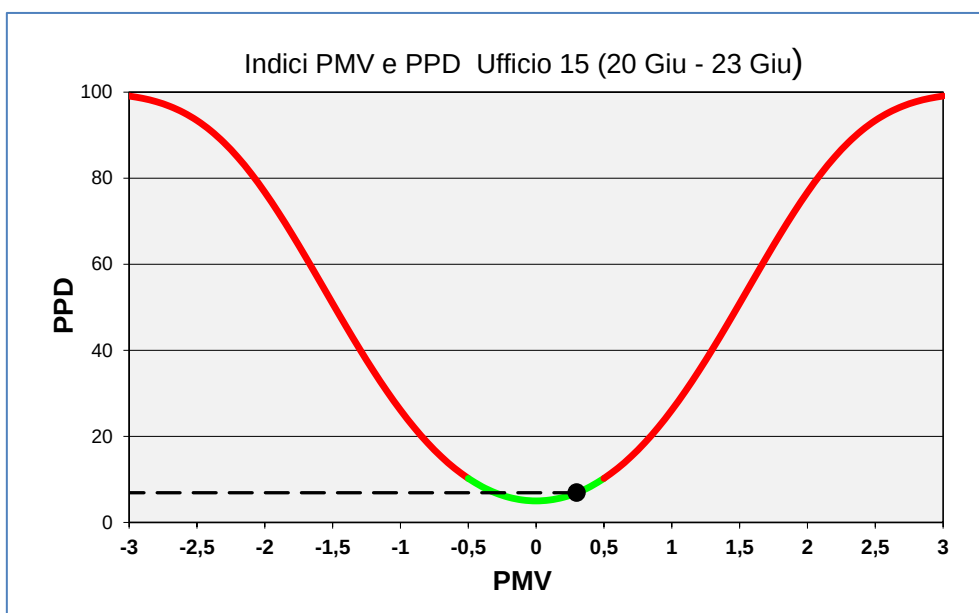


Fig. 50 PMV e PPD settimanale Ufficio 15

Auditorium (Settimana 28 Giugno – 1 Luglio)

Il monitoraggio dell'Auditorium è avvenuto durante i giorni delle lezioni della Summer school 2016.

La presenza media nelle ore di lezione è stata di 50 persone.

Data l'ampia superficie dell'ambiente in esame nell'auditorium sono state installate due centraline di misure, posizionate come riportato in Fig. 51 :

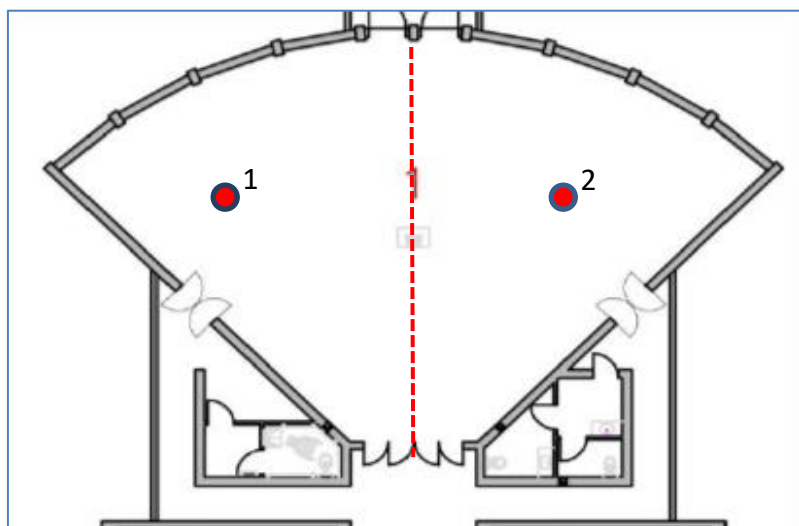


Figura 51

Auditorium zona 1				
	T_Aria (°C)	T rad (°C)	Ur_aria (%)	V air (m/s)
28/06/2016	23,01	23,98	50,52	0,06
29/06/2016	23,53	24,42	48,72	0,09
30/06/2016	24,24	25,09	46,44	0,09
01/07/2016	24,13	25,03	47,97	0,09

Auditorium zona 2				
	T_Aria (°C)	T rad (°C)	Ur_aria (%)	V air (m/s)
28/06/2016	22,89	23,92	50,36	0,16
29/06/2016	23,22	24,17	49,18	0,15
30/06/2016	23,91	24,71	47,10	0,13
01/07/2016	23,93	24,67	48,56	0,13

Tab 22 Dati microclimatici Auditorium zona 1-2

Le differenze minime emerse tra le due zone considerate, hanno consentito di ricavare dei valori medi complessivi indicativi di tutto l'ambiente

Auditorium Valori medi giornalieri				
	T_Aria (°C)	T rad (°C)	Ur_aria (%)	V air (m/s)
28/06/2016	23,0	23,9	50,4	0,11
29/06/2016	23,4	24,3	48,9	0,12
30/06/2016	24,1	24,9	46,8	0,11
01/07/2016	24,0	24,9	48,3	0,11
Media	23,6	24,5	48,6	0,11

Tab 23 Dati microclimatici medi Auditorium

Periodo 28 Giu - 1 Lug					
	28-giu	29-giu	30-giu	1-lug	Media
PMV	-0.4	-0.3	-0.1	-0.1	-0.2
PPD	8.3	6.9	5.2	5.2	5.8

Tab. 24 PMV e PPD giornalieri Auditorium

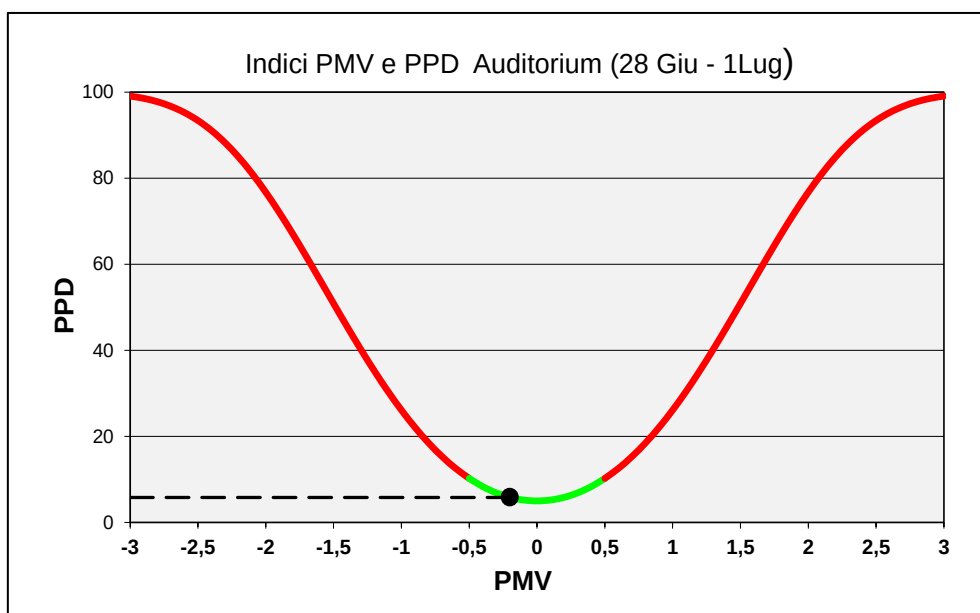


Figura 52 PMV e PPD settimanale Auditorium

Valutazione globale del livello di comfort termico

Alla luce dei risultati ottenuti per gli indicatori, PMV e PPD, è possibile ricavare una valutazione del livello di comfort per i vari locali esaminati, basata sui valori medi relativi alla settimana di monitoraggio, e successivamente, da questa una valutazione complessiva per l'edificio, facendo riferimento a quanto previsto nella norma UNI 15251.

	Valori medi		
	PMV	PPD	Valutazione
Ufficio 6 P. terra	0.2	5.8	Neutro
Ufficio 6 Soppalco	0.6	12.5	Leggermente caldo
Ufficio 9 P. terra	0.1	5.2	Neutro
Ufficio 9 Soppalco	0.2	5.8	Neutro
Ufficio 15	0.3	6.9	Neutro
Laboratorio 16	-0.4	8.3	Neutro
Auditorium	-0.2	5.8	Neutro

Tab. 25 PMV e PPD valori medi complessivi

Valutazione complessiva degli ambienti selezionati in base alla classificazione fornita dalla UNI 15251

Category	Thermal state of the body as a whole	
	PPD %	Predicted Mean Vote
I	< 6	-0,2 < PMV < + 0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < + 0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < + 0,7
IV	> 15	PMV < -0,7; or +0,7 < PMV

Fig. 53

Considerando i vari locali esaminati rappresentativi dell'edificio in esame, l'edificio può essere classificato sostanzialmente di Categoria II in base a quanto previsto dalla UNI 15251. Solo l'ufficio 6, per la parte soppalco, ha mostrato valori del PMV al di sopra del range $\pm 0,5$. Scostamenti simili però, potrebbero riscontrarsi per altri uffici analoghi, nei quali come già evidenziato dall'analisi dei profili orari, il soppalco rappresenta una zona soggetta a scostamenti più o meno significativi rispetto alla temperatura di set-point della stanza.

E' possibile classificare l'edificio anche in funzione dei valori mediamente assunti dalla temperatura operativa degli ambienti in esame. La temperatura operativa può essere un buon indicatore del livello di comfort percepito dagli utenti in quanto tiene conto sia degli scambi convettivi con l'aria circostante che di quelli radiativi. In accordo con la UNI 7730 può essere espressa in funzione di coefficienti legati alla velocità dell'aria:

$$t_0 = A t_a + (1-A) t_r$$

in cui: t_0 = T operativa; t_a = T aria ; t_r = T radiante

Vair	< 0.2	0.2-0.6	0.6-1.0
A	0.5	0.6	0.7

Tab. 26 coefficienti in funzione di Vair

Considerando i valori di velocità dell'aria minori di 0,2 m/s :

Ufficio 6 Piano Terra	Ufficio 6 Piano Soppalco
T operativa (°C)	
25,61	27,47
23,90	27,24
25,61	25,75
25,60	26,54
25,69	27,23
25,69	26,61

Tab. 27-28

Ufficio 9 Piano Terra	Ufficio 9 Soppalco
T operativa (°C)	
25,18	25,76
25,07	25,35
25,39	26,38
24,73	25,21
24,88	25,19
25,00	25,58

Tabb. 29

Laboratorio 16	Auditorium	Ufficio 15
T operativa (°C)	T operativa (°C)	T operativa (°C)
24,43	23,45	25,59
23,81	23,84	25,34
23,17	24,49	25,65
22,90	24,44	26,89
23,22		
23,52	24,05	25,68

Tabb. 30-31-32 Temperatura operativa dei locali esaminati

Anche l'analisi della temperatura operativa conduce a risultati sostanzialmente analoghi a quelli evidenziati dal calcolo degli indicatori di comfort. I valori delle T operative sono nella maggior parte dei casi compresi nel range (23-26) °C consigliato dalla UNI 15251 (Fig.54). Risulta superiore solo il valore medio totale dell'Ufficio 6 Soppalco come in precedenza, e alcuni valori medi giornalieri relativi all'Ufficio 9 Soppalco e l'Ufficio 15.

Type of building or space	Category	Temperature range for heating, °C	Temperature range for cooling, °C
		Clothing ~ 1,0 clo	Clothing ~ 0,5 clo
Offices and spaces with similar activity (single offices, open plan offices, conference rooms, auditorium, cafeteria, restaurants, class rooms, Sedentary activity ~1,2 met	I	21,0 – 23,0	23,5 - 25,5
	II	20,0 – 24,0	23,0 - 26,0
	III	19,0 – 25,0	22,0 - 27,0

Fig 54 Temperature ranges for hourly calculation of cooling and heating energy in three categories of indoor environment (UNI 15251)

4.3 Indicatori di discomfort locale

Gli indici PMV e PPD rappresentano la sensazione termica percepita dagli utenti a livello globale, cioè relativa a tutto il corpo nel suo complesso. E' possibile tuttavia, in presenza di ambienti climatizzati in modo non uniforme che ci siano possibili cause di discomfort termico locale, cioè che possano creare sensazione di disagio per una parte del corpo.

La UNI 7730 consente di calcolare degli indicatori di discomfort locali, per valutare eventuali scambi termici localizzati che possono indurre disagio in particolari zone del corpo. Questi includono:

- correnti d'aria
- gradiente verticale della temperatura dell'aria
- asimmetria della temperatura radiante
- temperatura di superficie del pavimento

Gli andamenti generali dei parametri misurati e gli indicatori globali PMV e PPD, hanno mostrato buona uniformità termica degli ambienti in esame, rendendo in sostanza quasi superflua la verifica del discomfort locale. Tuttavia sono state effettuate delle verifiche in alcuni locali ritenuti significativi.

Il rischio di correnti d'aria è apparso non plausibile in quanto la velocità dell'aria è risultata essere sempre compresa nel range (0,05 - 0,2) m/s, per tutti i locali esaminati

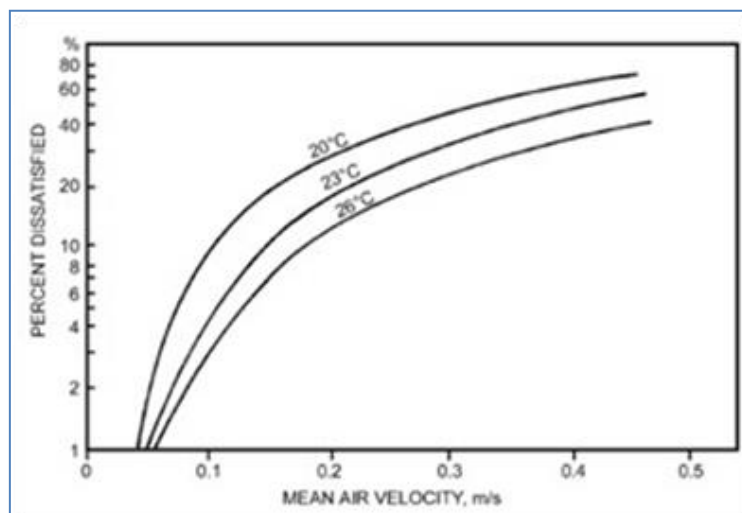


Fig. 55

Dal grafico, [7] è possibile verificare infatti che nel range di temperature compreso tra 23-26, per valori di velocità dell'aria corrispondenti mediamente nel range 0,05-0,15 la PPD risulta molto esigua.

Pur non avendo effettuato misure di temperatura superficiale delle pareti o pavimento, sono state evidenziate, in alcuni ambienti, le differenze tra la Temperatura media radiante (Tmr) misurata dal globotermometro e quella dell’aria, per alcuni locali :

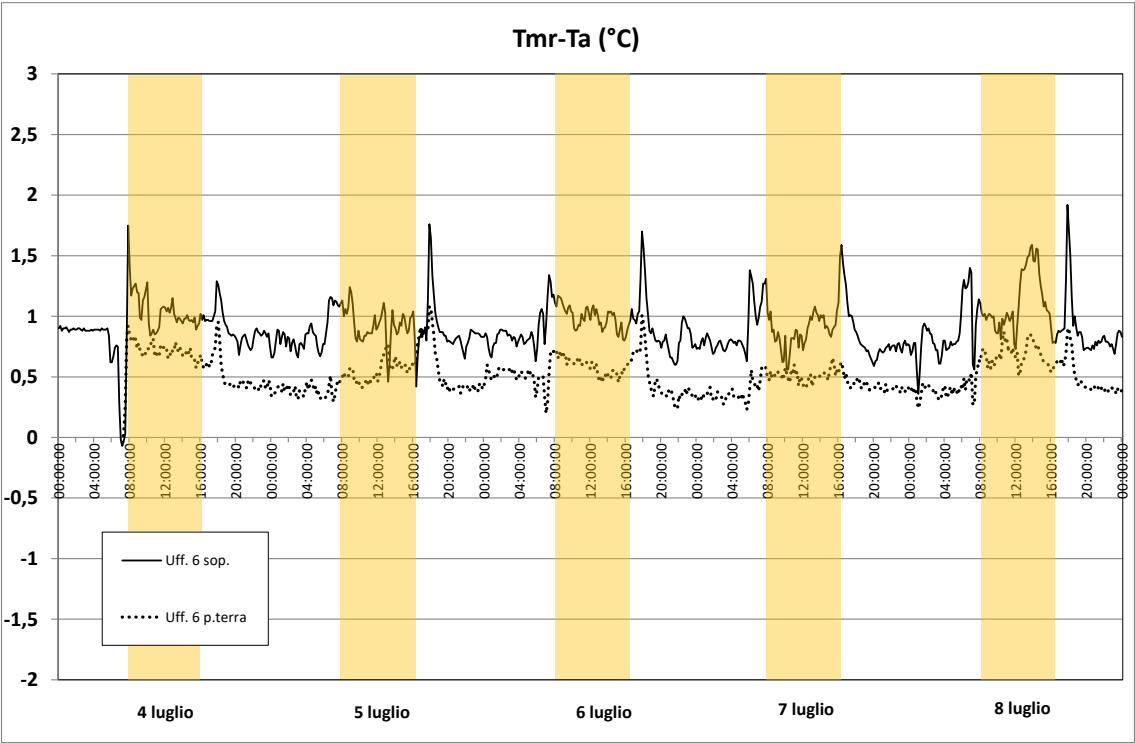


Fig. 56

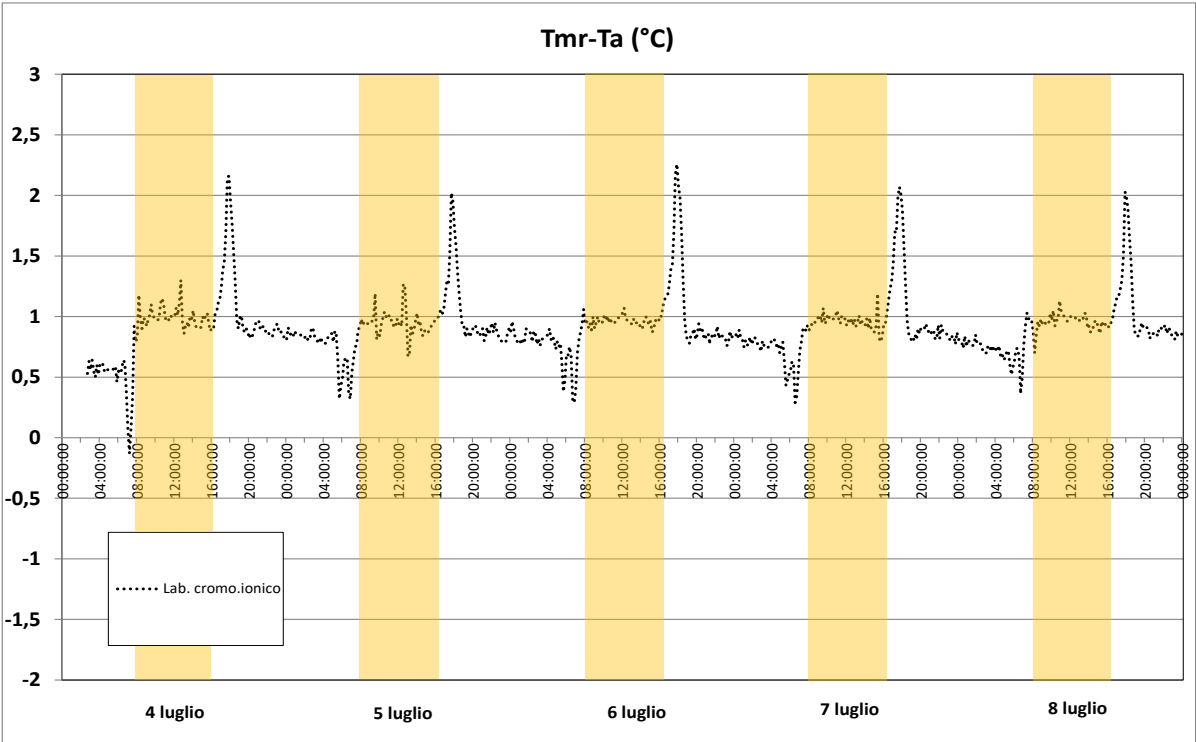


Fig 57

Le differenze, limitate a circa 1 grado centigrado per i locali esaminati negli orari di servizio, evidenziano una temperatura media superficiale molto vicina a quella dell'aria, a conferma di una buona uniformità termica degli ambienti in esame e assenza di possibili disagi dovuti ad elevate asimmetrie radianti.

In alcuni ambienti è stata inoltre verificata la distribuzione verticale delle temperature, misurandone il valore a diverse altezze 10 cm, 60 cm, e 1 m. Si riporta a titolo d'esempio l'andamento registrato in un ufficio

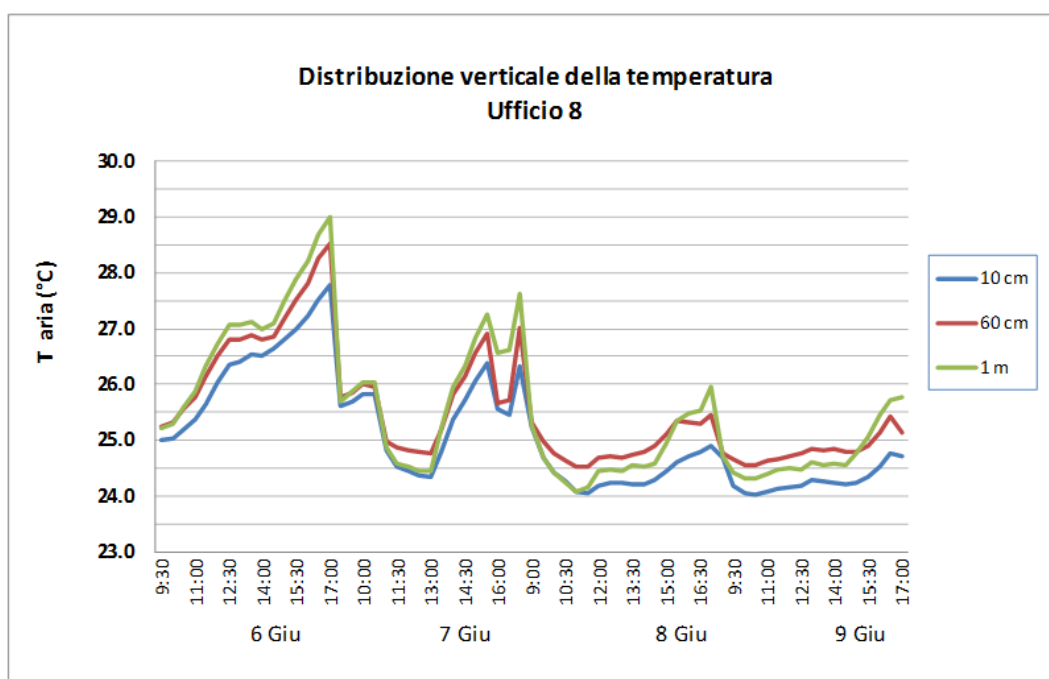


Fig. 58

Come evidente dal grafico le differenze registrate alle diverse altezze sono sempre al di sotto dei 3 °C, valore limite previsto dalla UNI 7730, per cui non si riscontrano disagi causati da forti differenze nella distribuzione termica verticale.

4.4 IAQ analysis: la concentrazione di CO₂ come indicatore della qualità dell'aria

Negli edifici in cui si ritiene sia di scarso rilievo la presenza di inquinanti indoor quali VOC, polveri, fumo, ecc., la qualità dell'aria può essere valutata attraverso la misura della concentrazione di anidride carbonica CO₂. L'anidride carbonica è un bioeffluente ed è chiaramente legata alla presenza delle persone che occupano un determinato ambiente e che, con la respirazione, emettono CO₂ in funzione dell'attività metabolica svolta.

I valori limite da non superare per evitare disagi agli occupanti, sono generalmente espressi in termini di concentrazione oltre il valore della CO₂ atmosferica all'aperto, considerata pari a 400 ppm. La tabella seguente fornita dalla norma UNI 15251 riporta i valori limite in funzione della Categoria di edificio in esame, come precedentemente descritto.

Category	Corresponding CO ₂ above outdoors in PPM for energy calculations
I	350
II	500
III	800
IV	< 800

Fig. 59

La concentrazione di CO₂ diviene così un importante parametro sia per valutare che per progettare un efficiente sistema di ventilazione dell'ambiente.

L'edificio in esame non è dotato di impianti di ventilazione meccanica per cui il ricambio d'aria, in tutto l'edificio, è affidato all'aerazione naturale. Lo scambio d'aria con l'esterno, in questi casi, è dovuto alle differenze di pressione e/o temperatura tra l'aria interna e l'ambiente circostante (infiltrazioni naturali) oppure all'apertura volontaria da parte degli utenti di porte e finestre.

E' chiaro, che tale modalità non garantisce un pieno e continuo controllo dei principali parametri che influiscono sulla qualità dell'aria indoor quali: RH (%), CO₂, odori, ecc.

In particolare, durante il periodo di funzionamento dell'impianto di condizionamento estivo, in cui è richiesta la chiusura delle aperture per consentire una corretta climatizzazione degli ambienti, è importante verificare che sussistano condizioni adeguate in termini di qualità dell'aria.

Valori in eccesso della concentrazione di CO₂ potrebbero evidenziare la necessità di installare un impianto di ventilazione forzata, in tutto o parte dell'edificio, per garantire livelli accettabili di qualità dell'aria indoor.

In questo caso, assumendo come un valore limite il differenziale di CO₂ rispetto all'esterno (quindi limite totale: 400+500=900 ppm Cat. II oppure 400+800=1200 Cat. III) e conoscendo il numero di occupanti dell'ambiente in esame, è possibile calcolare le portate d'aria di rinnovo necessarie al mantenimento di una concentrazione di anidride carbonica ammissibile.

Un dimensionamento corretto chiaramente richiede la conoscenza del numero esatto di occupanti e del profilo di utilizzo del locale; tuttavia diverse normative forniscono valori indicativi

raccomandati delle portate d'aria in funzione della superficie o del numero medio di persone presenti.

Category	Airflow per person l/s/pers	Airflow for building emissions pollutions (l/s/m ²)		
		Very low polluting building	Low polluting building	Non low polluting building
I	10	0,5	1	2
II	7	0,35	0,7	1,4
III	4	0,2	0,4	0,8

Fig. 60

Di seguito si riportano i profili orari e le concentrazioni medie giornaliere, misurate nelle ore di utilizzo dell'edificio (9,00-17,00) nei diversi ambienti esaminati.

Ufficio 6 e Laboratorio 16

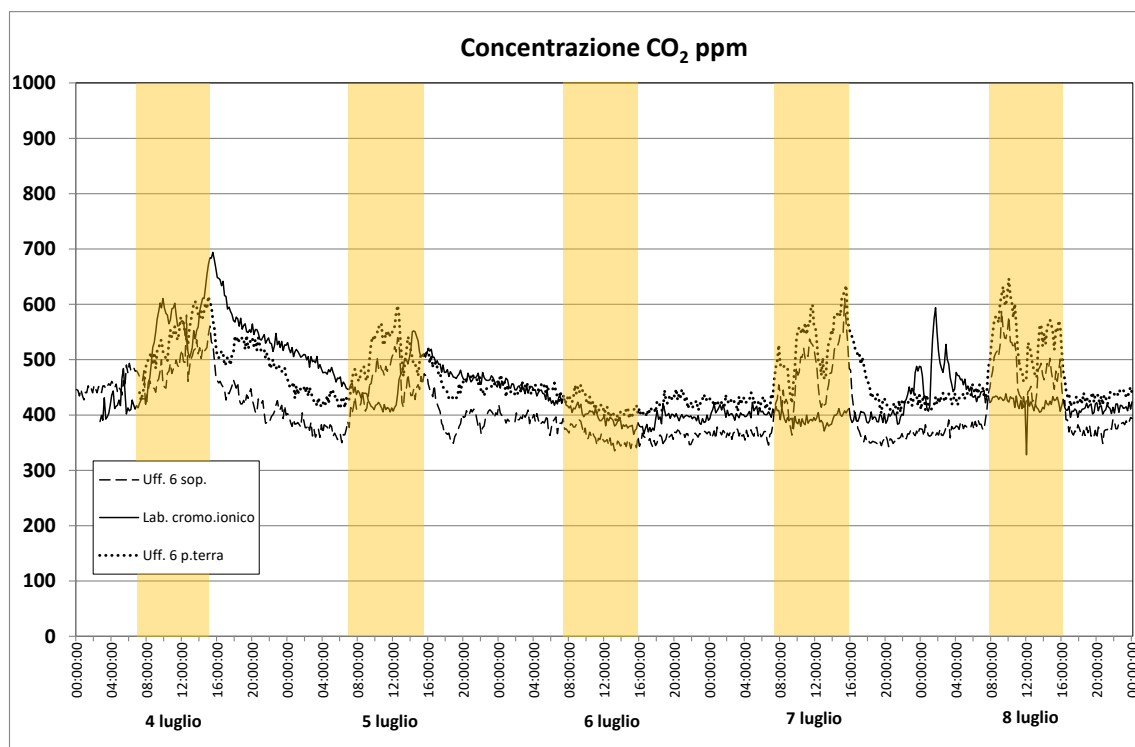


Fig. 61

Ufficio 15

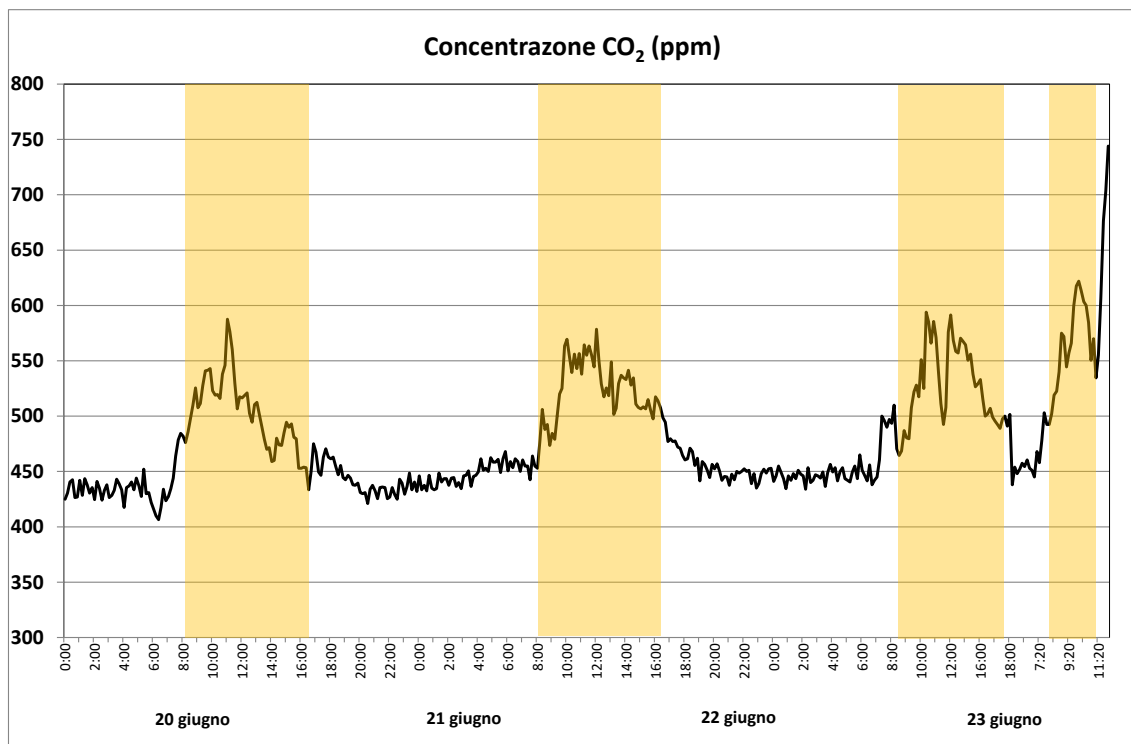


Fig. 62

Ufficio 9

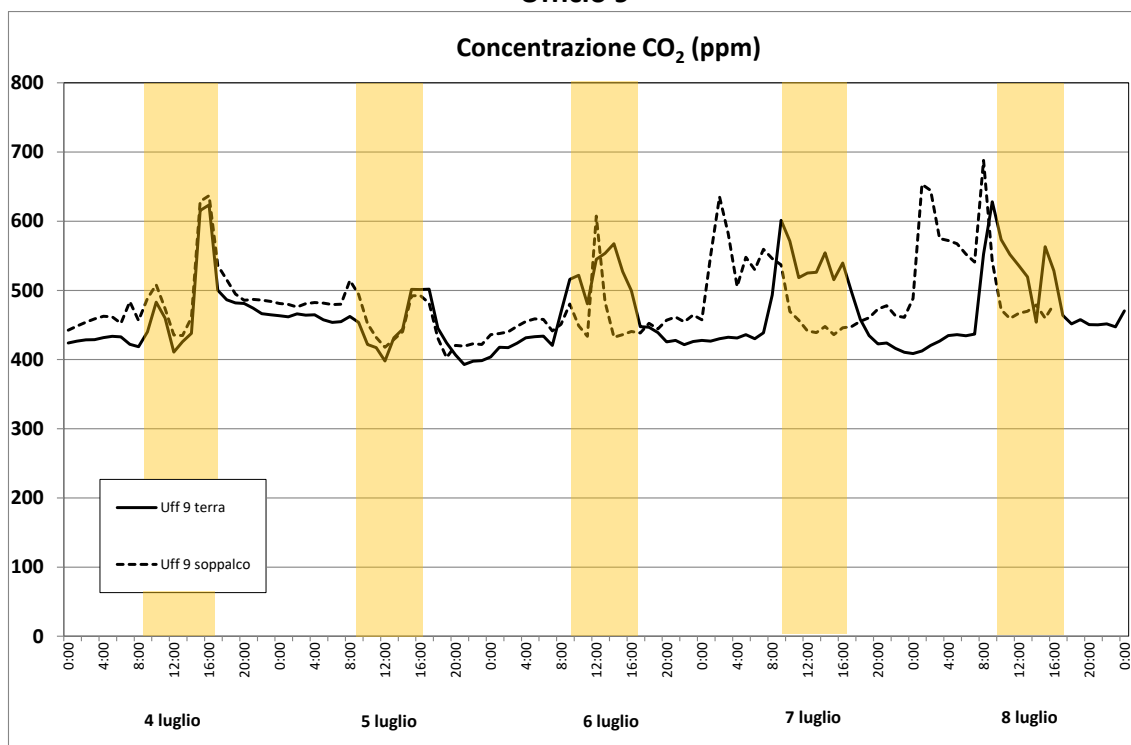


Fig. 63

Auditorium

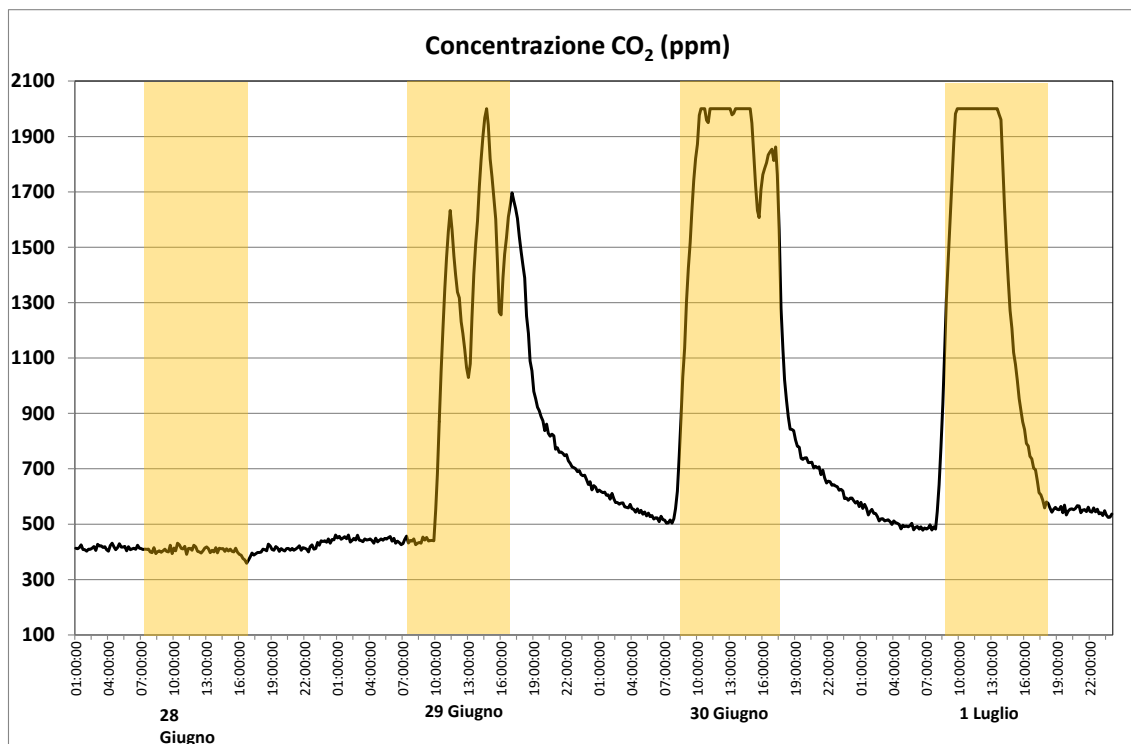


Fig. 64

Medie giornaliere della concentrazione di CO₂

	Ufficio 9 Pterra
	CO ₂ (ppm)
13/06/2016	488,81
14/06/2016	450,25
15/06/2016	531,27
16/06/2016	543,32
17/06/2016	543,16
Totale periodo	525,79

Tab.32

	Ufficio 9 Soppalco
	CO ₂ (ppm)
13/06/2016	510,82
14/06/2016	458,85
15/06/2016	508,72
16/06/2016	557,26
17/06/2016	590,33
Totale periodo	525,19

Tab.33

	Ufficio 6 Piano Terra
	CO ₂ (ppm)
04/07/2016	549.09
05/07/2016	521.62
06/07/2016	404.25
07/07/2016	542.77
08/07/2016	560.00
Totale periodo	538.65

Tab. 34.

	Ufficio 6 Soppalco
	CO ₂ (ppm)
04/07/2016	478,84
05/07/2016	467,02
06/07/2016	356,12
07/07/2016	474,59
08/07/2016	499,92
Totale periodo	441,33

Tab. 35

	Laboratorio 16
	CO₂ (ppm)
04/07/2016	594,96
05/07/2016	447,04
06/07/2016	390,99
07/07/2016	392,32
08/07/2016	422,09
Totale periodo	453,83

Tab. 36

	UFFICIO 15
	CO₂ (ppm)
20/06/2016	499,78
21/06/2016	525,98
22/06/2016	539,23
23/06/2016	601,11
Totale periodo	530,41

Tab 37

	Auditorium
	CO₂ (ppm)
28/06/2016	1242.44
29/06/2016	1830.23
30/06/2016	1571.12
01/07/2016	1540.59
Totale periodo	1546.09

Tab. 38

Come evidente dai valori medi giornalieri riportati nelle tabelle precedenti, la concentrazione di anidride carbonica risulta mediamente sempre compresa tra le 400 e 500 ppm, per tutti gli uffici esaminati, valori ampiamente al di sotto dei valori limite di 900 (cat II) - 1200 (cat III) ppm forniti dalla norma UNI 15251.

Ciò è probabilmente dovuto alla presenza non contemporanea negli uffici di tutti gli occupanti, nonché all'apertura piuttosto frequente delle porte, dovuta all'ingresso/uscita degli utenti. Tali concentrazioni rientrano pienamente nei valori ammissibili di CO₂ e inducono a ritenere non necessario un impianto di ventilazione meccanica per i locali esaminati.

Diversa appare invece la situazione per l'Auditorium, in cui i valori medi giornalieri durante gli orari esaminati sono compresi mediamente tra le 1500 ppm e 1800 ppm e con valori di picco intorno alle 2000 ppm. In questo caso, i valori sono superiori ai limiti consigliati e potrebbero essere causa di disagio per gli occupanti. Potrebbe essere quindi opportuno valutare l'installazione di un sistema di ventilazione controllata dedicato alla sala conferenze, per controllare in maniera adeguata il tasso di ricambio e la qualità dell'aria interna. Chiaramente, nell'analisi economica e nella scelta dell'impianto, si dovrà tener conto dell'utilizzo non continuativo di questo tipo di locali, e del numero di occupanti che si prevedono possano impegnare la sala.

5 Conclusioni

Nell'ambito di un'attività di diagnosi energetica del complesso sede del C. R. Sotacarbo, è stato effettuato un monitoraggio strumentale dell'edificio al fine di valutare le condizioni microclimatiche indoor durante il periodo di climatizzazione estiva.

Nel periodo preso in esame, 23 Maggio al 18 Luglio, sono stati misurati i principali parametri termoigrometrici, T_{air} , $T_{radiante}$, RH, e velocità dell'aria, e la concentrazione di anidride carbonica CO_2 , quale indicatore della qualità dell'aria.

L'analisi del comfort termico e ambientale, è stata condotta su 5 ambienti di diversa tipologia (Uffici, Laboratori, Auditorium) ritenuti caratteristici dell'edificio. Per tutti gli ambienti selezionati, differenti per superficie, esposizione, e presenza di occupanti, sono stati in primis analizzati i profili orari delle grandezze microclimatiche misurate, e successivamente calcolati gli indici di Fanger (PMV e PPD) su base giornaliera e settimanale

Dall'analisi effettuata non sono emerse particolari criticità riguardo il comfort termico: gli indicatori sono risultati infatti nei range ammissibili nella quasi totalità dei locali esaminati. Qualche difformità si è evidenziata negli uffici più grandi, dotati di soppalco, in cui sono presenti fino a 5 postazioni di lavoro: le zone soppalcate sono risultati generalmente più calde delle zone sottostanti, seppur con differenze lievi.

Le concentrazioni di CO_2 , indicative della qualità dell'aria e del tasso di ventilazione degli ambienti in esame, sono risultate nella norma in tutti i locali, tranne che per l'Auditorium. In quest'ultimo, monitorato durante i giorni della Summer school 2016, con una presenza di 50 persone, sono emersi valori di anidride carbonica eccessivi, dovuti ad un insufficiente ricambio d'aria. In questo locale, potrebbe essere valutata l'installazione di un sistema di ventilazione meccanica, in sostituzione di quello attuale non ben funzionante.

Le misure effettuate, in conclusione, restituiscono un quadro positivo per quanto riguarda il benessere termoigrometrico indoor durante la stagione estiva, e un buon funzionamento dell'impianto di climatizzazione.

Le centraline tutt'ora installate, potranno fornire ulteriori dati microclimatici, relativi ad altri periodi dell'anno in modo integrare le analisi effettuate ed ottenere un quadro completo del microclima indoor dell'edificio. L'analisi della qualità ambientale effettuata potrà quindi supportare la diagnosi energetica in corso, ed indirizzare gli interventi di riqualificazione energetica dell'edificio. Ulteriori monitoraggi di tipo strumentale potranno inoltre essere effettuati anche dopo l'eventuale realizzazione degli interventi per accertare il rispetto di standard adeguati per il comfort termico e la qualità dell'aria.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] UNI EN ISO 7726:2002 Ergonomics of the thermal environment Instruments for measuring physical quantities
- [2] UNI EN ISO 7730:2006 Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [3] UNI EN 15251:2008 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics
- [4] Microclima, aerazione e illuminazione nei luoghi di lavoro Requisiti e standard Indicazioni operative e progettuali Linee Guida, CTIPL ISPESL 2006
- [5] Terrinoni Luciano, Signoretti Paolo, Iatauro Domenico (2012). Classificazione dei comuni italiani ai fini della classificazione estiva degli edifici. ENEA Technical Report (RT/2012/23/ENEA).
- [6] Solaritaly –Atlante Italiano della Radiazione Solare- ENEA <http://www.solaritaly.enea.it>
- [7] ASHRAE (2001) Fundamentals handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA
- [8] FANGER, P.O. and CHRISTENSEN, N.K., Perception of Draught in Ventilated Spaces, Ergonomics, 29: pp. 215-235, 1986