



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi del comfort microclimatico in edifici pubblici ad uso ufficio del territorio del Sulcis

C. Frau, E. Loria, A. Madeddu, F. Poggi



ANALISI DEL COMFORT MICROCLIMATICO IN EDIFICI PUBBLICI AD USO UFFICIO DEL TERRITORIO DEL SULCIS

Caterina FRAU, Eusebio LORIA, Alessandra MADEDDU, Francesca POGGI

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Tema di Ricerca: Edifici ad energia quasi zero (NZEB)

Progetto A – Riqualificazione energetica di edifici con interventi di efficientamento

Obiettivo a.2 – Analisi del comfort microclimatico

Responsabile del Progetto: dott.ssa Franca Rita Picchia ENEA

Responsabile scientifico ENEA: ing. Paolo Deiana.

Responsabile scientifico SOTACARBO: ing. Enrico Maggio

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 LA QUALITÀ GLOBALE DEGLI AMBIENTI INTERNI	6
2.1 IL BENESSERE TERMICO	6
2.2 IL BENESSERE ILLUMINOTECNICO	10
2.3 IL BENESSERE RELATIVO ALLA QUALITÀ DELL'ARIA	11
3 MODALITÀ E STRUMENTI DI MISURA PER L'ANALISI DELLA QUALITÀ DEGLI AMBIENTI INTERNI.....	13
3.1 STRUMENTI PER LA MISURA DEI PARAMETRI DI COMFORT	13
3.2 STRUMENTI PER LA MISURA DEI PARAMETRI TERMOIGROMETRICI ESTERNI.....	16
3.3 STRUMENTI PER LA MISURA DEI PARAMETRI ILLUMINOTECNICI	18
4 ANALISI DI EDIFICI	19
5 ANALISI DELL'EDIFICIO SEDE DEL COMUNE DI CARBONIA.....	20
5.1.1 <i>Il palazzo municipale del Comune di Carbonia</i>	20
5.2 FASE DI MONITORAGGIO	22
5.3 ESITO DEL MONITORAGGIO	47
6 ANALISI DI UN EDIFICIO PUBBLICO AD USO UFFICI	54
6.1.1 <i>Il Centro Ricerche Sotacarbo</i>	54
6.2 FASE DI MONITORAGGIO	55
6.3 ESITO DEL MONITORAGGIO	88
7 CONCLUSIONI.....	92
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	94

Sommario

Il presente lavoro approfondisce l'attività già avviata nella precedente annualità (STUDIO SPERIMENTALE DEL MICROCLIMA INTERNO IN EDIFICI PUBBLICI DEL SULCIS, Report RdS/PAR 2015/XXX) relativa alla qualità globale degli ambienti interni negli edifici. Diversi sono gli obiettivi: studiare i parametri che definiscono la qualità di un ambiente interno, studiare le metodologie di indagine in funzione degli obiettivi delle analisi ed infine analizzare l'influenza degli occupanti nella gestione dei parametri indoor.

Nella prima parte del lavoro si è fatto riferimento a quanto già analizzato nel precedente anno in termini dei parametri che caratterizzano gli ambienti interni (il comfort termoigrometrico, la qualità dell'aria interna ed illuminotecnica e la relativa normativa di riferimento), le tecniche di misura.

Per analizzare le tematiche del comfort termico, illuminotecnico, della gestione e salubrità (salute e benessere degli occupanti) sono stati scelti edifici pubblici situati nel comune di Carbonia, nel SO della Sardegna.

In particolare sono state approfondite tematiche di qualità dell'aria, ventilazione, salubrità, efficienza energetica in edifici pubblici storici ad uso ufficio.

1 Introduzione

Il Ministero dello Sviluppo Economico e l'ENEA hanno stipulato in data 21 Aprile 2016 l'Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2015-2017 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

Questo lavoro si inserisce negli studi svolti in seno all'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Sotacarbo rivolto allo sviluppo di una ricerca dal titolo "PARTE B: Edifici ad energia quasi-zero" facente capo al piano annuale di realizzazione 2016 dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, ed in particolare agli ambiti attinenti il Tema di Ricerca "Edifici a energia quasi zero (NZEB)", progetto A "Riqualificazione energetica di edifici con interventi di efficientamento".

Il lavoro, di prosecuzione dell'attività già avviata nella precedente annualità (STUDIO SPERIMENTALE DEL MICROCLIMA INTERNO IN EDIFICI PUBBLICI DEL SULCIS, Report RdS/PAR 2015/XXX), persegue gli stessi obiettivi generali rivolti all'efficientamento del patrimonio pubblico. Lo sviluppo delle tecnologie per l'efficienza energetica, l'uso di tecnologie e la conoscenza di dati tipologici e dei consumi energetici degli edifici pubblici sono le principali azioni con le quali è possibile far fronte alla riduzione dei consumi termici e alla diminuzione della richiesta di energia elettrica nel settore. Le attività previste costituiscono una base finalizzata alla caratterizzazione del patrimonio edilizio pubblico insistente sulla Regione Sardegna, e allo sviluppo di una metodologia per interventi di efficienza energetica in edifici vincolati nel territorio del Sulcis. In un'ottica di eco-sostenibilità, il progetto edilizio e impiantistico deve contemplare le soluzioni tecniche di carattere strutturale, e quelle di carattere gestionale (dispositivi per la regolazione locale dei parametri ambientali, configurazioni atte a consentire l'illuminazione naturale o il raffrescamento notturno) che consentano all'utente di gestire correttamente il sistema edificio impianto, ottenendo soddisfacenti livelli di comfort con il minimo consumo di risorse energetiche. I consumi di energia per riscaldamento, ventilazione climatizzazione e illuminazione di un edificio sono direttamente influenzati dal livello di comfort ambientale. I consumi energetici possono poi subire significative variazioni in relazione a molteplici aspetti quali ad esempio aspettative di comfort dell'utente (valori di set point per temperatura, umidità relativa, qualità dell'aria, illuminamento, etc), e disponibilità di risorse naturali per il controllo del microclima (numero di ore di luce naturale, numero di ore in estate in cui l'aria esterna è utilizzabile per raffrescare gli ambienti etc), strategie che l'utente adotta per il controllo ambientale (programmazione temporale dei valori di set point, uso dell'illuminazione artificiale, apertura e chiusura delle finestre, etc), pertanto non ha senso occuparsi della qualità energetica di un edificio senza contemporaneamente determinare il livello di qualità dell'ambiente interno cui ci si riferisce, sia esso di progetto oppure in esercizio [1].

Risulta pertanto necessario comprendere da cosa dipendono principalmente i consumi energetici degli edifici, studiare gli scambi termici attraverso i componenti dell'involucro opaco e trasparente e analizzare la qualità degli impianti. Il miglioramento di questi componenti deve però necessariamente tener in considerazione le esigenze delle persone, al fine di garantire un adeguato livello di comfort. A livello europeo sono state promosse azioni comunitarie per la promozione della riduzione dei consumi in edilizia miranti ad accelerare le azioni di risparmio energetico e a ridurre le differenze tra i vari stati membri, attraverso la definizione di un quadro normativo di riferimento, in modo da coordinare gli interventi nel settore edilizio. Gli obiettivi da raggiungere, sia per gli edifici nuovi che per quelli esistenti riguardano, in sintesi, lo sviluppo delle energie rinnovabili, l'uso efficiente dell'energia nel settore edilizio e domestico e la riduzione di consumi con l'obiettivo del comfort indoor. Il comfort ambientale è diventato un requisito fondamentale che influisce non solo sulla sensazione di benessere, ma anche sulla produttività. Molti uffici pubblici sono collocati in edifici storici caratterizzati da vincoli architettonici di pregio storico-culturale dove l'inserimento di nuovi impianti tecnologici trova spesso difficile installazione.

Sulla base di tali considerazioni si sono attrezzati alcuni edifici storici pubblici con centraline di misura dotate di sensori di microclima interno (in termini di temperatura, umidità, concentrazione di CO₂), del tipo acquisito nel corso della precedenti annualità, e, sulla base dei dati misurati si sono determinati alcuni indici relativi alla qualità dell'aria interna. Tale studio stabilisce una baseline in vista della riqualificazione energetica degli edifici oggetto di studio.

2 La qualità globale degli ambienti interni

Nel mondo occidentale, la maggior parte delle persone trascorre gran parte del proprio tempo in ambienti chiusi, i quali ne influenzano lo stato mentale, le azioni, le abilità e la performance [2]. Secondo la US Environmental Protection Agency, nei Paesi altamente industrializzati, la popolazione occupa il 90% del proprio tempo in ambienti confinati. Tale evidenza, ha spinto i ricercatori ad occuparsi delle problematiche relative all'inquinamento dell'aria indoor e, più in generale, al benessere degli occupanti di ambienti chiusi. In letteratura ci sono diversi studi che dimostrano come un ambiente di lavoro poco organizzato e insoddisfacente possa causare una diminuzione della produttività del lavoratore, in termini di stimolo, creatività e innovazione [3]. Risulta quindi essenziale valutare il comfort globale degli ambienti interni, non solo per il benessere degli occupanti, ma anche per il rendimento delle attività che si svolgono, contribuendo a migliorare la qualità e la competitività sul lavoro.

La gestione della qualità degli ambienti interni richiede la verifica e il monitoraggio delle diverse componenti dell'ambiente, dalla fase preliminare del progetto, a quella di realizzazione e manutenzione dell'edificio. Attraverso i parametri fisico-ambientali - temperatura, umidità relativa, qualità dell'aria, illuminazione, ventilazione - viene determinata la sensazione di comfort, come risposta di fattori ambientali e condizioni fisiologiche individuali, come la salute e le relazioni sociali.

In riferimento a questi ultimi aspetti, alcuni studi [4] hanno dimostrato una maggiore tolleranza da parte degli individui a condizioni microclimatiche "meno stringenti" nel caso di ambienti con ventilazione naturale, che inducono una più ampia accettabilità delle condizioni termoigrometriche [5]. Questo aspetto evidenzia la considerazione secondo la quale la sensazione di benessere, provata da un individuo, non può essere spiegata esclusivamente da equazioni di bilancio termico tra persona e ambiente circostante, ma deve tener conto di altri parametri, di natura comportamentale, contestuale, in grado quindi di alterare la sensazione termica percepita. Gli argomenti che stanno alla base della qualità globale degli ambienti interni sono stati ampiamente descritti ed analizzati nel report della precedente annualità. Si riporta pertanto una trattazione sintetica di quanto già specificato nel documento citato. Si evidenzia, inoltre, che per i casi oggetto di studio, si è fatto riferimento al comfort termico, illuminotecnico e della qualità dell'aria.

2.1 Il benessere termico

Il comfort termico viene definito da ASHRAE standard 55 (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) come una condizione psicofisica di soddisfazione dell'individuo per l'ambiente termico in cui vive e opera [6]. Dal punto di vista oggettivo le condizioni di comfort termico globale si valutano, come suggerito dalla normativa UNI EN 7730, con l'indice PMV (Predicted Mean Vote). Sinteticamente quest'ultimo deriva dall'equazione di bilancio termico il cui risultato viene rapportato ad una scala di benessere psicofisico (tabella 2.1.1) ed esprime il parere medio (voto medio previsto) sulle sensazioni termiche di un campione di soggetti situati nel medesimo ambiente.

Tabella 2.1.1 Scala di valutazione dell'ambiente termico.

PMV	PPD %	VALUTAZIONE AMBIENTE TERMICO
+3	100	Molto caldo
+2	75,7	Caldo
+1	26,4	Leggermente caldo
+0,85	20	Ambiente termicamente accettabile
+0,5 < PMV < -0,5	<10	Benessere termico
-0,85	20	Ambiente termicamente accettabile
-1	26,8	Leggermente freddo
-2	76,4	Freddo
-3	100	Molto freddo

Il voto medio previsto, il cui valore può essere determinato con differenti metodi, tra cui, software, grafici o tabelle o per via analitica, è espresso in funzione di sei parametri di cui:

quattro, dipendenti dalle condizioni microclimatiche e rilevabili mediante l'utilizzo di apposita strumentazione:

1. La temperatura dell'aria T_a [°C], che influenza gli scambi termici convettivi tra l'uomo e l'ambiente.
2. L'umidità relativa dell'aria interna UR_a [%]; parametro climatico importante per gli effetti che può avere sugli organismi biologici dal momento che influenza gli scambi di vapore acqueo tra l'organismo stesso e l'ambiente.
3. La temperatura media radiante T_{mr} [°C], che influenza gli scambi termici radiativi e rappresenta la media ponderata delle temperature delle pareti interne che delimitano un ambiente e il corpo umano.
4. La velocità dell'aria v_a [m/s], ovvero la ventilazione di un ambiente, che agisce direttamente sia sul benessere termico degli individui (le correnti d'aria provocano situazioni di discomfort), sia sulla qualità dell'aria interna e quindi sulle condizioni di salute degli occupanti.

due di tipo soggettivo, legati al comportamento dell'individuo nell'ambiente:

- Il tasso metabolico varia in un ampio range e dipende dall'attività, dal soggetto e dalle condizioni nelle quali si svolge l'attività. La potenza metabolica viene riferita all'unità di superficie corporea [W/m^2] ed è più frequentemente misurata in met (1 met = 58,2 W/m^2). Indicativamente, 1 met equivale alla potenza metabolica specifica di un individuo sano in posizione seduta ed a riposo (convenzionalmente $A= 1,8 m^2$, per persona alta m 1,70 e pesante Kg 70). È possibile misurarla direttamente, valutando il consumo d'ossigeno, o desumerla dalle tabelle riportate da specifiche norme tecniche. La tabella riportata di seguito ne fornisce un estratto.

Tabella 2.1.2 Valori di metabolismo per diverse attività fisiche - norma UNI EN ISO 7730.

Attività	Metabolismo energetico	
	W/m^2	met
Disteso	46	0,8
Seduto, rilassato	58	1
In piedi, rilassato	70	1,2
Attività sedentaria (ufficio, casa scuola, laboratorio)	70	1,2
Attività in piedi (compere, laboratorio, industria leggera)	93	1,6
Attività in piedi (commesso, lavori domestici, lavori a macchina)	116	2
Attività moderata (lavoro pesante a macchina, lavoro in garage)	165	2,8

- La resistenza termica dell'abbigliamento I_{cl} , dipende dal tipo di vestiario indossato dall'occupante. Gli abiti formano, infatti, una barriera agli scambi che avvengono per irraggiamento, convezione e conduzione tra il corpo umano e l'ambiente circostante. Generalmente la resistenza che i capi di vestiario oppongono agli scambi di calore viene misurata in clo ($1\ clo = 0,155\ m^2C/W$). Nella seguente tabella si riportano valori tipici della resistenza termica di alcuni tipici abbigliamento.

Tabella 2.1.3 Valori di resistenza termica per diversi tipi di abbigliamento - norma UNI EN ISO 7730.

Abbigliamento	Icl (clo)
Nudo	0
Tipico abbigliamento tropicale: mutande, pantaloncini, camicia a maniche corte con collo sbottonato, calzini leggeri e sandali.	0,3
Abbigliamento leggero estivo: mutande, pantalone leggero, camicia a maniche corte con collo sbottonato, calzini leggeri e scarpe.	0,5
Abbigliamento da lavoro leggero: mutande, maglia intima, camicia a maniche lunghe, pantaloni da lavoro, calzini di lana, scarpe.	0,7
Tipico abbigliamento invernale per ambienti chiusi: mutande, maglia intima, camicia a maniche lunghe, pantaloni, giacca pullover a maniche lunghe, calzini pesanti, scarpe.	1
Abito tradizionale pesante all'europea: biancheria intima di cotone con maglia a maniche lunghe, pantaloni.	1,5

All'indice PMV è associato l'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), che esprime la percentuale di persone insoddisfatte delle condizioni climatiche in esame. La relazione fra PPD e PMV, mostrata in figura 2.1 è data dall'equazione:

$$PPD = 100 - [95 \times e^{-(0,03353 PMV^4 - 0,2179 PMV^2)}] \quad (7)$$

dalla quale si può osservare che anche in caso di neutralità termica rappresentata da $PMV=0$, rimanga comunque una percentuale pari al 5% di persone insoddisfatte. Questa ridotta percentuale lascia trasparire come, anche in caso di parametri ambientali ottimali, ci sia sempre una piccola percentuale di insoddisfazione, probabilmente dovuta a fattori soggettivi.

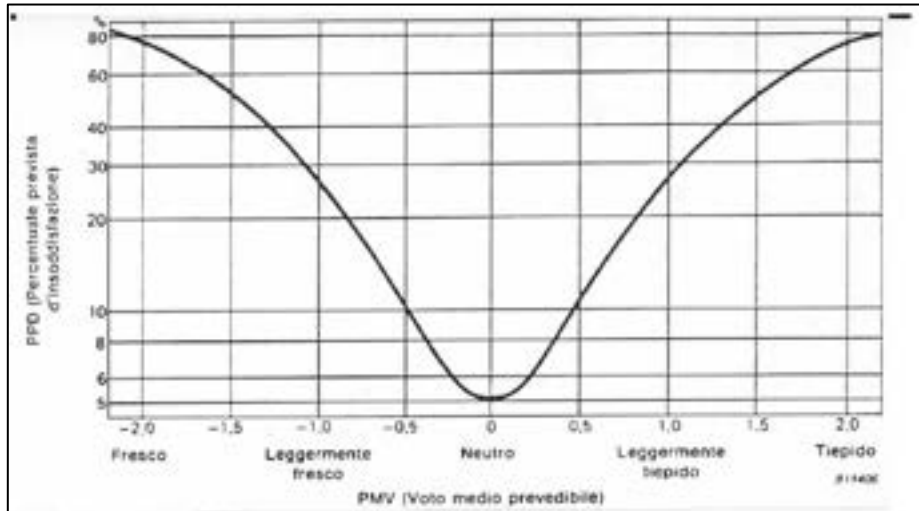


Figura 2.1 Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto medio previsto (PMV).

Secondo la norma ISO 7730, si definiscono “condizioni di comfort” quelle caratterizzate da valori di PMV compresi tra -0,5 e +0,5, e “condizioni di neutralità termica” quelle con PMV = 0. Sulla base delle indicazioni della normativa, l’intervallo di applicabilità degli indici di Fanger per ambienti moderati è il seguente:

Tabella 2.1.4 Intervallo di variazione dei parametri – NORMA ISO 7730.

Quantità	Simbolo	Intervallo di applicabilità
Temperatura dell’aria	t_a	10 – 30 °C
Temperatura media radiante	t_r	10 – 40 °C
Velocità dell’aria	v_a	0 – 1 m/s
Umidità relativa	u_{ra}	30 – 70 %
Attività metabolica	M	0,8 – 4 Met
Resistenza termica del vestiario	I_{cl}	0 – 2 clo

Gli indici di Fanger forniscono un’indicazione dello stato di comfort termico globale percepito dagli individui che occupano un determinato ambiente, ma non tengono conto dei possibili disagi che essi possono avvertire a livello locale a causa delle disuniformità delle variabili ambientali.

Un ambiente che rispetta i requisiti di *comfort* termico, può dunque presentare alcuni punti o zone non confortevoli a causa di fenomeni locali. Queste forme localizzate di discomfort non devono essere sottovalutate anche se interessano solo una porzione, magari contenuta, dell’ambiente, perché possono creare notevole disagio per chi si trova in tali zone. Le cause di discomfort termico localizzato possono derivare da:

- Gradiente verticale della temperatura dell’aria. Il valore accettabile di questo parametro deve portare ad una differenza massima di 3°C tra il livello delle caviglie (0,1 m dal pavimento) a quello della nuca (1,1 m dal pavimento – per una persona seduta), con un gradiente di 1,9 °C/m. tale gradiente viene normalmente rispettato con soluzioni impiantistiche di climatizzazione tradizionali.
- Asimmetria nella temperatura piana radiante. È il parametro che misura l’esistenza di una differenza nella radiazione percepita e viene definito pari alla differenza di tali temperature sulle due facce di una piccola superficie verticale od orizzontale all’interno di un ambiente.
- Temperatura superficiale del pavimento. Al fine di evitare una sensazione di discomfort, il valore di questo parametro deve essere compreso all’interno dell’intervallo 18-29 °C.

- Disturbo da correnti di aria. Questo fenomeno è avvertito principalmente da persone in attività sedentaria e comporta il raffreddamento localizzato di una parte del corpo. Normalmente le zone più critiche sono le caviglie (0,1 m dalla quota del piano calpestato) e la nuca (1,1 m per le persone sedute e 1,7 m per persone in piedi). Affinché vengano salvaguardate condizioni di comfort accettabile, la PPD riferita alle persone che lamentano tale fenomeno deve essere al massimo pari al 15% (UNI EN ISO 7730).

2.2 Il benessere illuminotecnico

La corretta illuminazione degli ambienti di lavoro è necessaria per consentire lo svolgimento delle proprie mansioni in qualsiasi stagione e a qualsiasi ora del giorno. L'illuminazione dev'essere sempre adeguata quantitativamente e qualitativamente al tipo di attività svolta. Diversi studi [7] hanno dimostrato come la luce naturale influisca positivamente sulle persone, dal momento che incrementa il benessere visivo, fisiologico e psicologico; pertanto è importante studiare attentamente, in fase di progettazione, una configurazione dell'edificio tale da permettere una penetrazione ottimale della luce. D'altro canto, il controllo della luce diurna è fondamentale, specialmente in ambito lavorativo, dove il rapporto verso l'esterno si è visto essere strettamente collegato alla performance e al comfort dell'utente. Il controllo dell'illuminamento naturale è uno dei requisiti che concorrono al benessere dell'organismo in relazione dinamica col contesto ambientale. L'illuminazione naturale deve essere utilizzata nella maggiore misura possibile anche al fine ridurre il consumo energetico.

Per essere considerato ben illuminato, un ambiente deve rispondere ai seguenti requisiti:

- Buona visibilità, per un corretto svolgimento di attività;
- Comfort visivo, cioè soddisfare necessità di carattere fisiologico e psicologico;
- Sicurezza, per agevolare il movimento.

La normativa di riferimento, per gli ambienti interni, è la UNI EN 12464-1 che specifica i requisiti illuminotecnici per i posti di lavoro che corrispondono alle esigenze di comfort e di prestazione visiva.

Tabella 2.2.1 UNI EN 12464-1 Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: posti di lavoro in interni – uffici.

Tipo di interno compito o attività	E_m lux	UGR _L	R _a	Note
Archiviazione, copiatura	300	19	80	
Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati	500	19	80	
Disegno tecnico	750	16	90	
Postazioni CAD	500	19	80	
Sale conferenze e riunioni	500	19	80	L'illuminazione deve essere regolabile
Ricezione (reception)	300	22	80	
Archivi	200	25	80	

2.3 Il benessere relativo alla qualità dell'aria

La qualità dell'aria negli ambienti confinati (Indoor Air Quality, IAQ) rappresenta uno dei fattori più importanti per il benessere degli occupanti.

Gli effetti della cattiva qualità dell'aria interna possono limitarsi a suscitare una sensazione sgradevole negli occupanti, ma possono anche risultare seriamente dannose per la salute umana, con effetti irritanti.

Negli ambienti di lavoro moderati, le conseguenze di un ambiente poco salubre possono manifestarsi attraverso un quadro sintomatologico ben definito come la Sick-Building Syndrome (SBS), che non appartiene ad una vera e propria malattia clinica, ma risulta legata ad una serie di disturbi, che colpiscono la maggior parte delle persone che soggiornano in determinati tipi di edifici, come cefalea, irritazione agli occhi, naso e gola, tosse secca, pelle disidratata, vertigini o nausea, difficoltà di concentrazione ed affaticamento. Questi sintomi si manifestano in una elevata percentuale di soggetti, con particolare frequenza in quelli che lavorano in ufficio [8], scompaiono o si attenuano dopo l'uscita dai locali e non sono accompagnati da reperti obiettivi rilevanti.

I principali fattori che causano tali disturbi sono imputabili agli edifici (materiali da costruzione, arredi, rivestimenti), agli impianti di condizionamento e ventilazione, ai piani di manutenzione, al tipo e all'organizzazione del lavoro oltreché a fattori personali.

I sintomi della SBS, così come i suoi effetti, sono modesti e comportano un significativo calo della produttività e possono rappresentare su larga scala un costo più elevato di alcune gravi malattie.

La qualità dell'aria dipende anche da sostanze che penetrano dall'esterno accumulandosi nell'ambiente.

Uno dei fattori necessari a definire il comfort all'interno di un edificio è la qualità dell'aria. In un ambiente frequentato, la qualità di quest'ultima tende a diminuire e ciò è dovuto ad un calo della percentuale di ossigeno e ad un conseguente aumento del biossido di carbonio (CO₂); a questo va ad aggiungersi un incremento percentuale dell'umidità dell'aria accompagnato dal possibile sviluppo di cattivi odori.

Le principali fonti degli inquinanti rilevabili all'interno degli edifici non industriali (uffici) e le relative cause sono riportate in tabella 2.3.1:

Tabella 2.3.1 Fonti e considerazioni sugli inquinanti negli ambienti interni.

Materiali	La scelta dei materiali influisce sia sull'ambiente esterno che su quello interno. Le fonti degli inquinanti sono: solventi, fibre minerali, terreno (gas radon), pesticidi, arredo interno (pavimentazione, adesivi, tappeti, rivestimenti, vernici, coloranti, pitture).
Costruzione	La progettazione e la realizzazione non accurata degli edifici influiscono sulla qualità degli ambienti interni. I seguenti aspetti devono essere studiati e approfonditi: ermeticità dell'involucro, risparmio energetico e ventilazione.
Occupanti	I contaminanti possono essere introdotti a causa di: attività degli occupanti, umidità, fumo di tabacco, fotocopiatrici, prodotti per la pulizia, introduzione di diossido di carbonio, composti organici, particolato.
Fattori ambientali Manutenzione e gestione	Umidità e muffe, gas radon, emissioni di gas e di inquinanti esterni. Contribuiscono a peggiorare l'IAQ la scarsa manutenzione dell'edificio e dei controlli e l'errata gestione degli ambienti.

Per migliorare la qualità dell'aria sono possibili diverse azioni:

- Controllo della fonte dell'aria;
- Pulizia dell'aria (tramite assorbimento o fotocatalisi);
- Utilizzo della ventilazione personalizzata [9, 10].

Gli impianti aeraulici concorrono all'ottenimento della desiderata qualità dell'aria nei locali serviti dall'impianto stesso. Ciò è reso possibile mediante il meccanismo di diluizione con aria esterna e tramite l'impiego di filtri ed altri sistemi di abbattimento e neutralizzazione dei contaminanti.

La norma EN 13779 (ventilazione degli edifici non residenziali – Requisiti prestazionali per i sistemi di ventilazione e condizionamento) classifica la qualità dell'aria interna in 4 categorie, da IDA 1, che indica il grado di qualità più alto, a IDA 4, che rappresenta una bassa qualità di aria interna. Questa classificazione assume come marker la concentrazione di CO₂, rappresentando di fatto un buon indicatore dell'efficacia dei sistemi di ventilazione.

Tabella 2.3.2 Valori di concentrazione di CO₂ all'interno dei locali.

Categorie di qualità dell'aria	Rif UNI EN 13779	Differenza di concentrazione di CO₂ tra aria interna ed aria esterna [ppm]
Elevata	IDA1	≤400
Media	IDA2	400 - 600
Modesta	IDA3	601 - 1000
Bassa	IDA4	>1000

3 Modalità e strumenti di misura per l'analisi della qualità degli ambienti interni

Sul mercato sono disponibili vari tipi di strumenti di misura, adatti per il monitoraggio a breve, medio e lungo termine. Sono classificati in base alle caratteristiche prestazionali, ai prezzi, alle dimensioni e al tipo di trasmissione dati, ecc. Si riporta nel seguito la strumentazione adoperata per la misura dei parametri indoor e outdoor. Per le specifiche indoor si rimanda alla UNI EN 7726.

3.1 Strumenti per la misura dei parametri di comfort

Per la valutazione e il monitoraggio del comfort ambientale degli ambienti oggetto del presente studio, sono stati utilizzati sensori igrometrici per interno e centraline microclimatiche.

Le centraline microclimatiche (figura 3.1.1), prodotte dalla ditta Tecno El. sono caratterizzate dalle seguenti componenti principali:

- Un sistema di acquisizione dati **GRILLO MMTS** (figura 3.1.2), che si avvale della tecnologia Wifi, GPS o GPRS per la trasmissione dei dati sulla piattaforma WEB OLINDA. In questo modo l'utente può visualizzare da remoto e in tempo reale il processo evolutivo delle grandezze misurate. Questo sistema è in grado di accettare in ingresso il segnale elettrico dei trasduttori più comunemente utilizzati.
- Un sensore termoigrometrico (figura 3.1.3), posto all'interno di uno schermo antiradiazione solare, che rileva la temperatura e l'umidità relativa dell'aria.
- Un sensore globotermometrico (figura 3.1.4), che rileva la misura della temperatura media radiante.
- Un sensore anemometrico (figura 3.1.5), che rileva la velocità e la direzione dell'aria.
- Un sensore di CO₂ (figura 3.1.6) che rileva la concentrazione di anidride carbonica nell'ambiente.
- I connettori, denominati **A, B, C, D, Power e RS232** (tabella 3.1.1), posti sulla parte inferiore dell'unità Grillo, permettono il collegamento dei sensori all'acquisitore dati.



Figura 3.1.1 Centralina microclimatica Grillo MMTS.



Figura 3.1.2 Unità Grillo MMTS.



Figura 3.1.3 Sonda termoigrometrica.



Figura 3.1.4 Sonda globotermometrica.



Figura 3.1.5 Sonda anemometrica sonora.

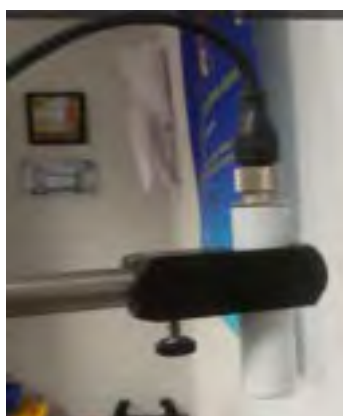


Figura 3.1.6 Sensore CO2.

Tabella 3.1.1 Caratteristiche connettori.

	
Connettore A	dedicato al sensore termoigrometrico
Connettore B	dedicato al sensore globotermometrico
Connettore C	dedicato al sensore anemometrico
Connettore D	dedicato al sensore di CO ₂
Connettore Power	dedicato all'ingresso dell'alimentazione esterna
Connettore RS232	per il colloquio con il software del sistema.

Oltre alle centraline Grillo, si è potuto disporre anche del sistema di monitoraggio acquistato nelle precedenti annualità, prodotto dalla Gemini Datalogger, distributore dei prodotti Tinytag, considerati affidabili e ottimali per applicazioni relative alla diagnosi ambientale degli edifici. Il sistema è costituito da più unità indipendenti (stand-alone), che garantiscono la massima flessibilità di utilizzo e la possibilità di espansione della rete di monitoraggio. Ciascuna unità, dotata di uno o più sensori, è provvista di un sistema di acquisizione e registrazione dei dati. I dati memorizzati sullo strumento possono poi essere trasferiti via cavo su una unità centrale (un Personal Computer) previa installazione del software in dotazione con lo strumento. Il software consente di avviare e arrestare lo strumento, gestire le soglie di allarme e visualizzare e elaborare i dati.

I sensori sono caratterizzati da una elevata accuratezza e risoluzione di misura e una grossa capacità di immagazzinamento dati (variabile da 16000 a 32000 letture con tempi di campionamento da 1 sec a 10 giorni, possibilità di lettura per periodi sino a 45 giorni).

In particolare i componenti utilizzati per misure dei parametri igrometrici interni sono del tipo **TGU 4500 Tinytag Ultra** e hanno le seguenti caratteristiche:

- datalogger con sensori di temperatura e umidità integrati (-25 to +85°C/0 to 95% RH) per interni (IP53) caratterizzati da bassi gradi di umidità;
- sensore di temperatura montato internamente di tipo 10K NTC Thermistor con risoluzione di lettura di 0,01°C o superiore;
- sensore di umidità montato esternamente di tipo capacitivo con accuratezza di $\pm 3,0\%$ RH a 25°C e risoluzione di lettura maggiore di 0,3% RH.



Figura 3.1.7 TGU 4500 Tinytag Ultra 2 per misure in ambienti interni.

3.2 Strumenti per la misura dei parametri termoigrometrici esterni

Lo strumento utilizzato per le misure termoigrometriche in esterno è l'anemometro HD 52.3D ad ultrasuoni a due assi (figura 3.2.1) della ditta Delta Ohm. Esso consente di misurare le seguenti variabili:

- Velocità e direzione del vento

	Velocità del vento	Direzione del vento
Sensore impiegato	Ultrasuoni	Ultrasuoni
Campo di misura	0...60 m/s	0...360°
Risoluzione	0.01 m/s	0,1°
Accuratezza	± 0.2 m/s ± 2%	± 2° RMSE da 1.0 m/s

- Umidità relativa e temperatura

	Umidità relativa	Temperatura dell'aria
Sensore impiegato	Capacitivo	Pt100
Campo di misura	0...100% UR	-40...+60 °C
Risoluzione	0.1%	0.1 °C
Accuratezza (@ T= 15...35 °C)	± 1,5 % UR (0...90% UR), ± 2 %UR (restante campo)	
Accuratezza (@ T= -40...+ 60 °C)	± (1,5 + 1,5 % della misura) %UR	
Accuratezza		± 0,15 °C ± 0,1 % della misura

- Pressione atmosferica: sensore impiegato – Piezoresistivo; campo di misura – 300...1100 hPa; risoluzione – 0,1 hPa; accuratezza – ± 0,5 hPa @ 20 °;
- Radiazione solare diffusa: sensore impiegato – termopila; campo di misura – 0...2000 W/m²; risoluzione – 1 W/m²; accuratezza – piranometro di 2^a classe.



Figura 3.2.1 Anemometro HD 52.3D.



Figura 3.2.2 Sistema di acquisizione variabili termoigrometriche.

Il dispositivo è provvisto di un sistema di acquisizione e registrazione dei dati. I dati acquisiti vengono trasferiti via cavo su una unità centrale (un Personal computer) previa installazione del software in dotazione con lo strumento. Il software consente di avviare e arrestare lo strumento, di visualizzare e manipolare i dati.



Figura 3.2.3 Schermata principale software HD 52.3D-S.

L'unità principale ha le seguenti caratteristiche generali:

Caratteristiche generali unità principale	
Alimentazione	10...30 Vdc
Potenza assorbita	26 mA@ 12 Vdc senza riscaldamento, 6 W con riscaldamento
Uscite seriali	RS232, RS485, RS422 e SDI-12
Protocolli di comunicazione	NMEA, MODBUS-RTU, SDI-12
Connessione elettrica	Connettore maschio M23 da 19 poli
Temperatura di funzionamento	-40...+ 60°C
Dimensioni	H=179 mm, diametro = a50 mm
Peso	1 kg circa
Contenitore	Materiale plastico Parti metalliche in AISI 316
Grado di protezione	IP66

3.3 Strumenti per la misura dei parametri illuminotecnici

Il luxmetro è lo strumento che permette di misurare il valore dell'illuminamento sia con luce naturale che con luce artificiale. La normativa di riferimento è la UNI 11142:2004. È composto da una parte fissa (corpo strumento) e una mobile che contiene il sensore vero e proprio costituito da un trasduttore (cella fotovoltaica o altre celle fotoelettriche) che sotto l'effetto dell'energia luminosa reagisce provocando una corrente elettrica (effetto fotoelettrico) che viene rilevata da un galvanometro la cui scala è tarata in lux. Tale strumento viene utilizzato per la verifica dei livelli di illuminamento degli ambienti e sui luoghi di lavoro. Per l'esecuzione delle misure di intensità di illuminazione negli ambienti interni è stato utilizzato il luxmetro della ditta Testo (Modello 545).



Figura 3.3.1 Luxmetro – Testo (Modello 545).

Questo strumento, di dimensioni ridotte (220 x 68 x 50 mm) è dotato delle seguenti caratteristiche:

- sensore fotodiode al silicene;
- campo di misura che va da 0 a 100000 lux;
- precisione secondo DIN 13032-1: F1 = 6 % regolazione V (λ); F2 = 5 % cos come riferimento;
- risoluzione 1 lux (0 to 32000 lux); 10 lux (0 to 100000 lux).

4 Analisi di edifici

Nei capitoli successivi 5 e 6 vengono presentati alcuni casi studio affrontati durante questa annualità sulla base dei concetti e delle tecniche descritti nei precedenti capitoli.

Per analizzare le tematiche del comfort termico, illuminotecnico, della gestione e salubrità (salute e benessere degli occupanti) e le loro reciproche connessioni negli edifici residenziali è stata analizzata la qualità degli ambienti interni in edifici non residenziali.

In particolare sono stati approfonditi i temi del benessere indoor, qualità dell'aria, salubrità, in due edifici storici pubblici ad uso uffici.

5 Analisi dell'edificio sede del Comune di Carbonia

5.1.1 Il palazzo municipale del Comune di Carbonia

L'edificio in cui ha sede il Comune di Carbonia, è situato in Piazza Roma. Il suo recupero è uno degli interventi dell'ampio programma di riqualificazione degli spazi pubblici della città, concepita ed edificata negli anni trenta in seguito alla scoperta dell'imponente giacimento minerario di Serbariu.

Realizzata dall'Azienda Carboni Italiani, che nel 1937 affidò il progetto del primo piano urbanistico e dei monumenti civici ai romani Ignazio Guidi, Cesare Valle e al triestino Gustavo Pulitzer Finali, Carbonia è una particolare declinazione della città giardino europea, espressione della politica autarchica che ripropone l'uso di materiali e risorse locali pur in un contesto aggiornato e consapevole delle nuove tecnologie e dei riferimenti internazionali [11].

Dal punto di vista architettonico, è caratterizzata dai tipici elementi della città fascista: al centro si trova la Piazza Roma intorno alla quale sorgono i principali edifici pubblici: Chiesa, Municipio, Casa del Fascio-Torre Littoria, Cine-Teatro, Dopolavoro e Regie Poste.

Figura 5.1.1 Centro urbano di Carbonia.



Foto 5.1.2 Facciata principale del municipio durante la costruzione.



Foto 5.1.3 Facciata principale del municipio oggi.

Il Municipio, disegnato dall'architetto Pulitzer così come la quasi totalità degli edifici affacciati sulla piazza è caratterizzato da una forma ad "L" ed occupa una superficie coperta di circa 977,92 metri quadrati (su tre piani fuori terra). I caratteri costruttivi del Municipio, così come quelli delle altre architetture civili di Carbonia, costruite nello stesso periodo, risentono fortemente delle limitazioni tecniche imposte dall'autarchia. L'uso del ferro come materiale costruttivo a sé stante è nullo, così come fortemente ridotto è il ricorso al calcestruzzo armato.

Pulitzer propone una gerarchia classica tra basamento porticato rivestito in pietra, alzata intonacata con finestrate regolari, coronamento e copertura a falde: con l'unica eccezione dei solai in cemento armato, esso si configura come un edificio assolutamente tradizionale in muratura portante. Il prospetto, simmetrico e imperniato sull'ingresso principale, è integrato da alte aperture corrispondenti all'originaria Sala della Consulta: l'ambiente a doppia altezza è esattamente analogo, per logica, finiture e aperture, alla Sala del dopolavoro e a quella della Torre Littoria: in tutti e tre i casi, infatti, il grande taglio delle finestre rende manifesto in facciata il rango eccezionale dello spazio interno e lo mette in diretta comunicazione con il paesaggio urbano circostante. In aderenza all'ufficio postale (figura 5-2) era inserito il locale che ospitava, fin oltre il dopoguerra, il caffè principale della città: il Caffè dell'Impero. In esso, come pure del bar del Dopolavoro, Pulitzer mette a frutto la sua lunga esperienza in materia di architettura d'interni e arredamento: il marmo cipollino, dalle suggestive venature smeraldo, viene utilizzato per fare i basamenti, i sedili e la bottigliera del bar, conciliando efficacemente durabilità ed eleganza. La stessa pietra si trova nell'ingresso del palazzo comunale e ne riveste le scale dal caratteristico profilo curvilineo.

Il municipio ha subito negli anni numerose modifiche: da un punto di vista strutturale la più importante, avvenuta negli anni 70', ha riguardato la sopraelevazione di un piano con l'eliminazione della sala a doppia altezza e del locale adibito a caffè, convertiti in uffici comunali. Successivamente anche il locale adibito precedentemente ad ufficio postale che è stato accorpato al Comune.



Figura 5.1.4 Immagine storica dell'Ufficio Postale.



Figura 5.1.5 Immagine attuale dell'edificio ex-ufficio postale, ora accorpato al Comune.

Attualmente l'edificio municipale, la cui facciata principale si affaccia sul lato nord ovest di Piazza Roma, accoglie uffici tecnici, di rappresentanza, sale riunioni e uffici comunali aperti al pubblico.

5.2 Fase di monitoraggio

Si è proceduto ad effettuare il monitoraggio dei parametri microclimatici degli ambienti lavorativi del palazzo comunale, considerando sia la loro esposizione che la loro ubicazione in modo da comprendere i lati dell'edificio con differenti esposizioni solari. L'indagine ha riguardato un totale di 11 spazi di lavoro (tabella 5.2.1), la cui identificazione è specificata nelle planimetrie (figura 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3):

Tabella 5.2.1 Uffici oggetto del monitoraggio microclimatico.

Ambiente	Piano	Orientamento facciata esterna	Numero occupanti
Ufficio 52	primo	Sud -Est	2
Ufficio 88	secondo	Sud -Est	1
Ufficio 28	primo	Nord - Ovest	2
Ufficio 43	primo	Sud -Est	1
Ufficio 74	secondo	Nord - Est	3
Ufficio 79	secondo	Sud -Est	3
Ufficio 64	secondo	Nord - Ovest	1
Ufficio 49	primo	Sud -Est	1
Ufficio 9	terra	Nord - Ovest	1
Ufficio 15	terra	Sud -Est	3
Ufficio 20	terra	Sud -Est	1

Lo studio dei parametri di comfort ambientale è avvenuto nei mesi di agosto e settembre eseguendo i rilievi nella fascia oraria lavorativa 7:00 -14:30 in presenza del sistema di condizionamento. Per il monitoraggio sono state utilizzate le centraline microclimatiche "Grillo MMTS". Le misure sono state effettuate nelle reali condizioni operative degli ambienti, posizionando le centraline microclimatiche ad un'altezza di circa 1,1 metri dal suolo (livello testa) in prossimità delle postazioni di lavoro. In linea di massima la scelta del posizionamento delle centraline ha tenuto conto dei seguenti fattori:

- Disposizione dei dipendenti nell'ufficio;
- Presenza di superfici verticali fredde o calde quali le aperture;
- Facilità di collocazione della strumentazione.

Lo schema riportato in tabella 5.2.2 specifica l'ubicazione della centralina relativa all'arco temporale preso in esame. Inoltre, sono riportate le informazioni relative ai dati caratteristici per ciascun ambiente (tabella 5.2.3).

Dai dati sperimentali raccolti, è stato possibile determinare mediante un foglio di calcolo, gli indici di comfort termico. In particolare, il calcolo del PMV e del PPD è stato effettuato assumendo un valore di resistenza termica all'abbigliamento pari a 0,5 clo e corrispondente a 0,078 mq x °C/W (in condizioni di abbigliamento estivo leggero); e un valore di dispendio energetico pari a 1,2 met (attività sedentaria in ufficio, casa, scuola, laboratorio secondo la ISO 7730). L'andamento degli indici di comfort termico PMV e PPD è altresì riportato. Le grafiche riportate nel seguito mostrano il confronto tra le variabili temperatura, umidità relativa e concentrazione di CO₂ nei diversi uffici. Si è provveduto, inoltre, ad effettuare un'indagine relativa al comfort illuminotecnico nelle postazioni di lavoro all'interno degli uffici oggetto di studio. In particolare si riporta:

- Schema semplificato sulla ubicazione delle scrivanie, delle luci e delle finestre (tabella 5.2.4);
- Dati caratteristici lampade e misurazioni intensità luminosa per postazione (tabella 5.2.5);
- I grafici relativi alle misurazioni dei parametri microclimatici (Allegato 1);
- I grafici relativi alle misurazioni delle variabili indoor e outdoor (Allegato2).

Figura 5.2.1 Planimetria - piano terra - municipio di Carbonia con indicazione degli uffici oggetto del monitoraggio.

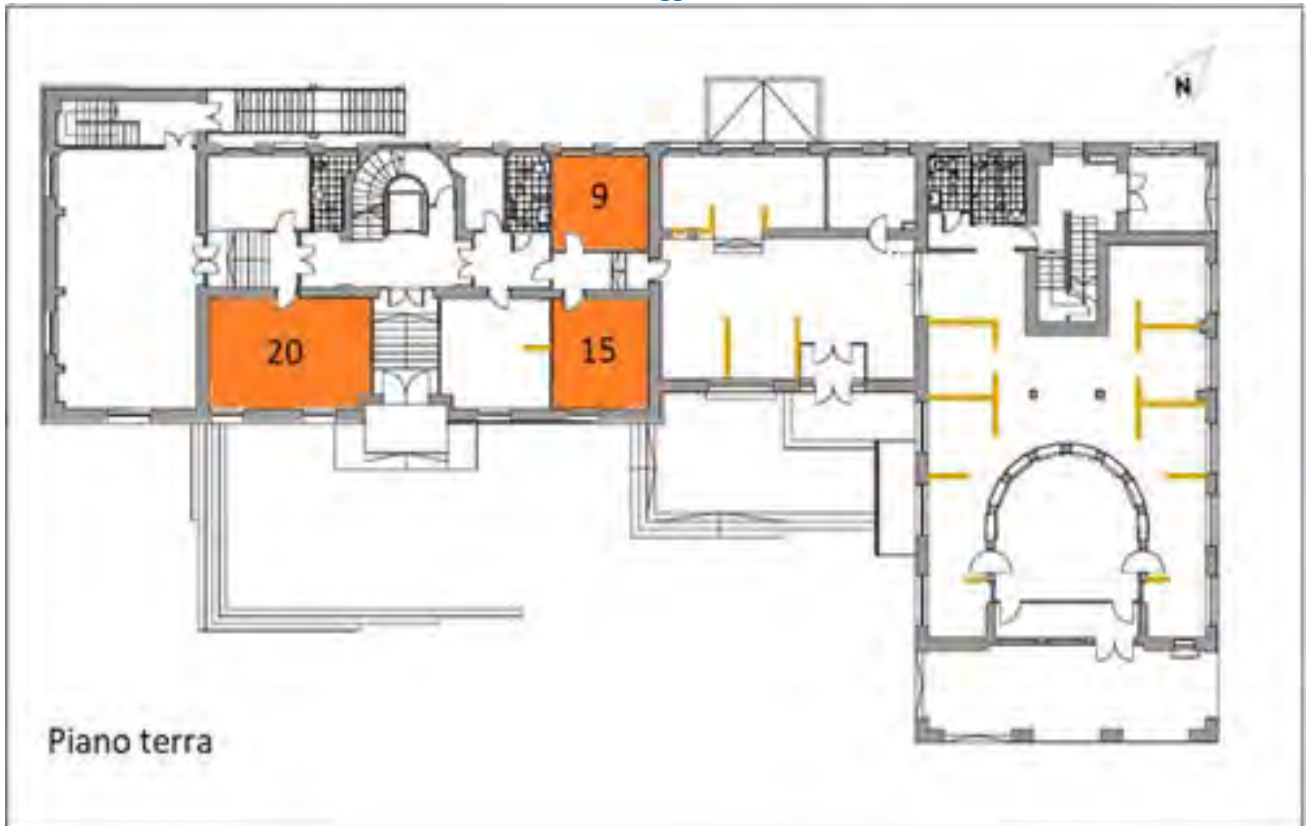


Figura 5.2.2 Planimetria - piano primo - municipio di Carbonia con indicazione degli uffici oggetto del monitoraggio.



Figura 5.2.3 Planimetria - piano secondo - municipio di Carbonia con indicazione degli uffici oggetto del monitoraggio.

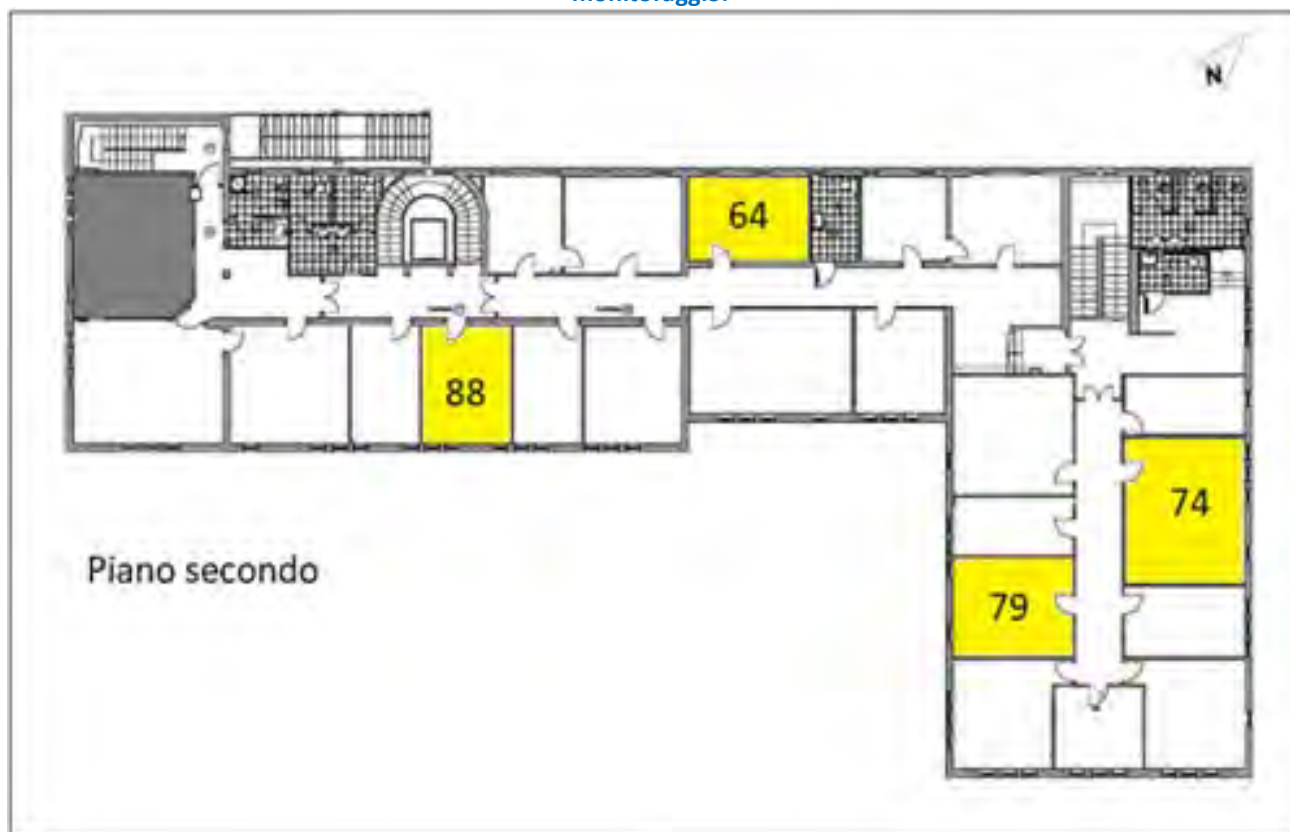


Tabella 5.2.2 Posizionamento centraline microclimatiche indoor C2, C3, C5.

Durata monitoraggio	C2	C3	C5	START/STOP INSTALLAZIONE CENTRALINE						
				C2	C3	C5	C2	C3	C5	
03 Ago – 11 Ago	Uff. 49 (piano primo)			START/STOP	h. 10:00	h. 10:15				
04 Ago – 11 Ago		Uff. 28 (piano primo)		START/STOP			h. 11:00	h. 12:45		
04 Ago – 04 Set			Uff. 88 (piano secondo)	START/STOP					h. 11:00	h. 19:00
11 Ago – 04 Set	Uff. 52 (piano primo)	Uff. 64 (piano secondo)		START/STOP	h. 12:15	h. 11:00	h. 13:00	h. 11:30		
04 Set – 20 Set	Uff. 43 (piano primo)	Uff. 79 (piano secondo)	Uff. 74 (piano secondo)	START/STOP	h. 13:00	h. 10:15	h. 13:00	h. 10:45	h. 13:00	h. 10:30
20 Set – 29 Set	Uff. 15 (piano terra)	Uff. 9 (piano terra)	Uff. 20 (piano terra)	START/STOP	h. 14:00	h. 10:00	h. 14:00	h. 10:00	h. 14:00	h. 10:00

Le immagini di seguito riportate sono relative agli ambienti in cui è stato eseguito il monitoraggio.

Ufficio 49 – piano primo



Ufficio 88 – piano secondo



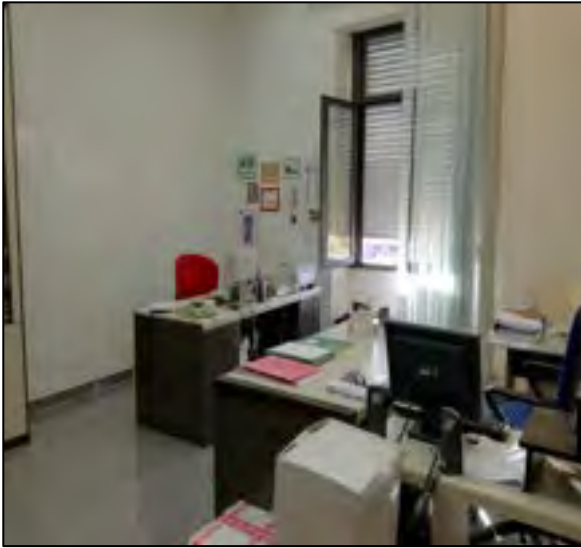
Ufficio 28 – piano primo



Ufficio 64 – piano secondo



Ufficio 52 – piano primo



Ufficio 43 – piano primo



Ufficio 79 – piano secondo



Ufficio 74 – piano secondo



Ufficio 15 – piano terra



Ufficio 9 – piano terra



Ufficio 20 – piano terra



Tabella 5.2.3 Dati caratteristici degli uffici monitorati.

Dati geometrici						Infissi				
Ubicazione	Altezza (m)	Larghezza (m)	Lunghezza (m)	Area (m ²)	Volume m ³	n. finestre	Dimensioni finestre (m)	Telaio	Schermature	Tipo di vetro
Ufficio 52	4	4,7	4,5	21,2	84,6	1	(H) 2 m x (L) 1,2 m	alluminio	Avvolgibili in PVC e tende	singolo
Ufficio 88	3	4,98	3,8	18,9	56,8	3	1.(H) 1,60 m x (L) 0,54 m 2.(H) 1,60 m x (L) 0,54 m 3.(H) 2,10 m x (L) 0,54 m	alluminio	tende	singolo
Ufficio 28	4	4,2	3,94	16,5	66,2	2	1.(H) 2 m x (L) 1,2 m 2.(H) 2 m x (L) 1,2 m	alluminio	Avvolgibili in PVC e tende	singolo
Ufficio 43	3,5	3,68	4,68	17,2	60,3	1	(H) 2 m x (L) 1,2 m	alluminio	Avvolgibili in PVC e tende	singolo
Ufficio 74	3,5	6,14	5,12	31,4	110	4	1.(H) 1,60 m x (L) 0,54 m 2.(H) 2,10 m x (L) 0,54 m 3.(H) 1,60 m x (L) 0,54 m 4.(H) 2,10 m x (L) 0,54 m	alluminio	tende	singolo
Ufficio 79	3,5	4	5,10	20,4	71,4	2	1.(H) 2,10 m x (L) 0,54 m 2.(H) 1,60 m x (L) 0,54 m	alluminio	tende	singolo
Ufficio 64	3,68	4,36	3,5	15,3	56,2	2	1.(H) 2,10 m x (L) 0,54 m 2.(H) 2,10 m x (L) 0,54 m	alluminio	tende	singolo
Ufficio 49	3,96	4	4	16	63,4	1	(H) 1,80 m x (L) 1,47 m	alluminio	Avvolgibili in PVC e tende	singolo
Ufficio 9	3,26	4,15	4	16,6	54,1	2	1.(H) 2,30 m x (L) 1,40 m 2.(H) 2,30 m x (L) 1,40 m	alluminio	Avvolgibili in PVC	singolo
Ufficio 15	3,78	5,67	4,70	26,6	100,7	1	(H) 2,30 m x (L) 1,40 m	alluminio	Avvolgibili in PVC e tende	singolo
Ufficio 20	3,9	4,7	2,96	13,9	54,3	1	(H) 2,30 m x (L) 1,40 m	alluminio	Avvolgibili in PVC e tende	singolo

Tabella 5.2.4 Riproduzione uffici Municipio di Carbonia.

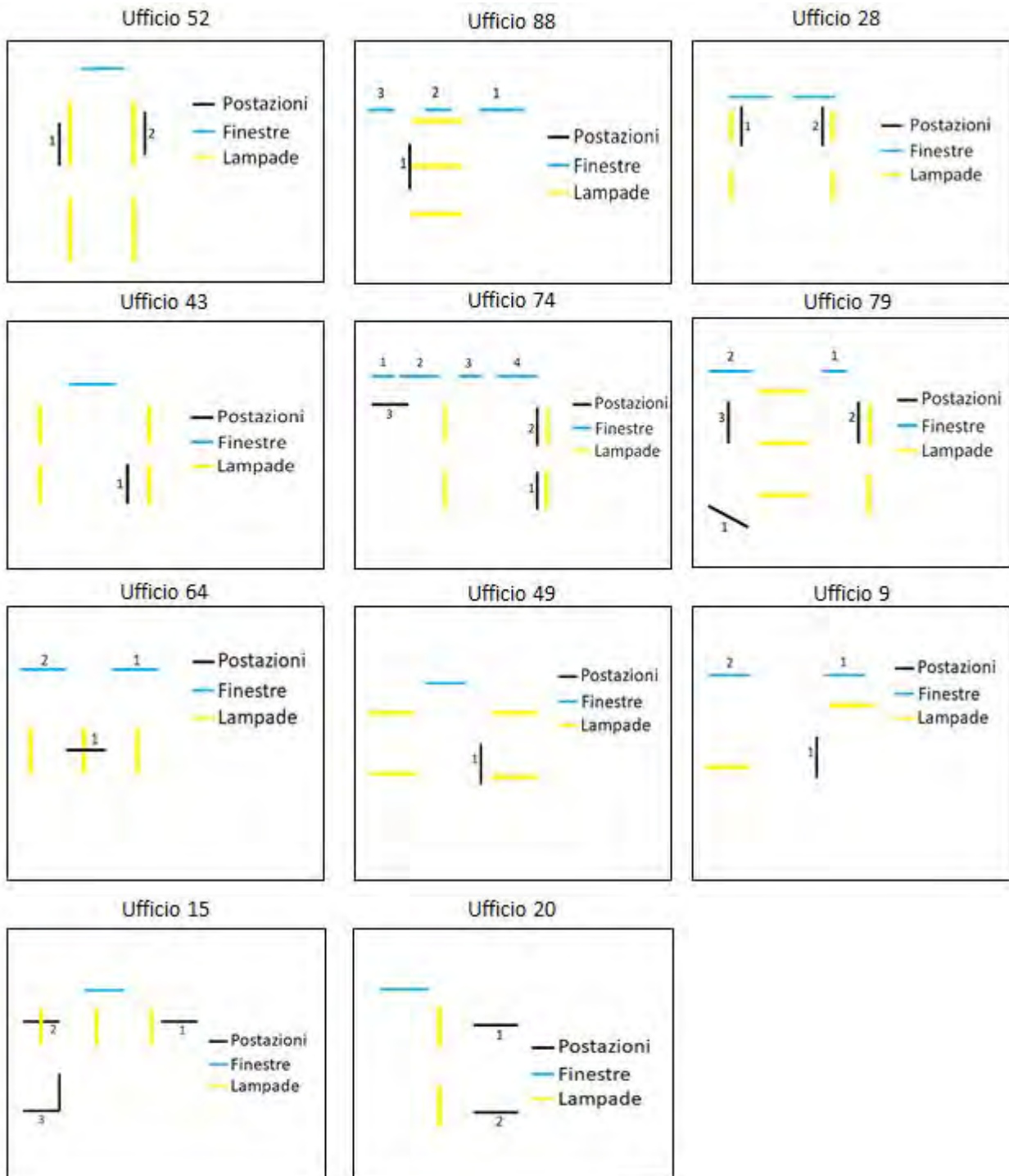
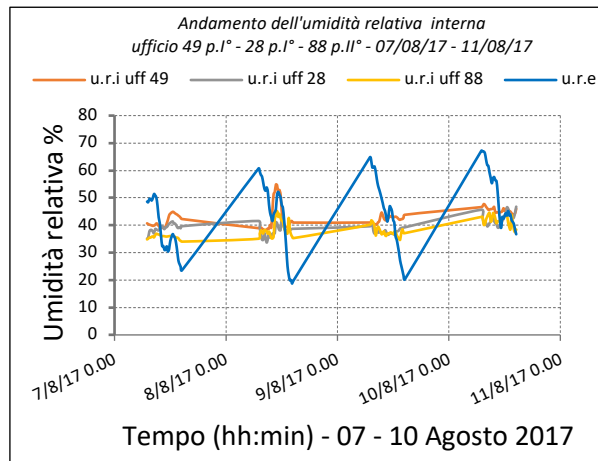
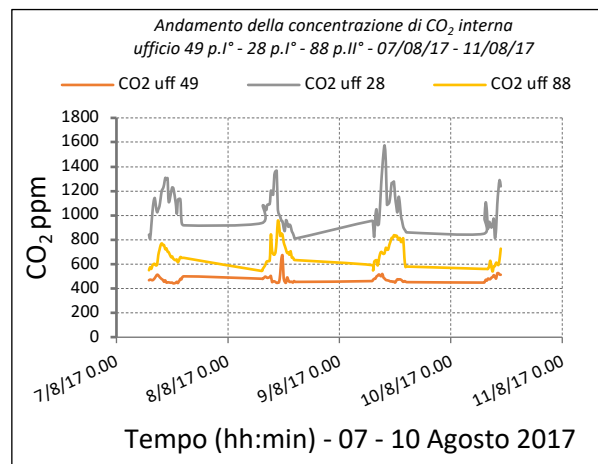
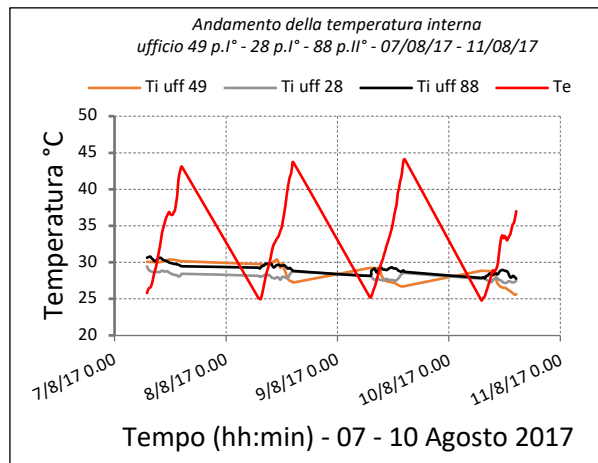


Tabella 5.2.5 Dati misurazioni illuminamento.

Luce artificiale (Lux)							
Ambiente	N. occupanti	Postazione	Tipologia lampade	ON	OFF	Contributo	Distanza dal punto di misura al corpo luce (m)
Ufficio 52	2	1	4 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	600	400	200	3,20
		2		960	600	360	3,20
Ufficio 88	1	1	3 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	1040	630	410	2,29
Ufficio 28	2	1	4 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	1080	580	500	3,20
		2		890	450	440	3,20
Ufficio 43	1	1	4 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	490	50	440	2,83
Ufficio 74	3	1	6 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	365	90	275	2,73
		2		341	108	233	2,73
		3		333	127	206	2,73
Ufficio 79	3	1	3 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	580	270	310	2,72
		2		900	580	320	2,72
		3		900	520	380	2,72
Ufficio 64	1	1	3 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	620	150	470	2,29
Ufficio 49	1	1	4 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	900	460	440	3,18
Ufficio 9	1	1	2 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	355	33	322	2,62
Ufficio 15	3	1	3 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	360	146	214	3
		2		320	158	162	3
		3		370	162	208	3
Ufficio 20	2	1	2 lampade a fluorescenza da 4 tubi ciascuna	1180	980	200	2,25
		2		896	560	336	2,25

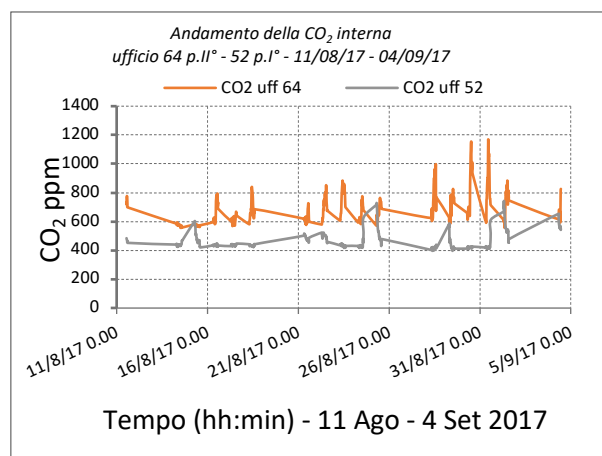
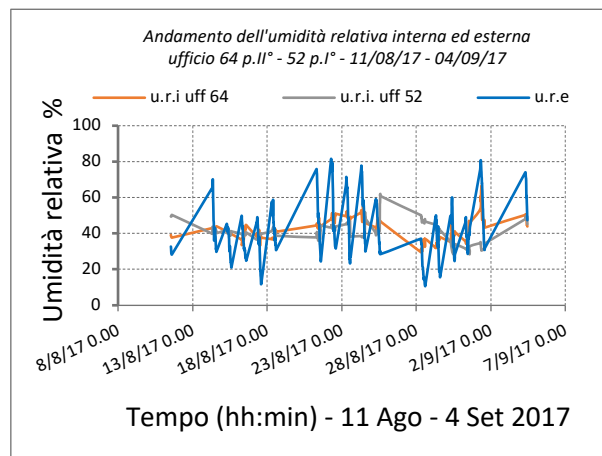
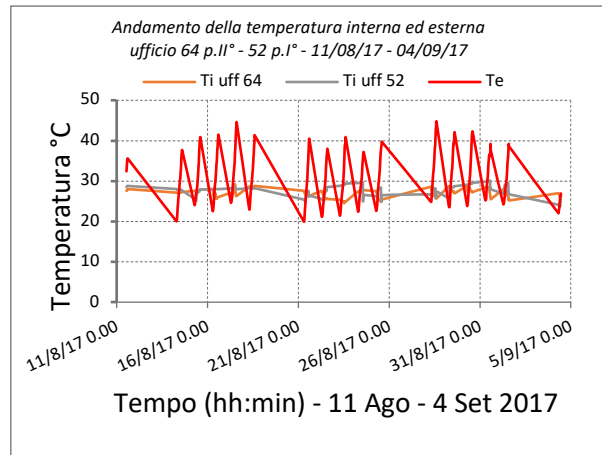
Confronto dell'andamento della temperatura, dell'umidità relativa e della concentrazione di CO₂ interna negli uffici monitorati – 07/08/17 – 11/08/17

a) Ufficio 49 (piano I°) – Ufficio 28 (piano I°) – Ufficio 88 (piano II°)



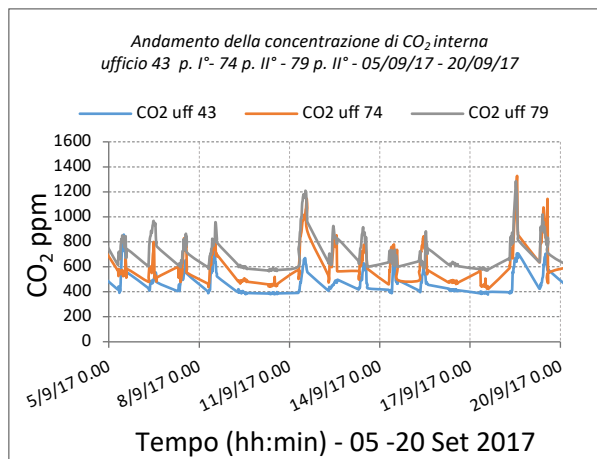
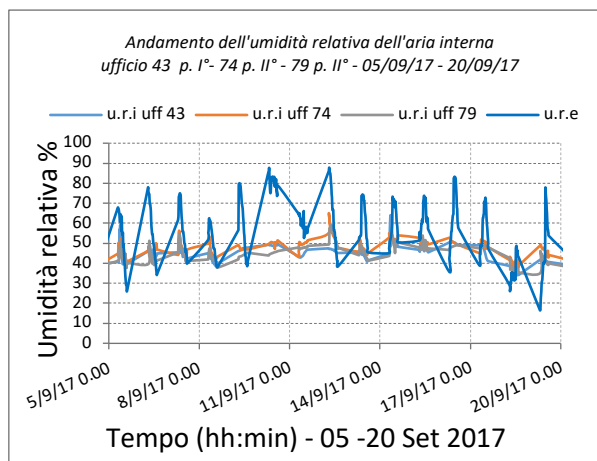
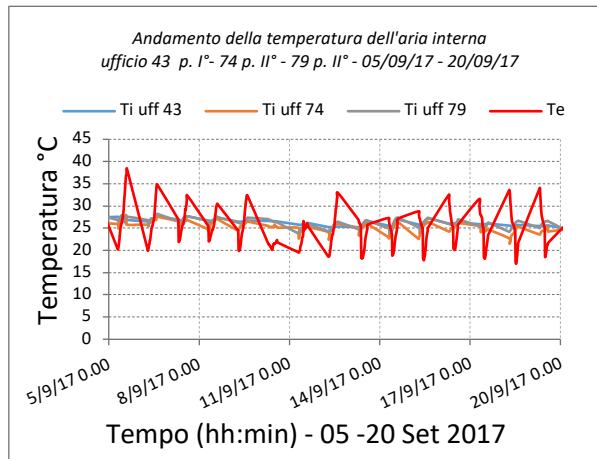
Confronto dell'andamento della temperatura, dell'umidità relativa e della concentrazione di CO₂ interna negli uffici monitorati – 11/08/17 – 04/09/17

b) Ufficio 64 (piano II°) – Ufficio 52 (piano I°)



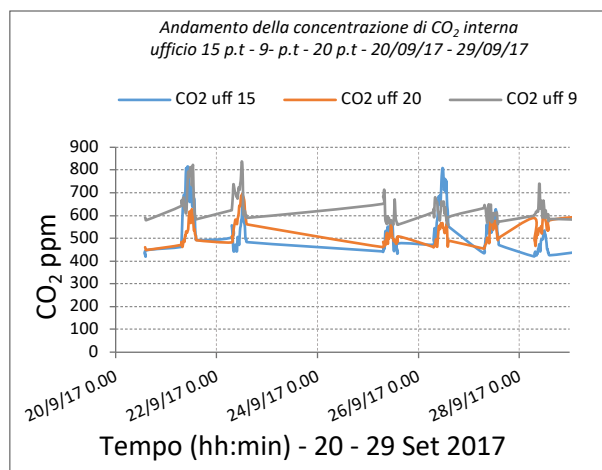
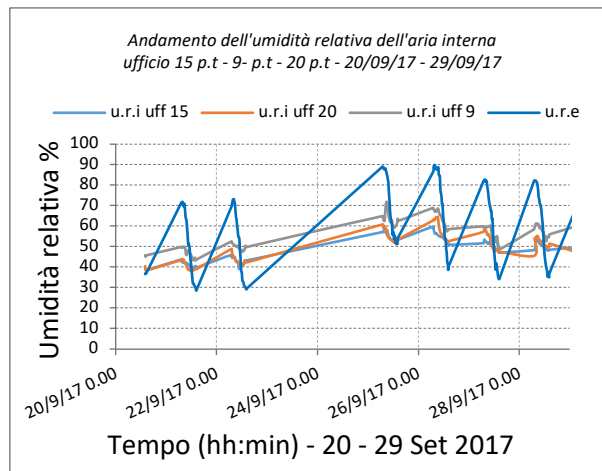
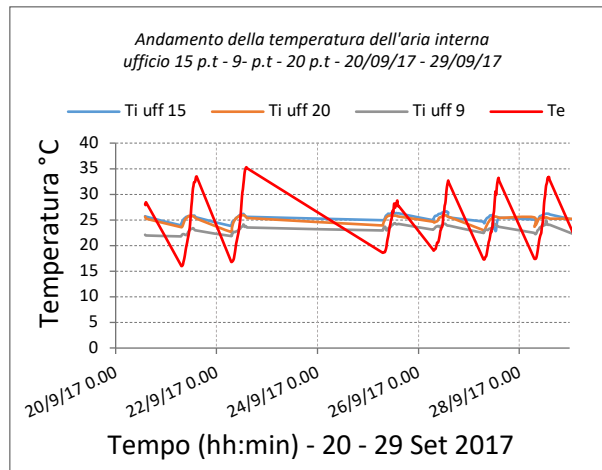
Confronto dell'andamento della temperatura, dell'umidità relativa e della concentrazione di CO₂ interna negli uffici monitorati – 05/09/17 – 20/09/17

c) Ufficio 43 (piano I°) – Ufficio 74 (piano II°) – Ufficio 79 (piano II°)



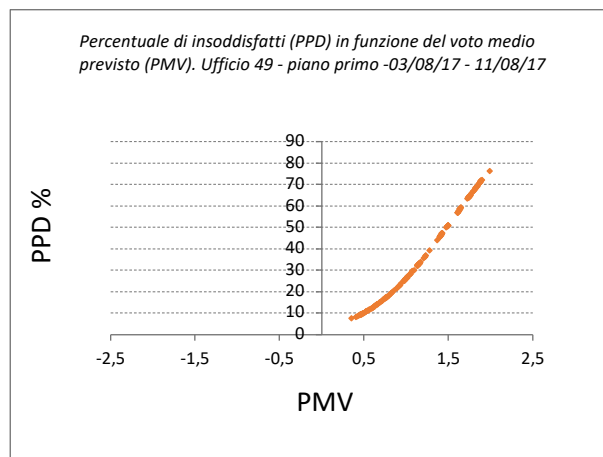
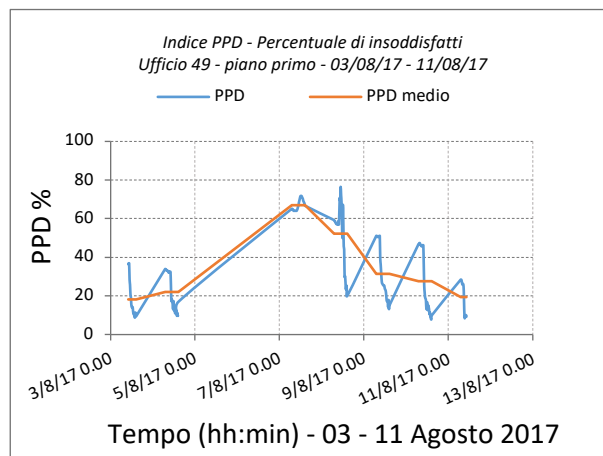
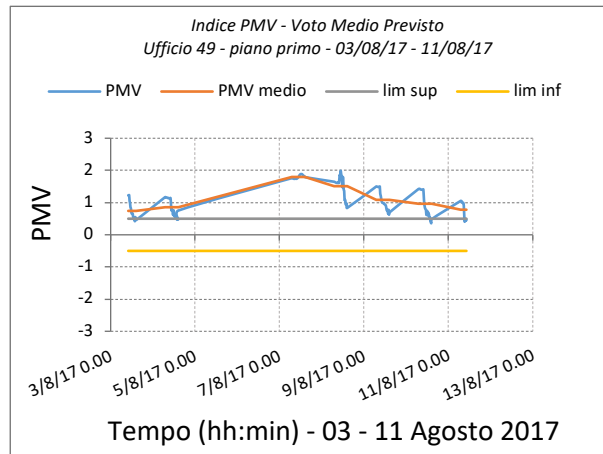
Confronto dell'andamento della temperatura, dell'umidità relativa e della concentrazione di CO₂ interna negli uffici monitorati – 20/09/17 – 29/09/17

d) Ufficio 15 (piano terra) – Ufficio 20 (piano terra) – Ufficio 9 (piano terra)



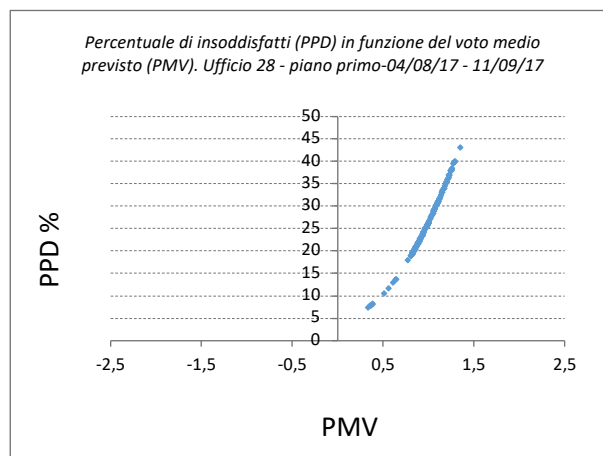
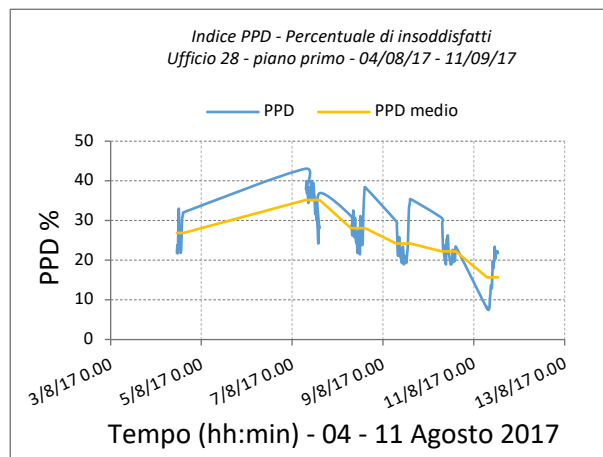
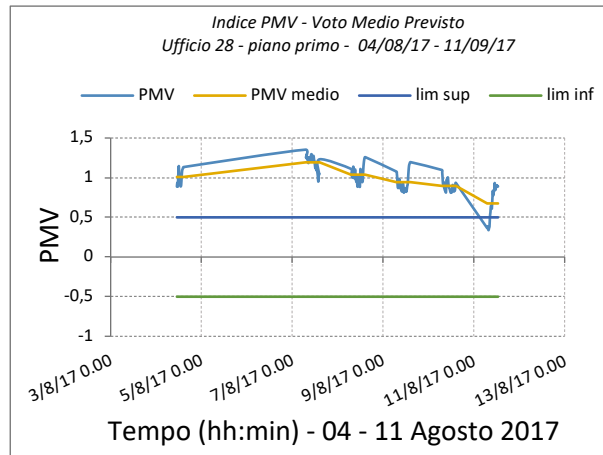
Indici di comfort termico - Periodo 03 – 11 Agosto

a) Ufficio 49



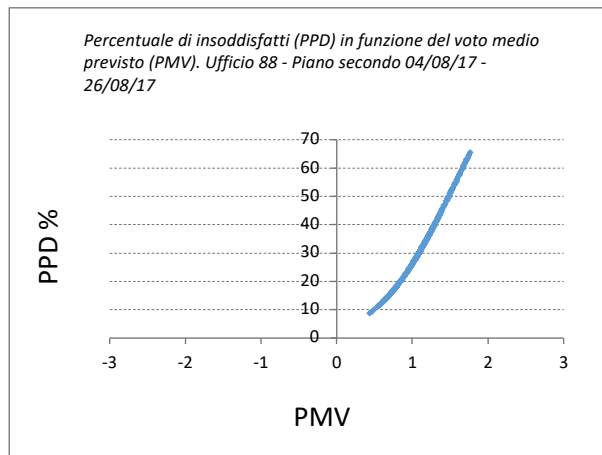
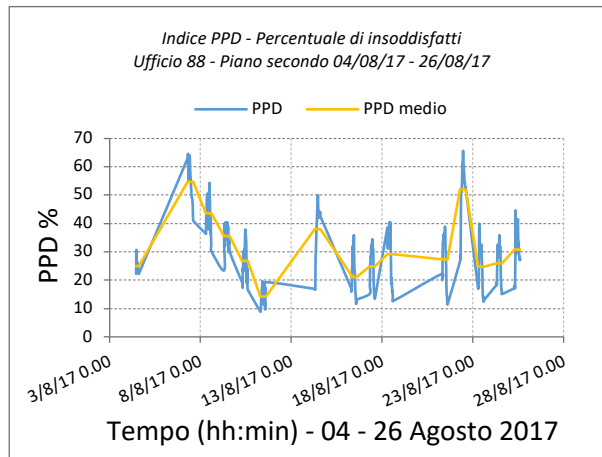
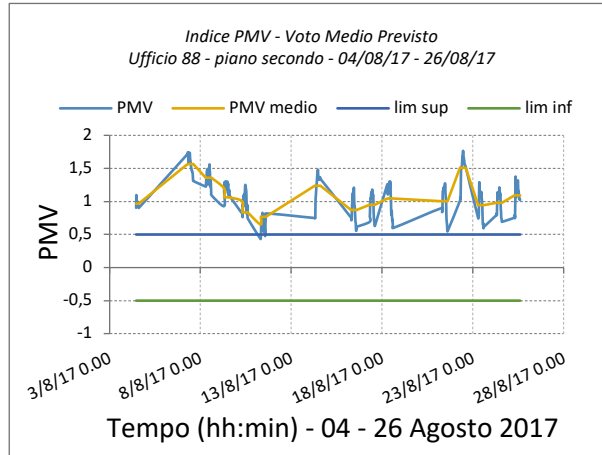
Indici di comfort termico - Periodo 04 – 11 Agosto

b) Ufficio 28



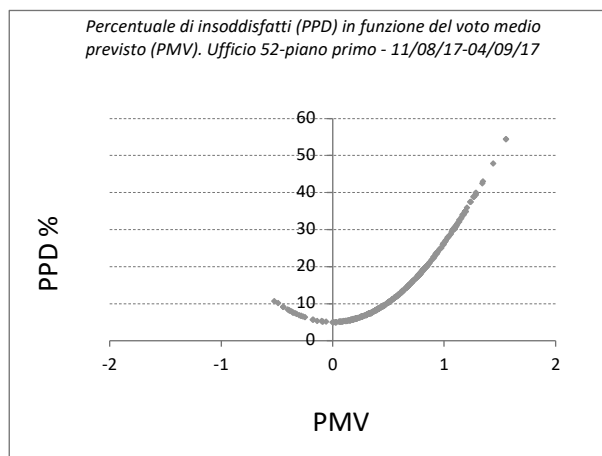
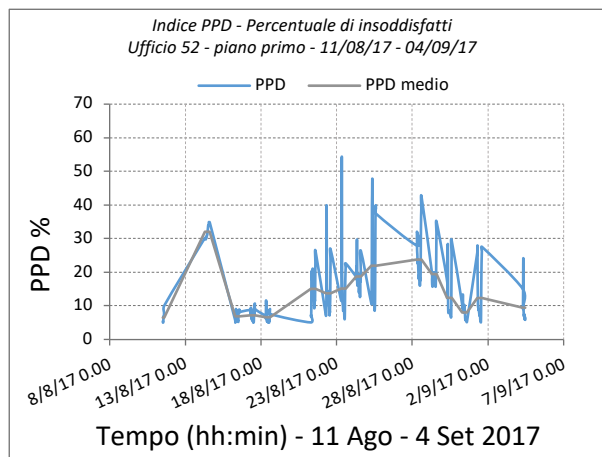
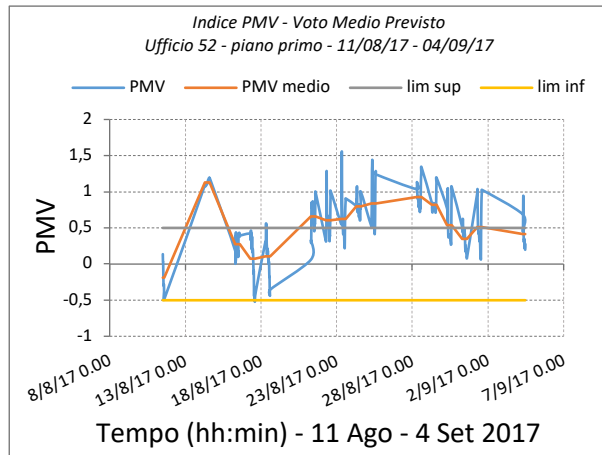
Indici di comfort termico - Periodo 04 Agosto – 04 Settembre

a) Ufficio 88

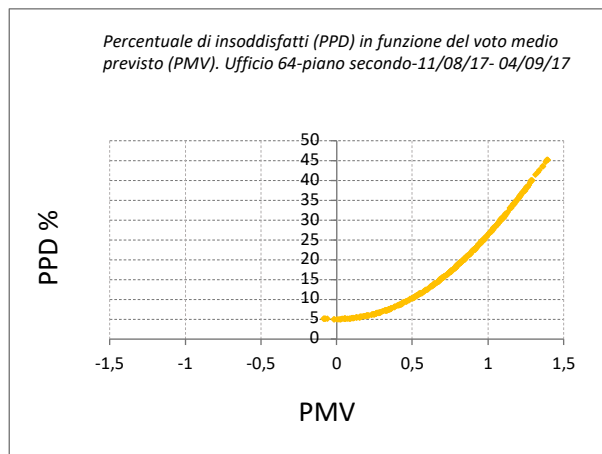
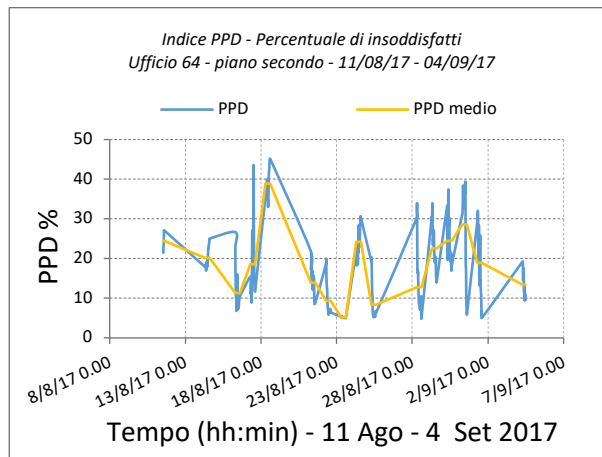
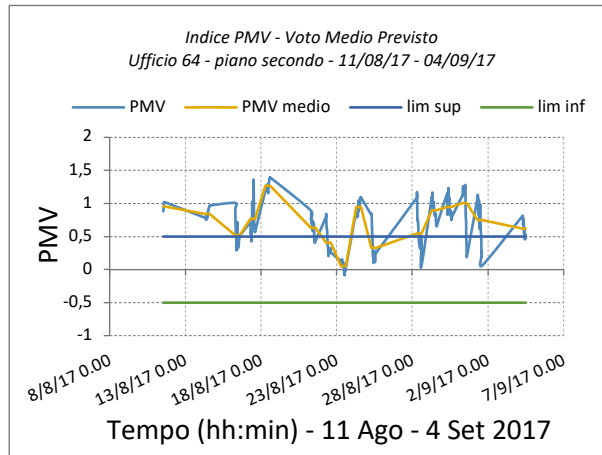


Indici di comfort termico - Periodo 11 Agosto – 04 Settembre

a) Ufficio 52

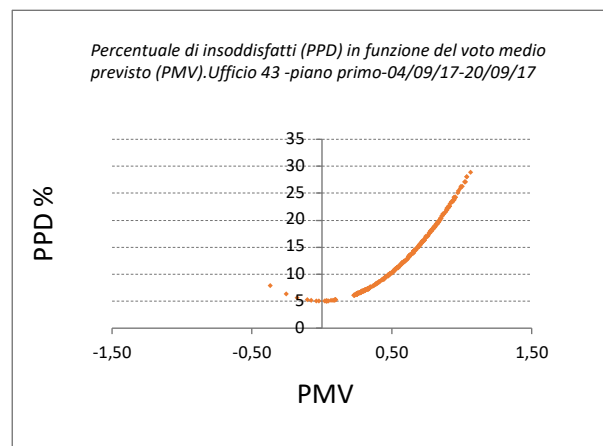
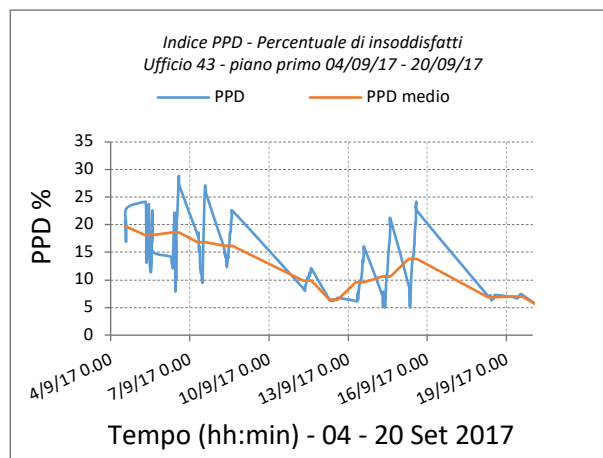
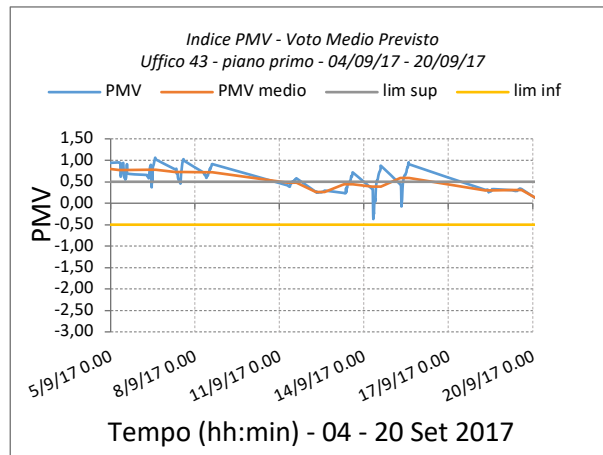


b) Ufficio 64

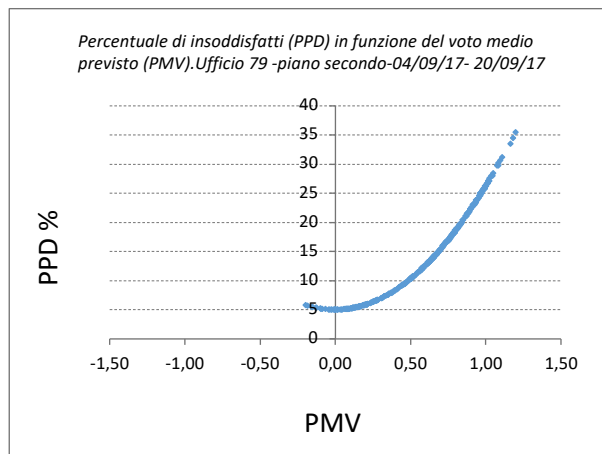
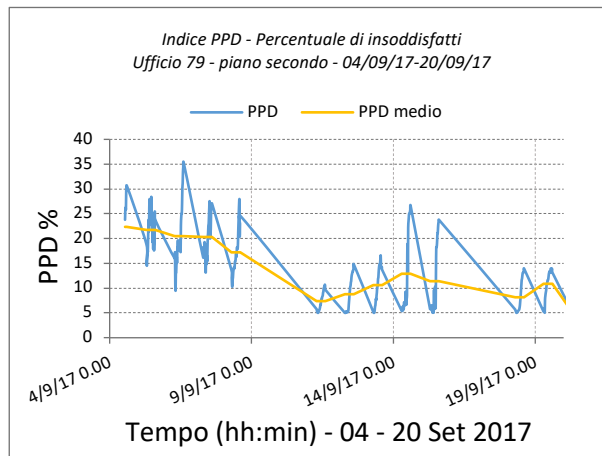
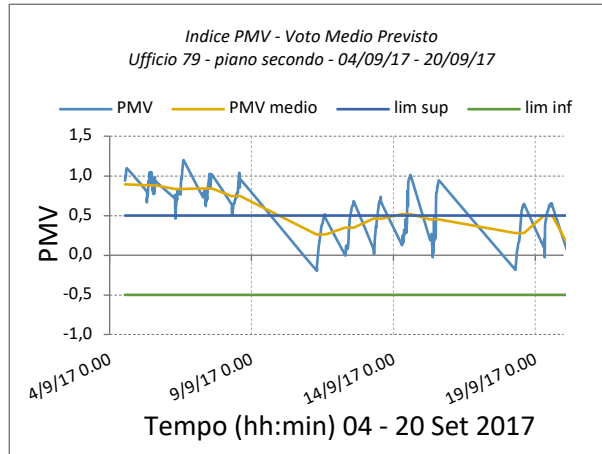


Indici di comfort termico - Periodo 04 – 20 Settembre

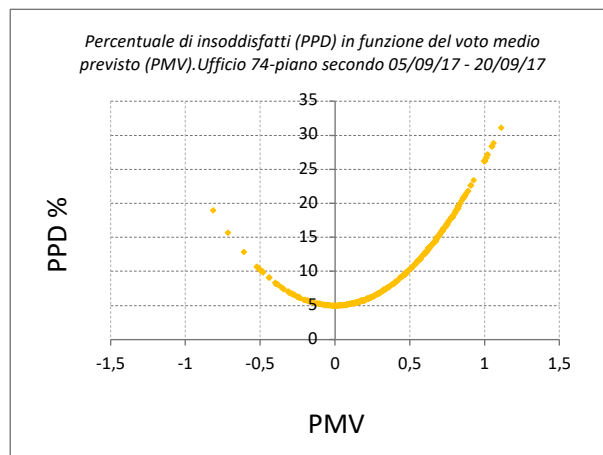
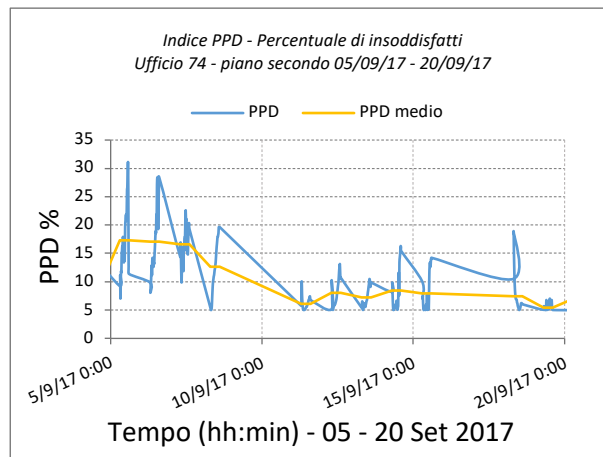
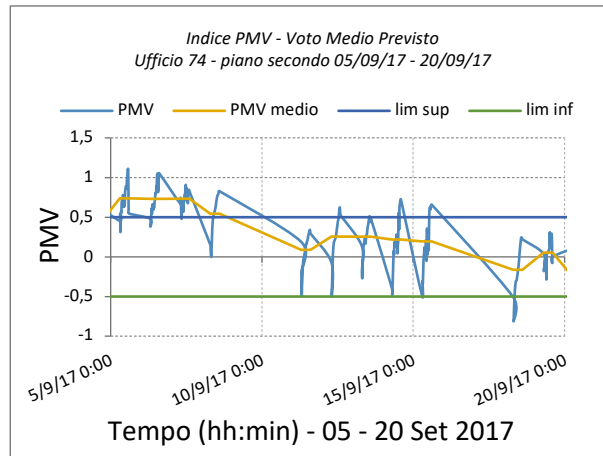
a) Ufficio 43



b) Ufficio 79

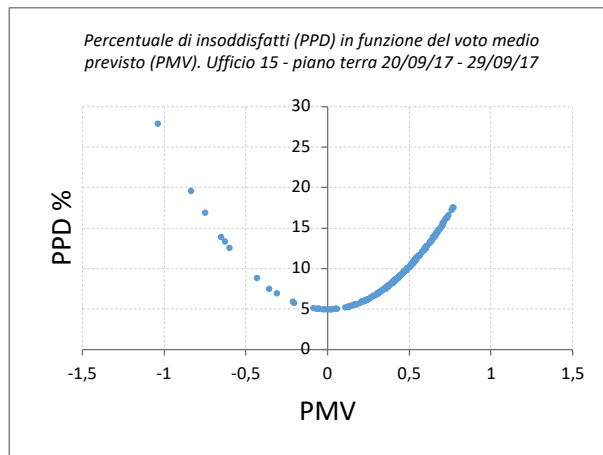
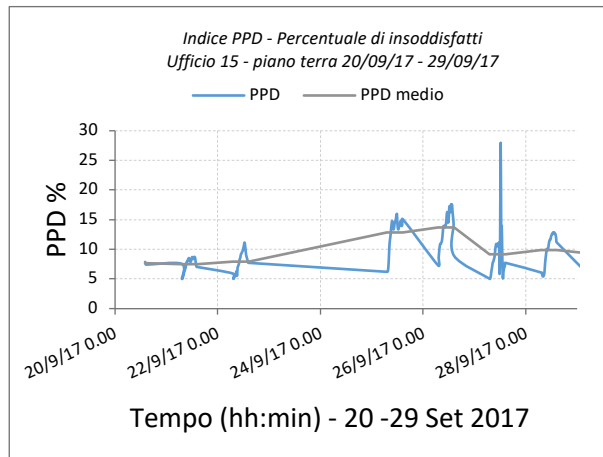
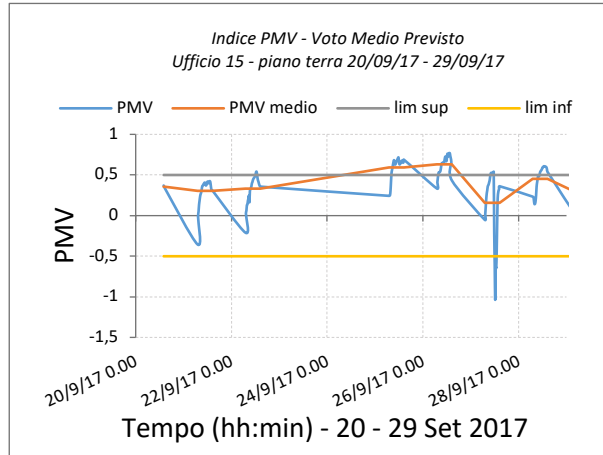


c) Ufficio 74

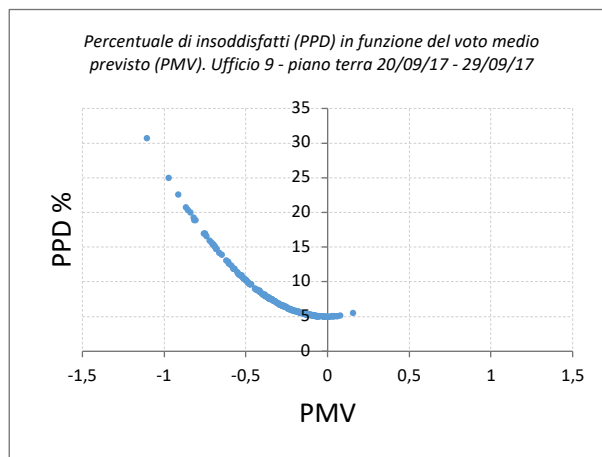
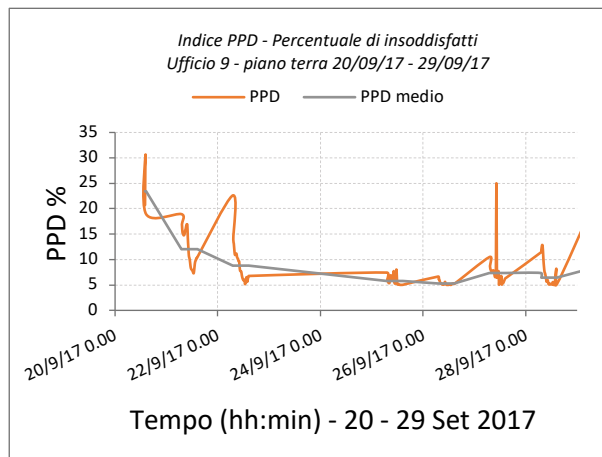
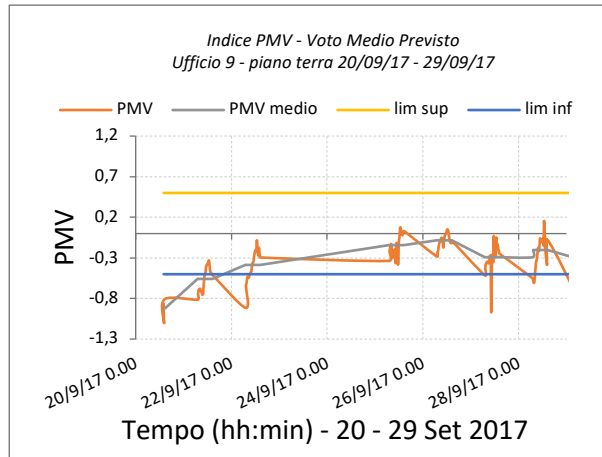


Indici di comfort termico - Periodo 20 - 29 Set

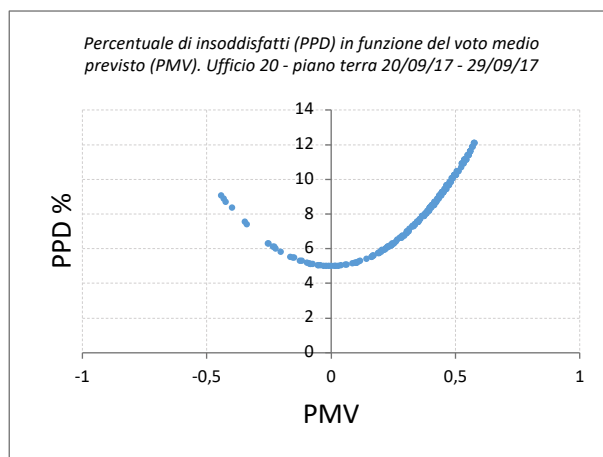
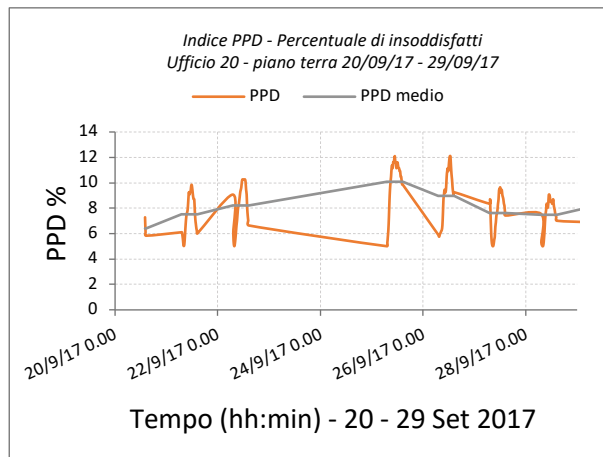
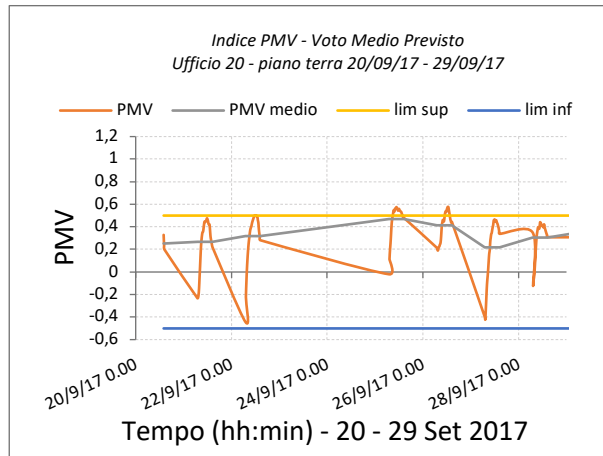
a) Ufficio 15



b) Ufficio 9



c) Ufficio 20



5.3 Esito del monitoraggio

Nel lavoro sono presentati i risultati di una campagna sperimentale effettuata presso alcuni uffici del palazzo comunale di Carbonia, al fine di valutare le condizioni di comfort microclimatico secondo l'approccio tradizionale. Sono stati dunque effettuati i rilievi delle principali grandezze ambientali e la valutazione dei relativi indici di benessere in 11 ambienti, in un arco temporale che va dal 3 agosto al 29 settembre 2017. Le misure sono state effettuate nelle reali condizioni operative degli ambienti oggetto di studio, con impianto di condizionamento acceso, dal lunedì al venerdì nelle ore lavorative 07:00 – 14:30, assumendo come valori fissi di resistenza termica all'abbigliamento e di tasso metabolico rispettivamente 0,5 clo e 1,2 met. Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata nelle tabelle sottostanti, sulle quali sono indicati, per ciascun ambiente e nel range temporale specificato, i valori medi degli indici di benessere globale (PMV_{medio} e PPD_{medio}). Dall'indagine è emerso quanto segue:

- I risultati dei rilievi strumentali condotti nell'ufficio 49, forniscono valori dell'indice PMV ricadenti nell'intervallo di "ambiente termicamente accettabile", con la PPD di poco superiore al 20%. I valori di comfort peggiori sono stati registrati nelle giornate del 7-8-9 e 10 agosto con valori di PMV compresi tra 1 e 1,80 e di PPD superiori al 50%, dovuti probabilmente all'aumento della temperatura ambiente. In queste giornate la valutazione termica dell'ambiente è di "leggermente caldo". Le considerazioni appena riportate possono essere estese anche all'ufficio 28.
- Nell'ufficio 88 si sono registrati valori di PMV lontani dall'intervallo di benessere termico. Complessivamente la valutazione dell'ambiente è classificata come "leggermente caldo" registrando valori di $PMV > 1$ e della $PPD > 50\%$. L'ambiente risulta termicamente accettabile in soli 4 giorni sui 15 monitorati. I risultati ottenuti evidenziano le scarse condizioni di comfort termico lamentate dagli occupanti.
- I rilievi effettuati nell'ufficio 52 mostrano valori di comfort peggiori nella giornata del 14 Agosto con $PMV_{medio}=1,13$ a cui corrisponde una percentuale di insoddisfatti del 32,05%. È da evidenziare che nella stessa giornata la PPD, registrata nell'ufficio 88, è prossima al 40%, mentre nell'ufficio 64, si registra una percentuale di circa la metà.
- Negli uffici 43 e 79 e 74 i risultati registrati nel periodo tra il 4 e l'8 settembre evidenziano valori del PMV compresi tra +0,5 e 0,85 con $PPD < 30\%$. Nello stesso periodo si rilevano valori di PPD indicanti un ambiente termicamente accettabile. Successivamente, e per l'intero intervallo temporale rimanente, i dati relativi al voto medio, si sono attestati su valori tali da garantire le condizioni di benessere termico.
- I risultati dei rilievi strumentali negli ambienti considerati - uffici 15, 9 e 20 - forniscono valori dell'indice PMV che ricadono, dal 20 al 29 settembre, nell'intervallo di "benessere termico" $0,5 < PMV < +0,5$ suggerito dalla normativa.

Tabella 5.3.1 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 49.

Ufficio 49		
Data	PMV medio	PPD medio
03/08/2017	0,74	18,16
04/08/2017	0,86	22,04
07/08/2017	1,80	66,99
08/08/2017	1,51	52,23
09/08/2017	1,09	31,41
10/08/2017	0,96	27,60
11/08/2017	0,78	19,39

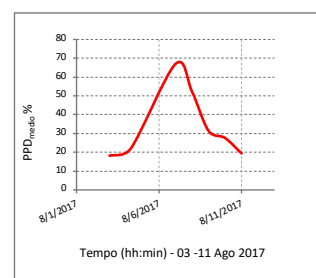
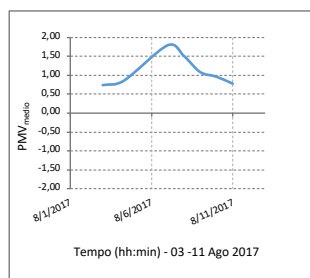


Tabella 5.3.2 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 28

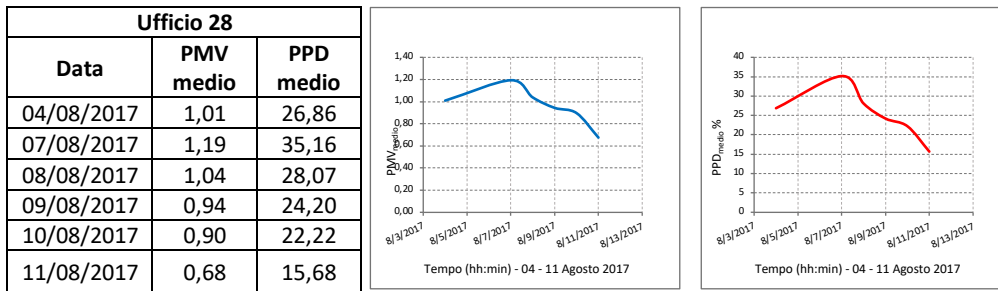


Tabella 5.3.3 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 88

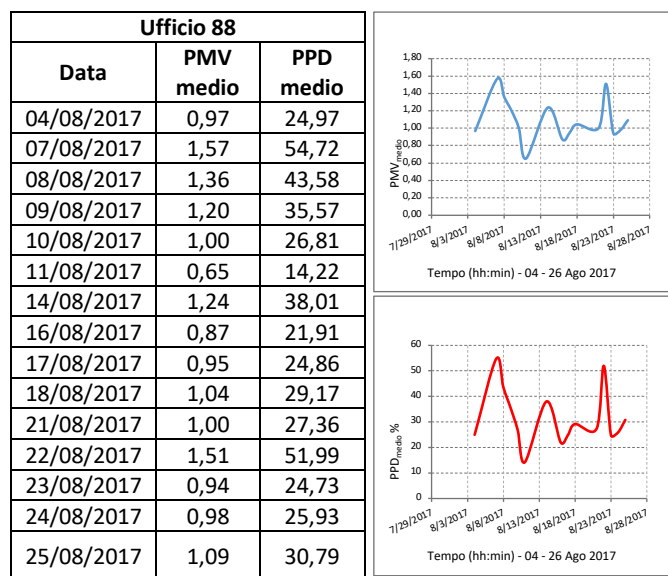


Tabella 5.3.4 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 52

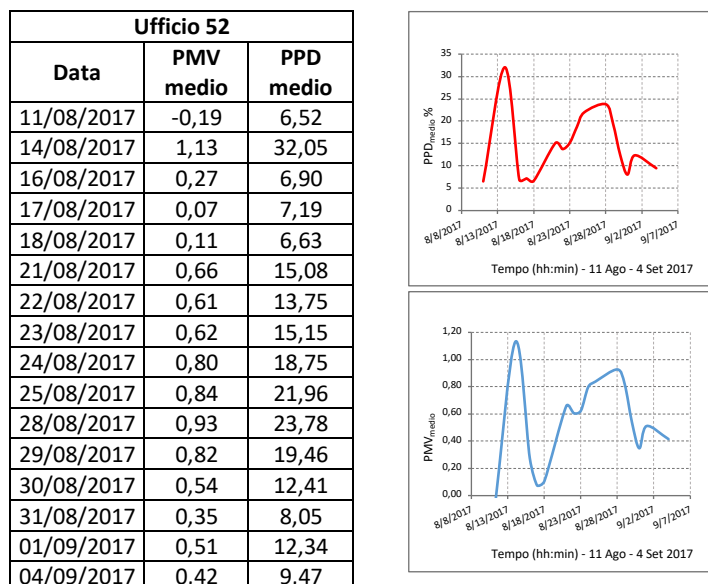


Tabella 5.3.5 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 64

Ufficio 64		
Data	PMV medio	PPD medio
11/08/2017	0,96	24,47
14/08/2017	0,84	20,17
16/08/2017	0,52	11,32
17/08/2017	0,77	18,58
18/08/2017	1,27	38,89
21/08/2017	0,63	13,90
22/08/2017	0,41	9,33
23/08/2017	0,05	5,16
24/08/2017	0,95	24,23
25/08/2017	0,33	8,36
28/08/2017	0,54	12,77
29/08/2017	0,90	22,53
30/08/2017	0,95	24,47
31/08/2017	1,01	28,57
01/09/2017	0,75	18,89
04/09/2017	0,62	13,38

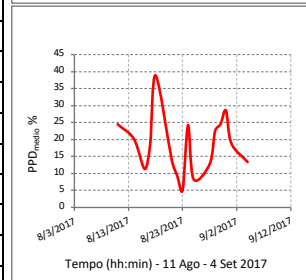
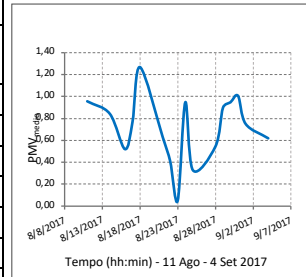


Tabella 5.3.6 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 43

Ufficio 43		
Data	PMV medio	PPD medio
04/09/2017	0,83	19,64
05/09/2017	0,77	18,16
06/09/2017	0,78	18,59
07/09/2017	0,73	16,84
08/09/2017	0,72	16,21
11/09/2017	0,48	9,89
12/09/2017	0,26	6,42
13/09/2017	0,44	9,59
14/09/2017	0,39	10,62
15/09/2017	0,59	13,82
18/09/2017	0,30	6,88
19/09/2017	0,31	7,00
20/09/2017	0,05	5,02

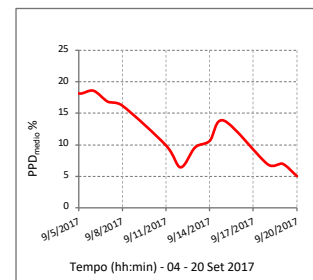
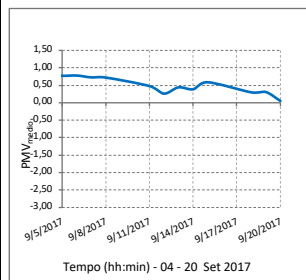


Tabella 5.3.7 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 79

Ufficio 79		
Data	PMV medio	PPD medio
04/09/2017	0,89	22,35
05/09/2017	0,88	21,74
06/09/2017	0,84	20,49
07/09/2017	0,84	20,32
08/09/2017	0,75	17,22
11/09/2017	0,26	7,38
12/09/2017	0,35	8,77
13/09/2017	0,46	10,61
14/09/2017	0,52	12,90
15/09/2017	0,45	11,40
18/09/2017	0,28	8,15
19/09/2017	0,49	10,87
20/09/2017	0,04	5,24

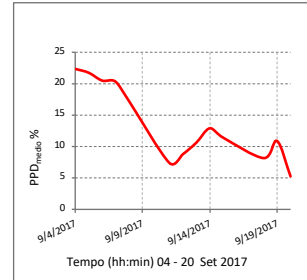
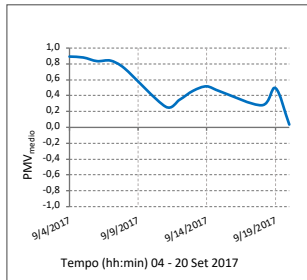


Tabella 5.3.8 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 74

Ufficio 74		
Data	PMV medio	PPD medio
04/09/2017	0,40	8,65
05/09/2017	0,74	17,31
06/09/2017	0,73	17,07
07/09/2017	0,73	16,60
08/09/2017	0,54	12,64
11/09/2017	0,09	6,09
12/09/2017	0,26	8,04
13/09/2017	0,25	7,23
14/09/2017	0,22	8,44
15/09/2017	0,19	7,93
18/09/2017	-0,16	7,43
19/09/2017	0,05	5,42
20/09/2017	-0,26	7,01

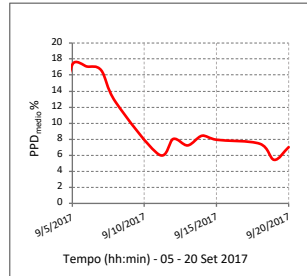
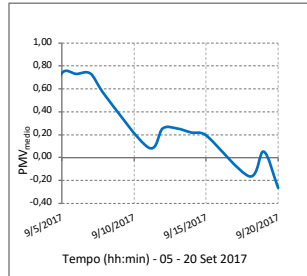


Tabella 5.3.9 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 15

Ufficio 15		
Data	PMV medio	PPD medio
20/09/2017	0,36	7,67
21/09/2017	0,30	7,50
22/09/2017	0,33	7,93
25/09/2017	0,59	12,85
26/09/2017	0,63	13,70
27/09/2017	0,16	9,17
28/09/2017	0,45	9,88
29/09/2017	0,26	9,25

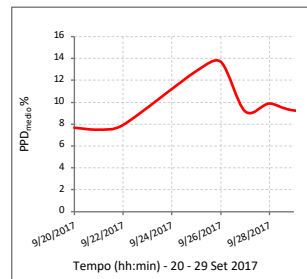
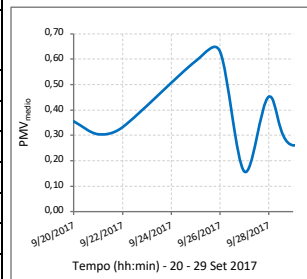


Tabella 5.3.10 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 9

Ufficio 9		
Data	PMV medio	PPD medio
20/09/2017	-0,92	23,44
21/09/2017	-0,56	12,04
22/09/2017	-0,39	8,80
25/09/2017	-0,14	5,78
26/09/2017	-0,08	5,28
27/09/2017	-0,29	7,35
28/09/2017	-0,20	6,44
29/09/2017	-0,32	8,30

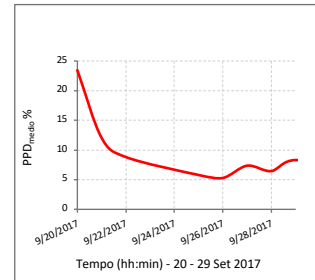
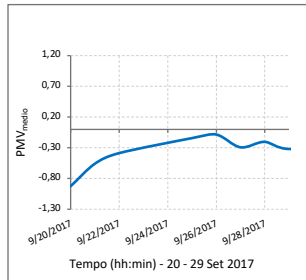
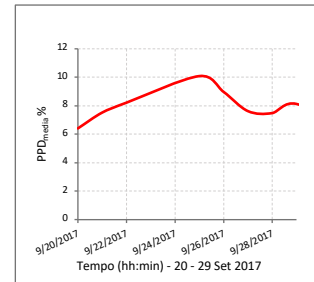
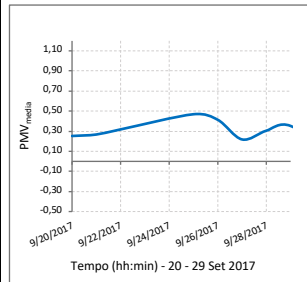


Tabella 5.3.11 Valori medi degli indici PMV e PPD e relativi grafici - Ufficio 20

Ufficio 20		
Data	PMV medio	PPD medio
20/09/2017	0,25	6,41
21/09/2017	0,27	7,52
22/09/2017	0,32	8,22
25/09/2017	0,47	10,08
26/09/2017	0,41	8,97
27/09/2017	0,22	7,62
28/09/2017	0,31	7,48
29/09/2017	0,35	8,13



Come ulteriore indagine si è provveduto a comparare le variabili temperatura e umidità interna nei differenti uffici. Globalmente si osserva che i parametri outdoor (temperatura e umidità relativa) mostrano notevoli variazioni nel periodo di monitoraggio. Le prime due settimane rappresentano quelle climaticamente più calde con un graduale calo delle temperature in quelle successive.

Sono stati inoltre effettuati rilevamenti circa la concentrazione di CO₂ considerando che per concentrazioni di anidride carbonica maggiori di 1000 ppm (1.798 mg/m³) il ricambio dell'aria risulta inadeguato.

Nello specifico, sono stati confrontati i seguenti ambienti nei periodi indicati:

- Uffici 49 (piano I°) – 28 (piano I°) – 88 (piano II°) monitorati dal 03/08/17 all' 11/08/17: *la temperatura esterna oscilla da un minimo di 25 °C ad un massimo di 44 °C, mentre l'umidità relativa esterna raggiunge valori compresi tra circa 60%, durante le ore diurne, e circa 20 % in quelle di punta (h 13:00 – 14:00). Il grafico relativo alla temperatura interna evidenzia, per tutti e tre gli uffici, un andamento costante. Per quanto concerne la concentrazione della CO₂, si osservano valori maggiori di 1000 ppm solamente nell'ufficio 28, in virtù di un maggior numero di occupanti.*

In particolare:

Ufficio	Temperatura °C	Umidità relativa %	CO ₂ ppm
49	25-30	38-55	400-600
28	27-29	35-50	800-1600
88	27-30	35-50	600-890

In base a quanto specificato, è da evidenziare che non in tutti gli ambienti monitorati si rispettano gli standard previsti.

Unitamente all'analisi delle condizioni di comfort termico, si è provveduto ad effettuare un'indagine relativa al comfort illuminotecnico nelle postazioni di lavoro all'interno degli uffici oggetto di studio. I dati dell'illuminamento sono relativi a misurazioni effettuate in giornate soleggiate. Per l'illuminazione, si è fatto riferimento alla UNI EN 12464-1 che prevede, per gli operatori che lavorano al videoterminale, un illuminamento medio di 500 lux.

Dai rilievi, è emerso che, nelle postazioni di lavoro, i valori di luminosità naturale sono spesso inferiori ai 500 lux previsti dalla norma UNI EN 12464-1. Appaiono ben illuminati gli uffici 88, 28, 52, 79, 49, 20. Non rispondono alla caratteristica sopra citata i seguenti ambienti: 9 - 15 - 64 - 43 e 74.

6 Analisi di un edificio pubblico ad uso uffici

6.1.1 Il Centro Ricerche Sotacarbo

Nella precedente annualità, con riferimento alla stagione estiva, lo studio sul monitoraggio microclimatico è stato condotto in alcuni ambienti dell'edificio ospitante il Centro Ricerche Sotacarbo, collocato nell'area della Grande Miniera di Serbariu a Carbonia. L'analisi è stata complementata, nell'annualità corrente, nella stagione invernale.

L'edificio principale, risalente agli anni 1938-39 è considerato un bene identitario e soggetto pertanto a vincoli definiti dalla Soprintendenza.

Esso fa parte di una serie di fabbricati in cemento armato che all'epoca furono realizzati per sostenere la produzione della miniera di carbone di Serbariu, chiusa poi a metà degli anni '60. In particolare vennero realizzate una centrale elettrica, gli uffici, le officine, la lampisteria e la laveria, nonché i vari servizi annessi, tra cui l'infermeria e i magazzini. L'edificio oggetto di questo studio fu allora costruito come "Magazzino materiali". Nel corso degli anni ha subito svariati interventi di ristrutturazione, il più importante, come ampiamente discusso [12], è avvenuto nel 2002.



Figura 6.1.1 Facciata principale della struttura prima dell'intervento di ripristino.



Figura 6.1.2 Facciata principale della struttura dopo l'intervento di ripristino per il riuso.

Attualmente l'area del Centro Ricerche Sotacarbo può essere suddivisa in tre blocchi principali:

- un primo blocco costituito dall'edificio principale, su cui è stato eseguito l'intervento di ristrutturazione, con locali adibiti ad uffici, laboratori, archivio e sale riunioni e conferenze (figura 6.1.3);
- un secondo blocco costituito dal locale di nuova costruzione, adibito ad officina meccanica;
- un terzo blocco che comprende le aree aperte, concernenti quella della Piattaforma Pilota - che alloggia gli impianti sperimentali ed i services ad essa collegati - i parcheggi e le aree di accesso.



Figura 6.1.3 Usi funzionali della struttura.

6.2 Fase di monitoraggio

Nell'area di maggiore utilizzo, ospitante gli uffici e concernente 17 ambienti, si è provveduto ad effettuare il monitoraggio dei parametri microclimatici.

La maggior parte di questi locali, collegati tra loro da un corridoio, è a doppia altezza. Quest'ultima è ricavata attraverso soppalchi in acciaio che coprono i 2/3 della superficie, posti ad un'altezza di 2,5 m c.a. dalla quota del pavimento e collegati con scale interne a L in ferro, parallele alla muratura del corridoio interno.

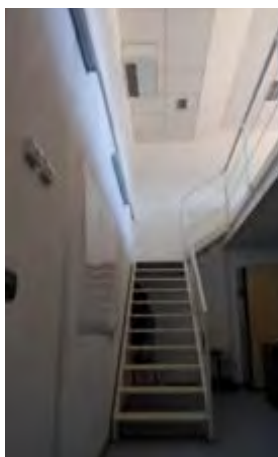


Foto 6.2.1 Interno degli uffici: accesso al soppalco.

Tutti gli uffici presentano infissi di vecchia generazione in legno e vetro singolo, apribili solo parzialmente a vasistas e a c.a. 5,15 m dalla quota del pavimento, in aderenza all'intradosso del controsoffitto, sono ubicati dei ventilconvettori.

In particolare l'indagine ha riguardato un totale di 3 spazi di lavoro identificati come rappresentativi e specificati nelle planimetrie (figura 6.2.2):

- Ufficio 5 – piano terra;
- Ufficio 9 – piano terra e soppalco;
- Ufficio 14.



Figura 6.2.2 Planimetria CRS.

Per il CRS sono state utilizzate sia le centraline microclimatiche “Grillo MMTS”, sia i sensori di umidità e temperatura della Gemini Datalogger “Tinytag”.

Lo studio dei parametri di comfort ambientale è avvenuto nei mesi di Dicembre, Gennaio e Febbraio. Lo schema riportato in tabella 6.2.1 e in tabella 6.2.2 specifica l’ubicazione della centralina relativa all’arco temporale preso in esame, mentre quello riportato in tabella 6.2.3 definisce gli ambienti in cui sono stati disposti i sensori Tinytag. In particolare, per ciascuno apparecchio è indicato:

- il periodo temporale del monitoraggio;
- l’ambiente oggetto di studio;
- il posizionamento: soppalco o piano terra;
- il numero di persone presenti;
- l’orario di avvio e di chiusura del monitoraggio.

Le misure sono state effettuate nelle reali condizioni operative degli ambienti, con impianto di condizionamento acceso, dal lunedì al venerdì, nella fascia oraria lavorativa 08:00 – 18:30, posizionando le centraline microclimatiche ad un’altezza di circa 1,1 metri dal suolo (livello testa) in prossimità delle postazioni di lavoro, e i sensori di temperatura e umidità, in questo caso utilizzati per la verifica del comfort locale termico, a tre differenti altezze dal pavimento (10 cm, 60 cm, 100 cm). Il calcolo degli indici di comfort termico è stato effettuato assumendo un valore di resistenza termica all’abbigliamento pari a 1 clo e un valore di dispendio energetico pari a 1,2 met.

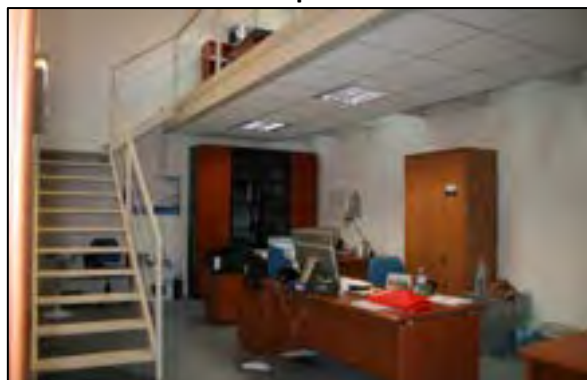
Anche in questo caso si è provveduto ad effettuare un’indagine relativa al comfort illuminotecnico nelle postazioni di lavoro all’interno degli ambienti oggetto di studio. In particolare si riporta:

- Schema semplificato sulla ubicazione delle scrivanie, delle luci e delle finestre (tabella 6.2.4);
- Dati caratteristici lampade e misurazioni intensità luminosa per postazione (tabella 6.2.5).

Si riportano in Allegato 3 i grafici relativi alle misurazioni dei parametri microclimatici e si evidenziano nel seguito quelli attinenti: gli indici di comfort termico PMV e PPD dell’intero periodo di monitoraggio e di alcune settimane rappresentative, l’andamento delle variabili misurate con i Tinytag e il confronto tra le variabili temperatura e umidità interna nei diversi uffici.

Le foto di seguito riportate sono relative agli spazi oggetto del monitoraggio.

Ufficio 9 – piano terra



Ufficio 9 - soppalco



Ufficio 5 - piano terra



Ufficio 14



Tabella 6.2.1 Posizionamento centraline C1, C2.

Settimana lavorativa	C1	C2	START/STOP INSTALLAZIONE CENTRALINE					
			C1			C2		
14 Dic - 16 Dic		Uff. 9 soppalco (2 persone)	START/STOP			START/STOP	h. 12:30	h. 18:30
19 Dic – 23 Dic	Uff. 5 p.terra (3 persone)	Uff. 9 soppalco (2 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
27 Dic – 30 Dic	Uff. 5 p.terra (3 persone)	Uff. 9 soppalco (2 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
2 Gen – 5 Gen	Uff. 5 p.terra (3 persone)	Uff. 9 soppalco (2 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
9 Gen – 13 Gen	Uff. 5 p.terra (3 persone)	Uff. 9 soppalco (2 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
16 Gen – 20 Gen	Uff. 5 p.terra (3 persone)	Uff. 9 soppalco (2 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
23 Gen – 27 Gen	Uff. 5 p.terra (3 persone)	Uff. 9 soppalco (2 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
30 Gen -3 Feb	Uff. 5 p.terra (3 persone)	Uff. 9 soppalco (2 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
6 Feb – 10 Feb	Uff. 5 p.terra (3 persone)	Uff. 9 soppalco (2 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
13 Feb – 16 Feb	Uff. 5 p.terra (3 persone)	Uff. 9 soppalco (2 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 15:00	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30

Tabella 6.2.2 Posizionamento centraline microclimatiche indoor C3, C5.

Settimana lavorativa	C3	C5	START/STOP INSTALLAZIONE CENTRALINE					
			C3			C5		
14 Dic - 16 Dic	Uff. 14 (2 persone)	Uff. 9 piano terra (3 persone)	START/STOP	h. 12:40	h. 18:30	START/STOP	h. 12:20	h. 18:30
19 Dic – 23 Dic	Uff. 14 (2 persone)	Uff. 9 piano terra (3 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
27 Dic – 30 Dic	Uff. 14 (2 persone)	Uff. 9 piano terra (3 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
2 Gen – 5 Gen	Uff. 14 (2 persone)	Uff. 9 piano terra (3 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
9 Gen – 13 Gen	Uff. 14 (2 persone)	Uff. 9 piano terra (3 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
16 Gen – 20 Gen	Uff. 14 (2 persone)	Uff. 9 piano terra (3 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
23 Gen – 27 Gen	Uff. 14 (2 persone)	Uff. 9 piano terra (3 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
30 Gen -3 Feb	Uff. 14 (2 persone)	Uff. 9 piano terra (3 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
6 Feb – 10 Feb	Uff. 14 (2 persone)	Uff. 9 piano terra (3 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30	START/STOP	h. 8:00	h. 18:30
13 Feb – 16 Feb	Uff. 14 (2 persone)	Uff. 9 piano terra (3 persone)	START/STOP	h. 8:00	h. 16:40	START/STOP	h. 8:00	h. 9:20 (15 Feb)

Tabella 6.2.3 Posizionamento sensori tinytag.

Settimana lavorativa	Sensori Ti e Urel (10 cm, 60 cm, 1 m)
10 Mar	Uff. 5 soppalco (2 persone)
13 Mar	Uff. 5 piano terra (3 persone)
14 Mar	Uff. 9 piano terra (3 persone)
15 Mar	Uff. 9 soppalco (2 persone)
16 Mar	Uff. 14 (2 persone)

Tabella 6.2.4 Riproduzioni uffici CRS.

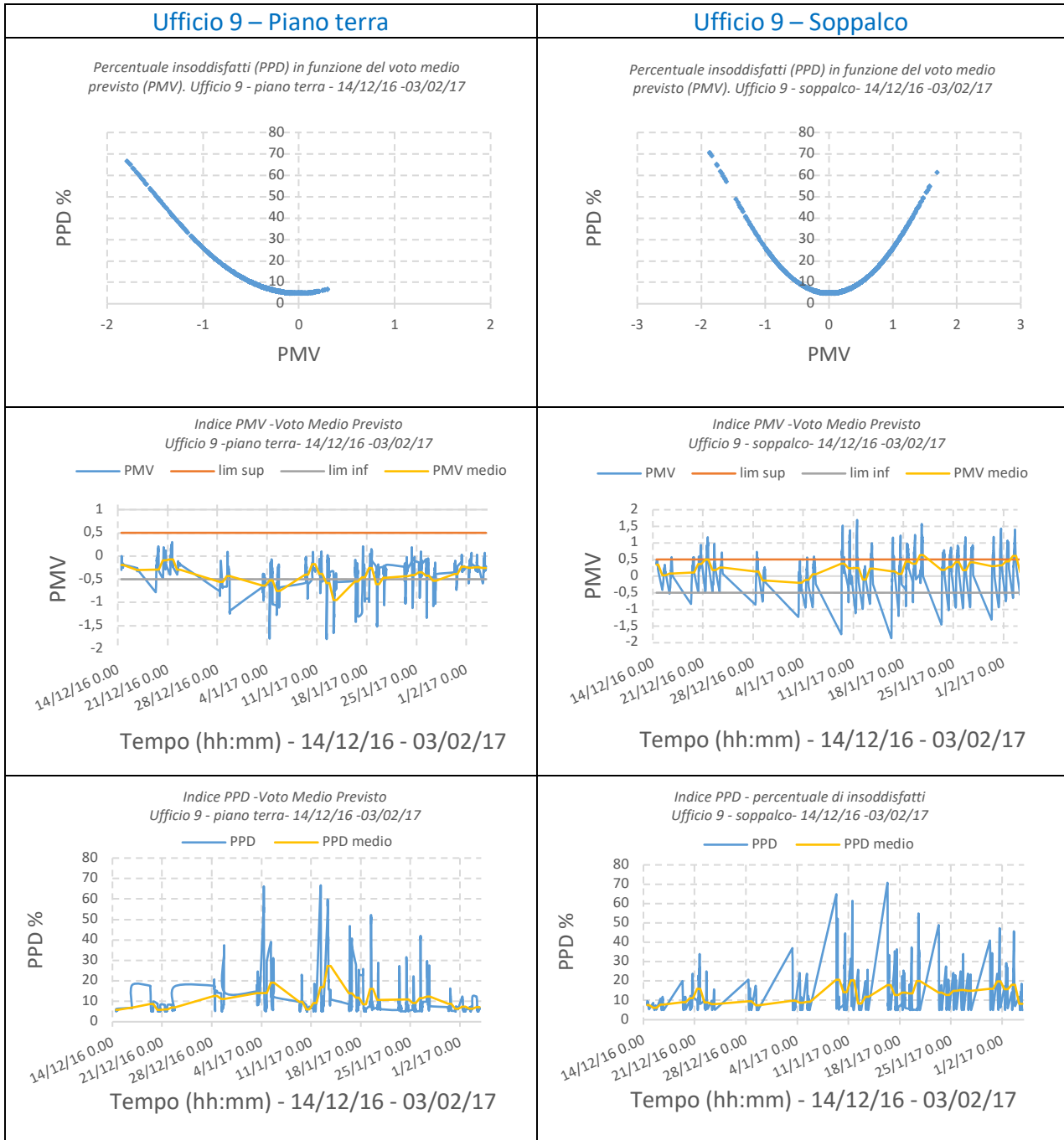


Tabella 6.2.5 Dati misurazioni illuminamento.

Luce artificiale (Lux)							
Ambiente	N. occupanti	Postazione	Tipologia lampade	ON	OFF	Contributo	Distanza dal punto di misura al corpo luce (m)
Ufficio 9	5	1	6 lampade a fluorescenza da 4 corpi illuminanti	469	36	433	1,75
		2		470	42	428	1,75
		3		481	43	438	1,75
		4		963	517	446	1,45
		5		738	291	447	1,45
Ufficio 5	4	1	6 lampade a fluorescenza da 4 corpi illuminanti	419	21	398	1,75
		2		439	36	403	1,75
		3		477	51	426	1,75
		4		638	107	531	1,45
		5		675	120	555	1,45
Ufficio 14	1	1	2 lampade a fluorescenza da 2 corpi illuminanti	384	39	345	2,6

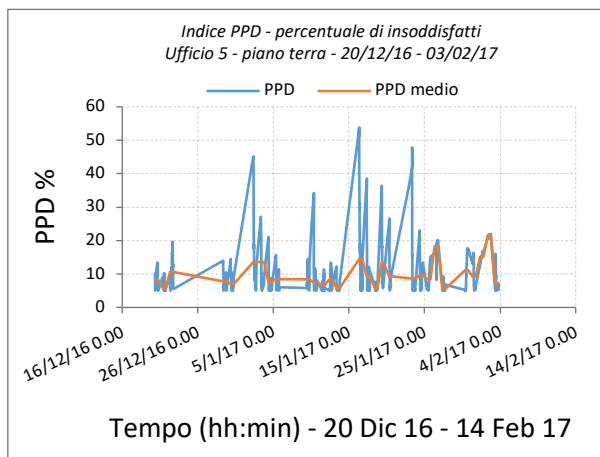
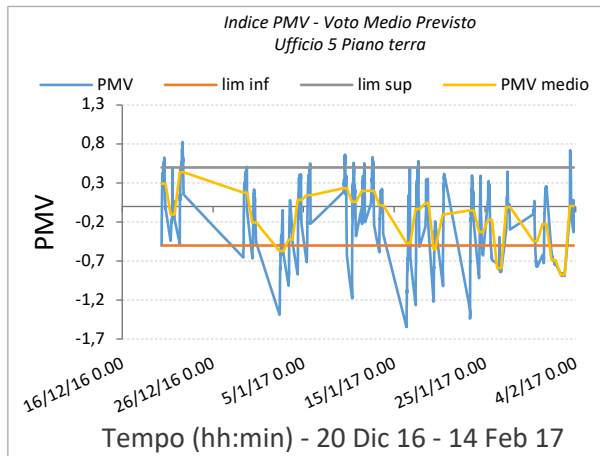
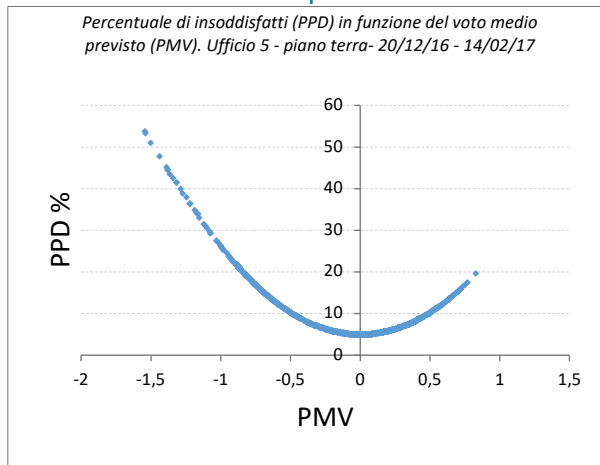
Indici di comfort termico - Periodo 14 Dicembre 2016 – 3 Febbraio 2017

a) Ufficio 9



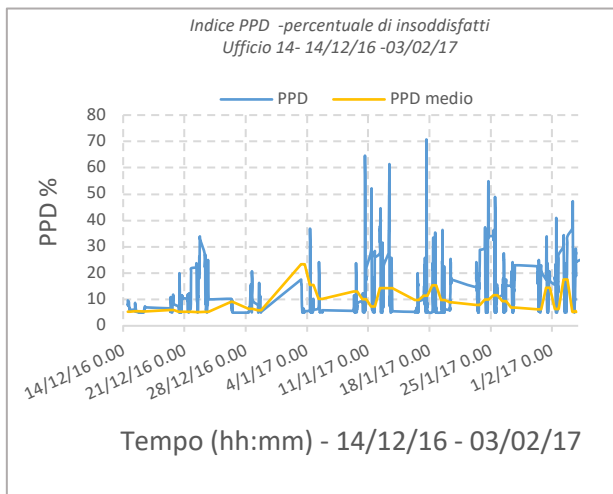
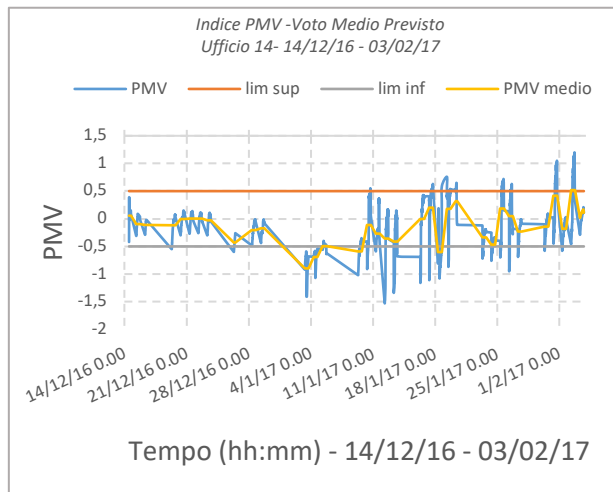
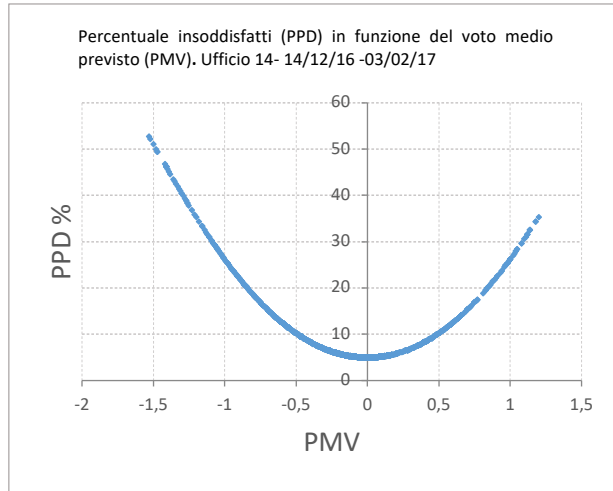
b) Ufficio 5

Ufficio 5 – piano terra



c) Ufficio 14

Ufficio 14



Indici di comfort termico - Periodo 19 - 23 Dicembre 2016

a) Ufficio 9

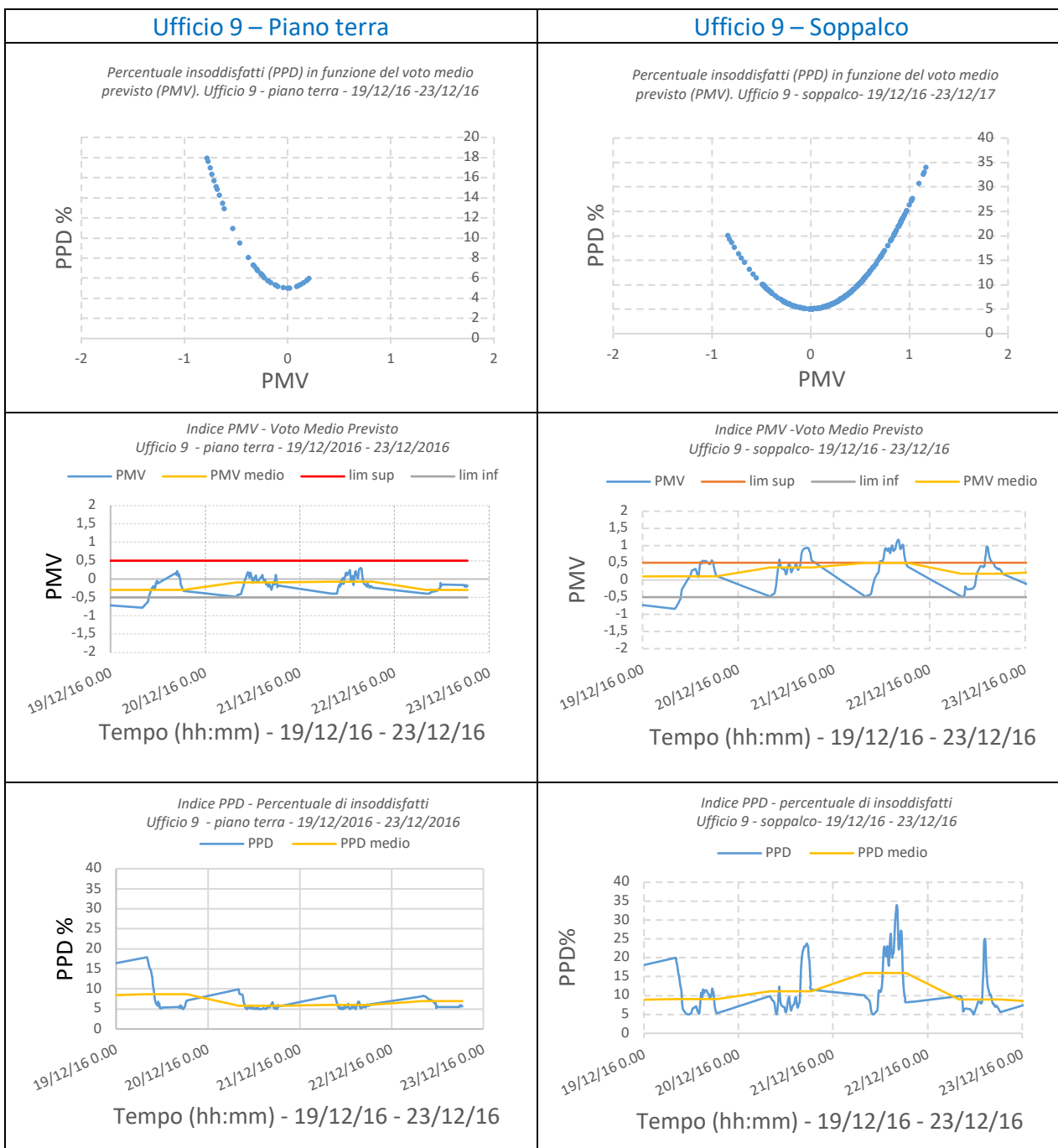


Tabella 6.2.2 Andamento delle variabili indoor – Ufficio 9 – 19/12/16 – 22/12/16.

Ufficio 9 - soppalco	Ufficio 9 – piano terra
<p>Andamento della temperatura Ufficio 9 - soppalco- 19/12/16-23/12/16</p> <p>T (°C)</p> <p>Tempo (hh:mm) - 19/12/16-22/12/16</p>	<p>Andamento della temperatura Ufficio 9 - piano terra- 19/12/16 - 22/12/16</p> <p>T (°C)</p> <p>Tempo (hh:mm) - 19/12/16 - 22/12/16</p>
<p>Andamento dell'umidità relativa Ufficio 9 - soppalco- 19/12/16-22/12/16</p> <p>U (%)</p> <p>Tempo (hh:mm) - 19/12/16-22/12/16</p>	<p>Andamento dell'umidità relativa Ufficio 9 - piano terra- 19/12/16 - 23/12/16</p> <p>U (%)</p> <p>Tempo (hh:mm) - 19/12/16 - 23/12/16</p>
<p>Andamento della concentrazione di CO2 Ufficio 9 - soppalco- 19/12/16 -23/12/16</p> <p>CO2 (ppm)</p> <p>Tempo (hh:mm) - 19/12/16-23/12/16</p>	<p>Andamento della concentrazione di CO2 Ufficio 9 - piano terra- 19/12/16 -23/12/16</p> <p>CO2 (ppm)</p> <p>Tempo (hh:mm) - 19/12/16-22/12/16</p>

b) Ufficio 5

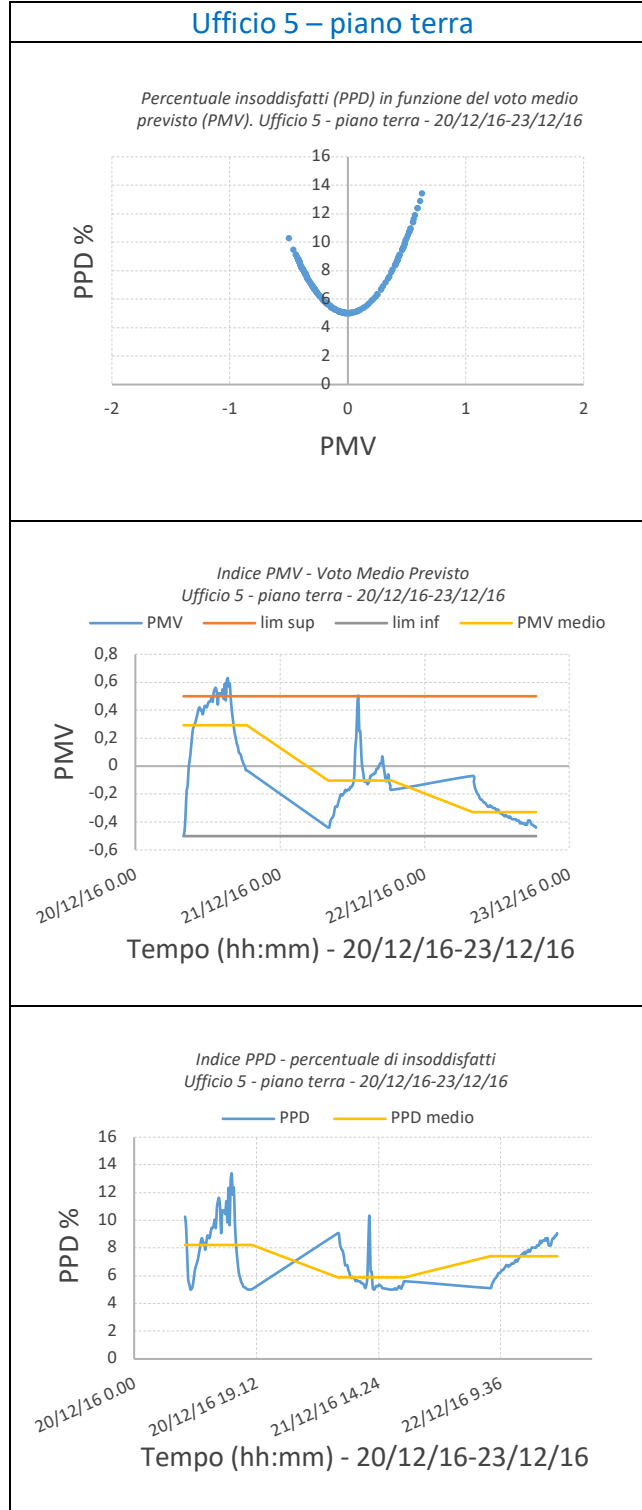
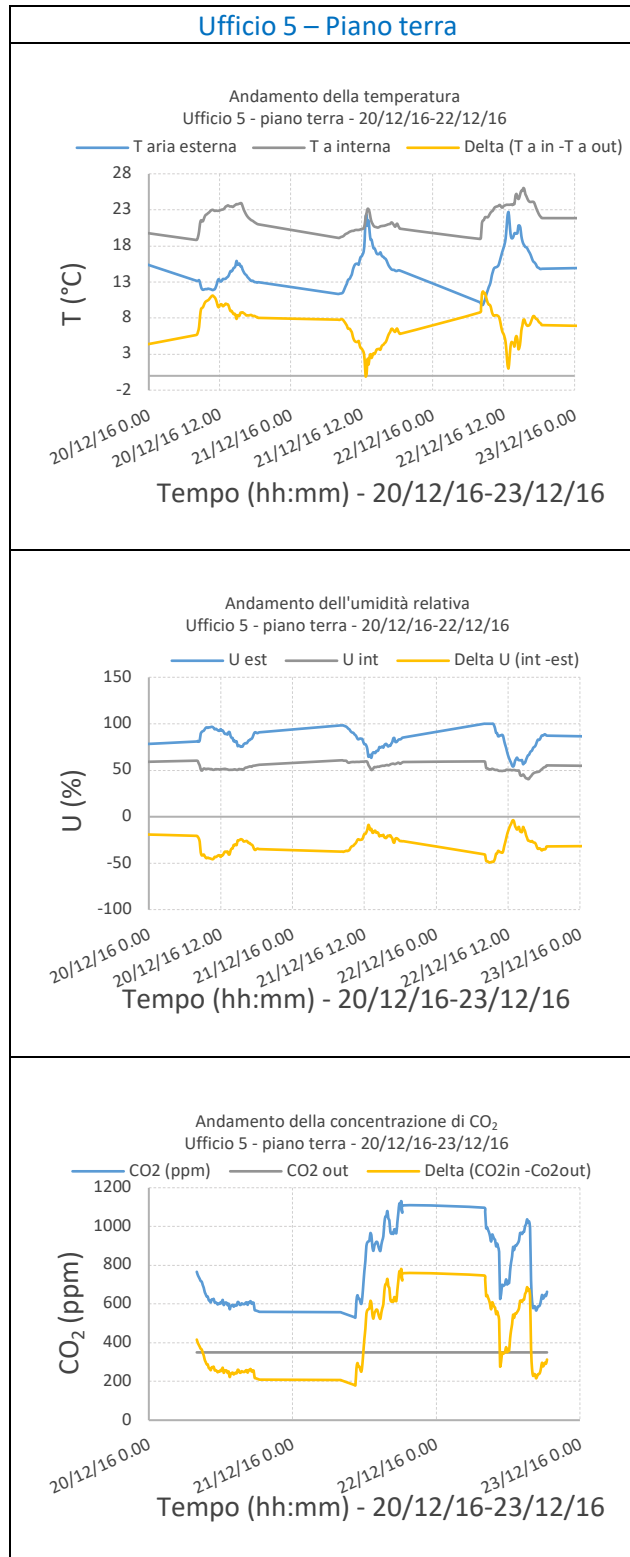


Tabella 6.2.3 Andamento delle variabili indoor – Ufficio 5 – piano terra – 20/12/16 – 22/12/16



Indici di comfort termico - Periodo 16 – 20 Gennaio 2017

c) Ufficio 9

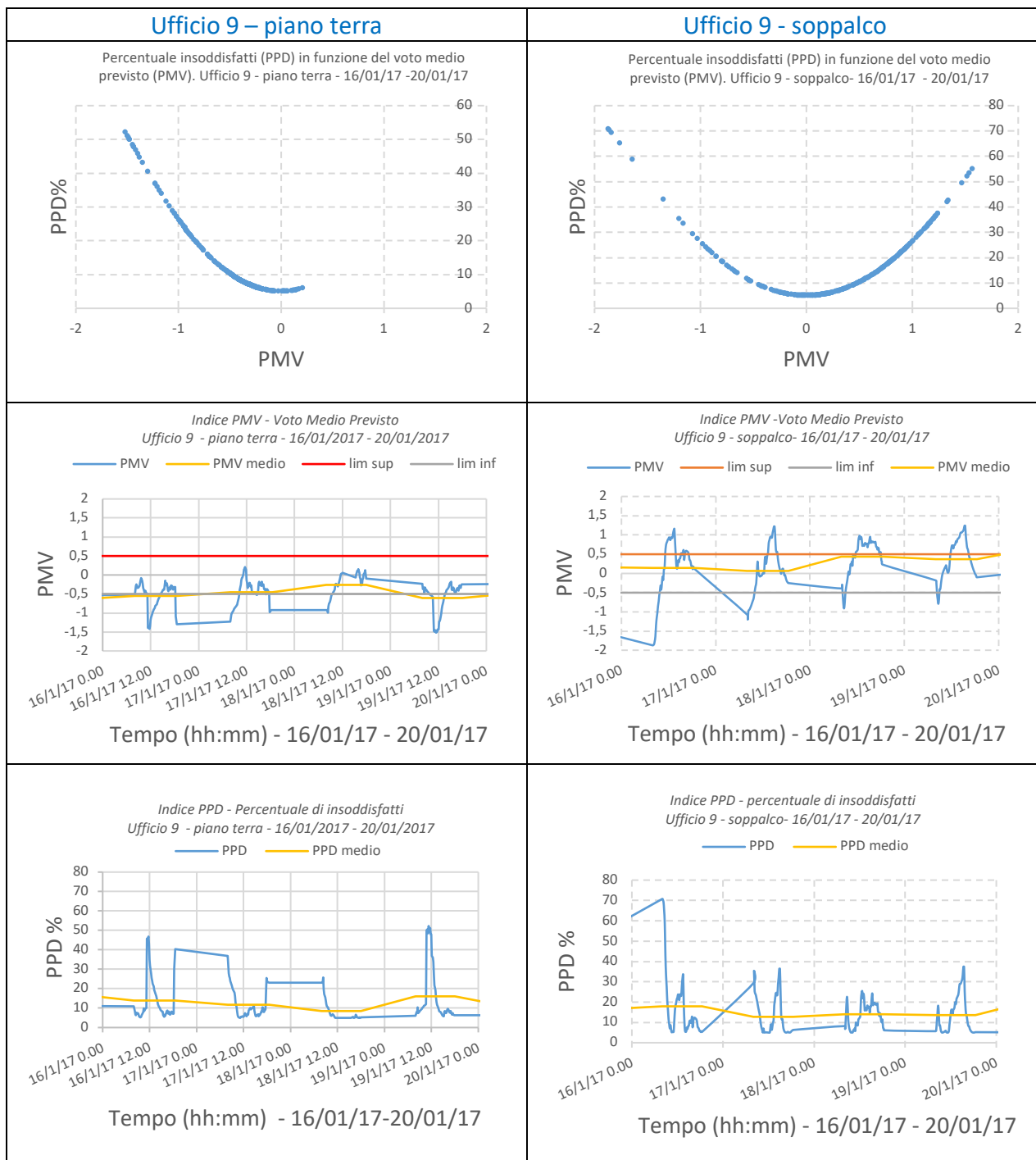


Tabella 6.2.6 Andamento delle variabili indoor – Ufficio 9 – 16/01/17 – 20/01/17.

Ufficio 9 - soppalco	Ufficio 9 – piano terra
<p>Andamento della temperatura Ufficio 9 - soppalco- 16/01/17 - 20/01/17</p> <p>Tempo (hh:mm) - 16/01/17 - 20/01/17</p>	<p>Andamento della temperatura Ufficio 9 - piano terra- 16/01/17 - 20/01/17</p> <p>Tempo (hh:mm) - 16/01/17 - 20/01/17</p>
<p>Andamento dell'umidità relativa Ufficio 9 - soppalco- 16/01/17 - 20/01/17</p> <p>Tempo (hh:mm) - 16/01/17 - 20/01/17</p>	<p>Andamento dell'umidità relativa Ufficio 9 - piano terra- 16/01/17 - 20/01/17</p> <p>Tempo (hh:mm) - 16/01/17 - 20/01/17</p>
<p>Andamento della concentrazione di CO₂ Ufficio 9 - soppalco- 16/01/17 - 20/01/17</p> <p>Tempo (hh:mm) - 16/01/17 - 20/01/17</p>	<p>Andamento della concentrazione di CO₂ Ufficio 9 - piano terra- 16/01/17 - 20/01/17</p> <p>Tempo (hh:mm) - 16/01/17 - 20/01/17</p>

d) Ufficio 14

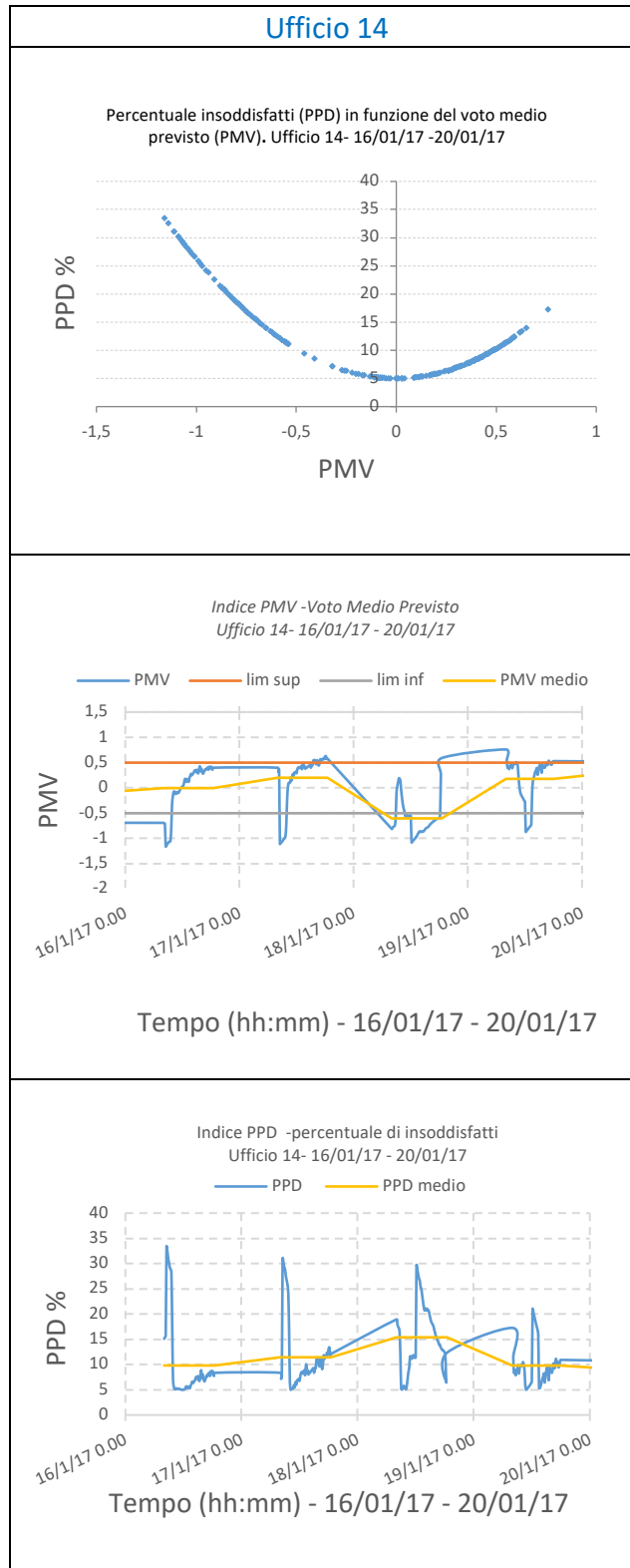
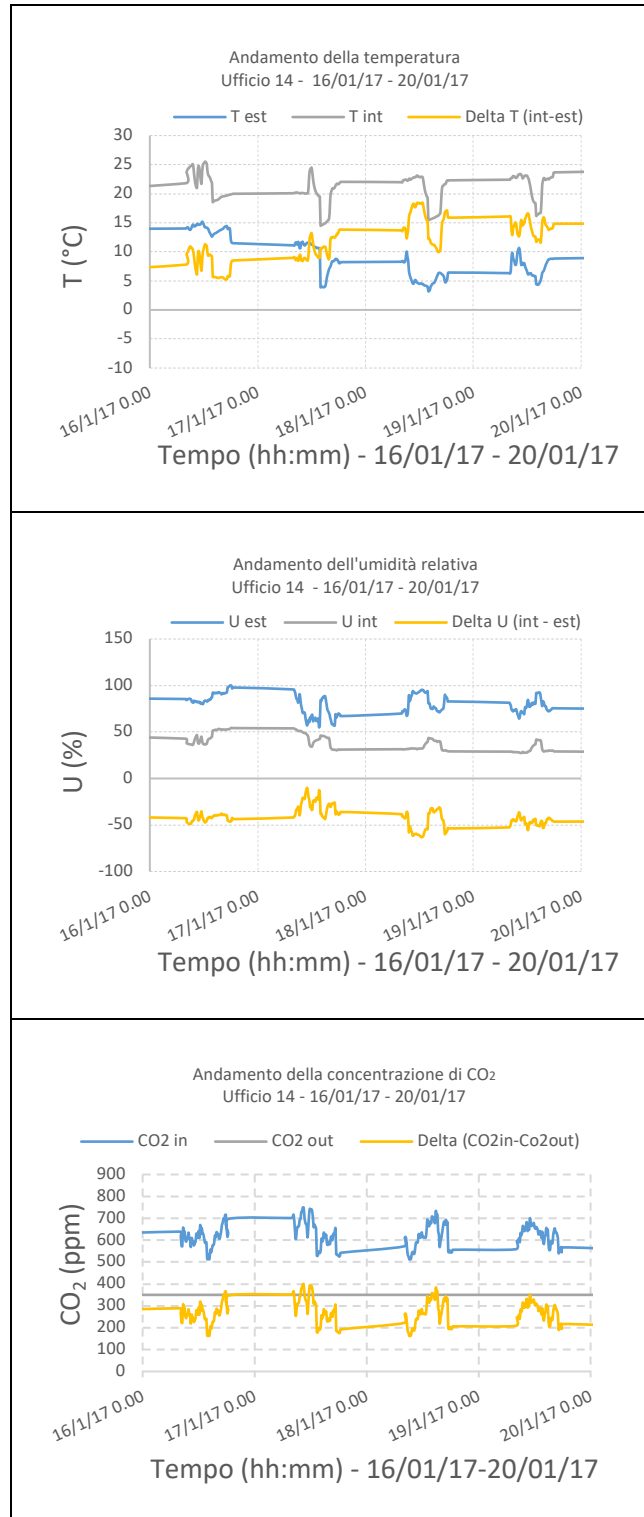


Tabella 6.2.7 Andamento delle variabili indoor – Ufficio 14 – 16/01/17 – 20/01/17.



Indici di comfort termico - Periodo 23 – 27 Gennaio 2017

a) Ufficio 5

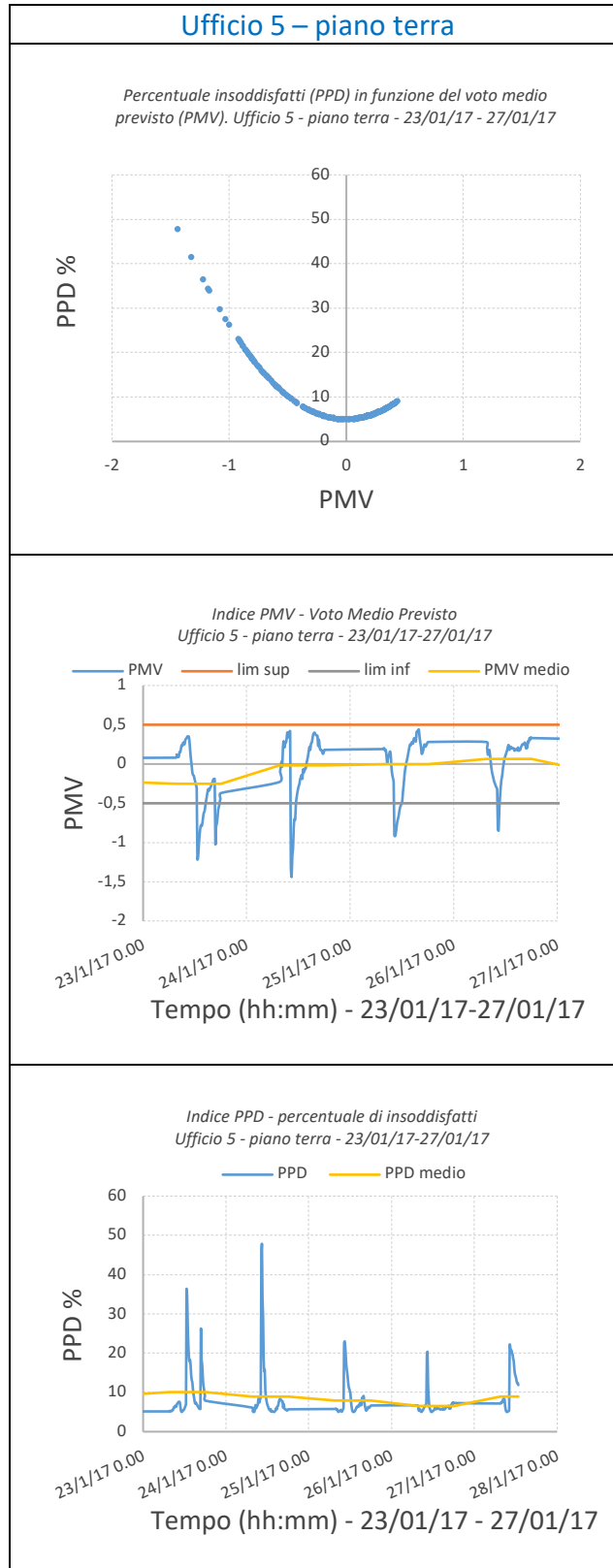
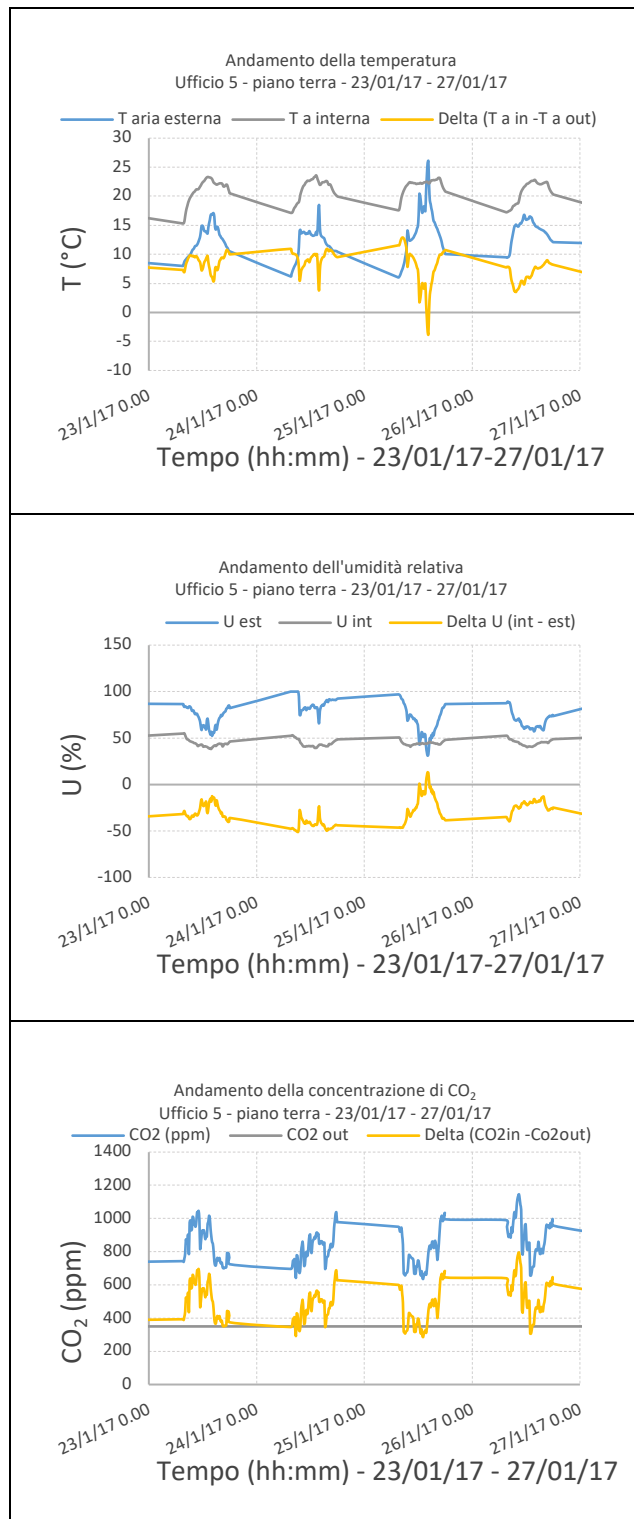


Tabella 6.2.8 Andamento delle variabili indoor – Ufficio 5 – piano terra – 23/01/17 – 27/01/17.



Indici di comfort termico - Periodo 30 Gennaio – 3 Febbraio

e) Ufficio 14

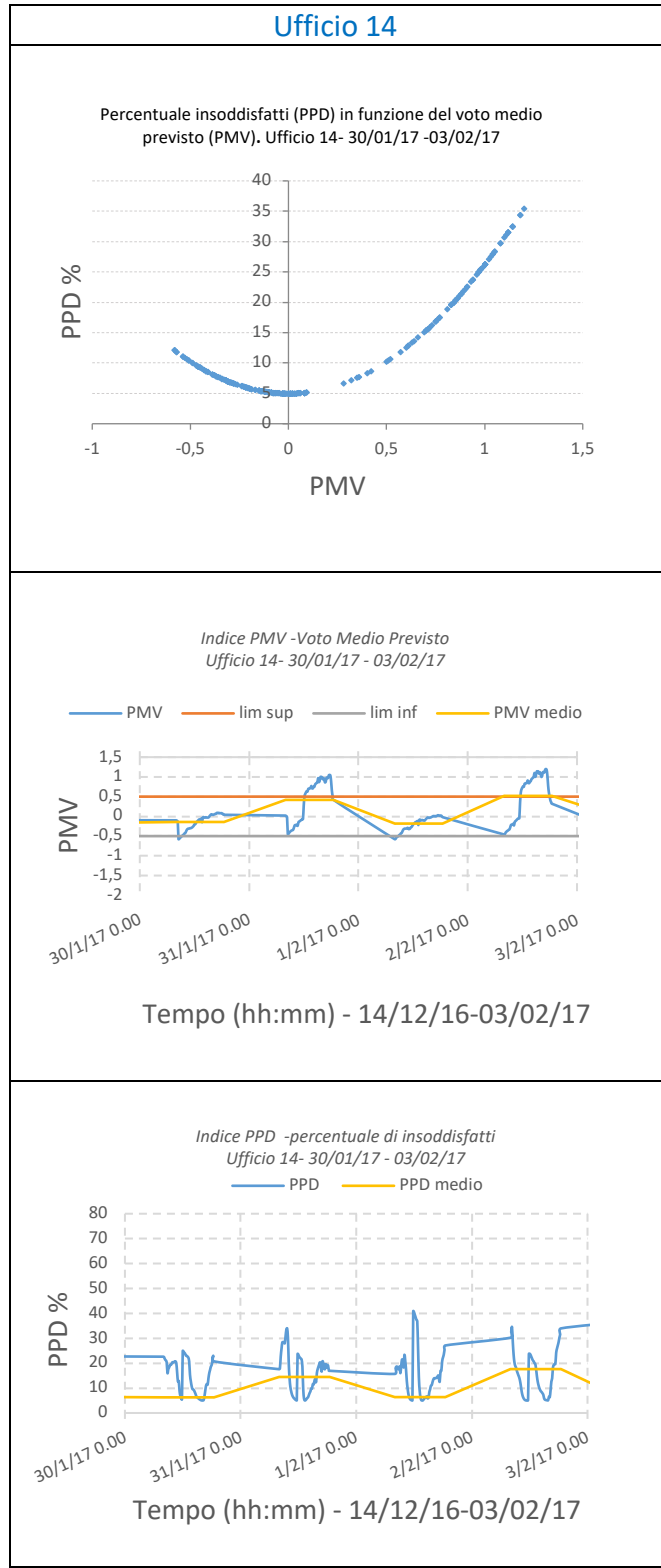
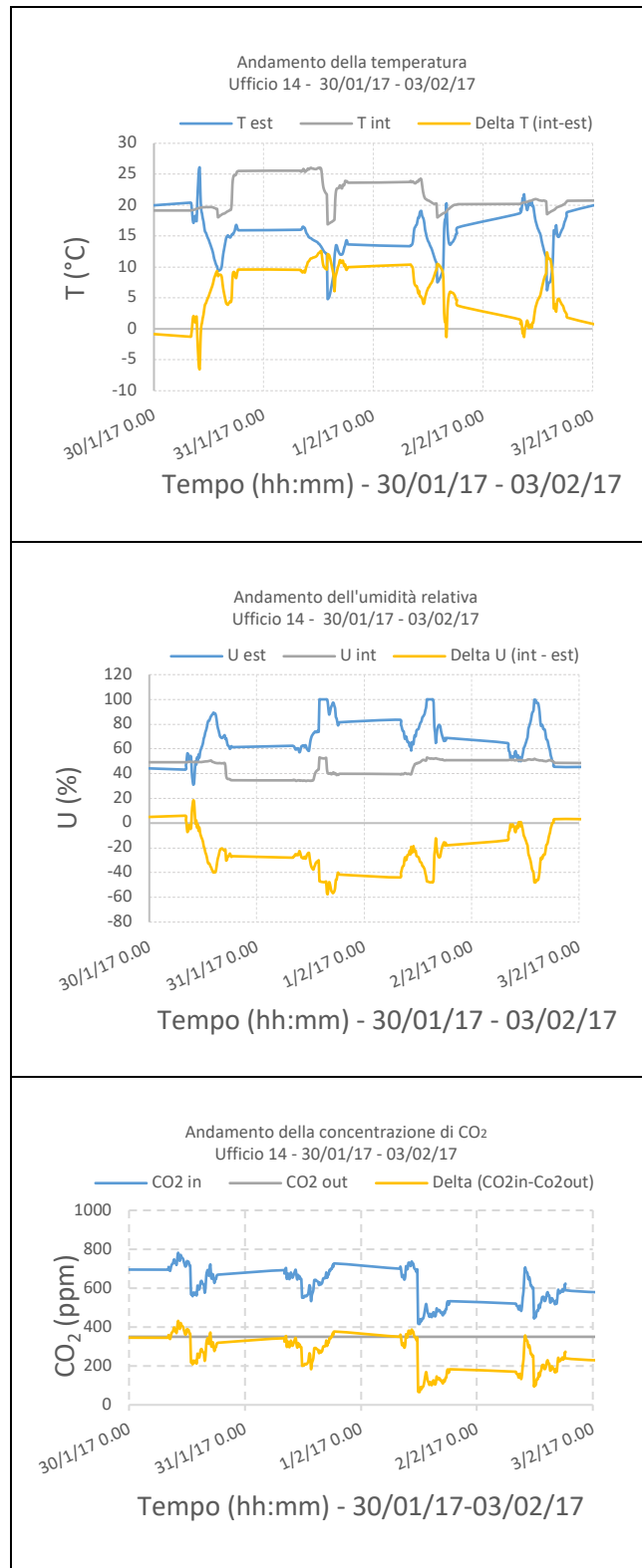


Tabella 6.2.9 Andamento delle variabili indoor – Ufficio 14 – 30/01/17 – 03/02/17.



Misure di temperatura e umidità relativa interna

a) Ufficio 5 – Soppalco



Figura 6.2.3 Pianta ufficio 5 – Soppalco. Il posizionamento dei tinytag è indicato dalla stellina celeste.

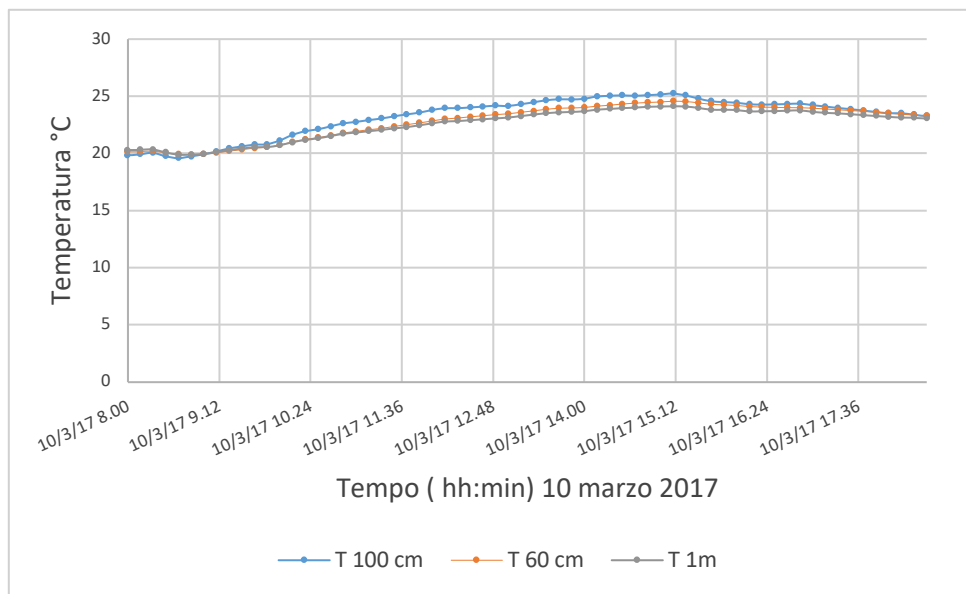


Figura 6.2.4 Andamento della temperatura interna a diverse altezze dal pavimento nell'ufficio 5 – soppalco.

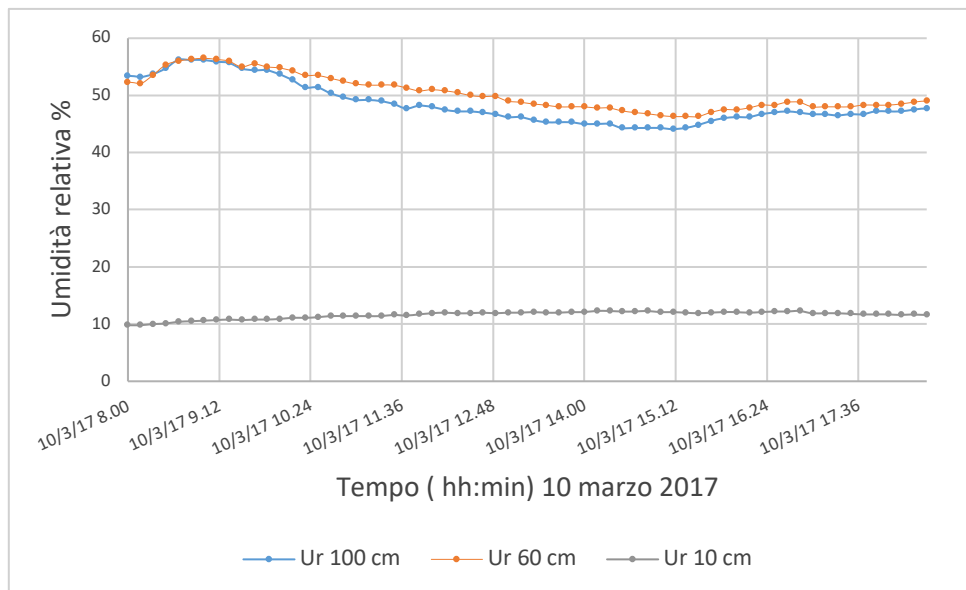


Figura 6.2.5 Andamento dell'umidità relativa interna a diverse altezze dal pavimento nell'ufficio 5 – soppalco.

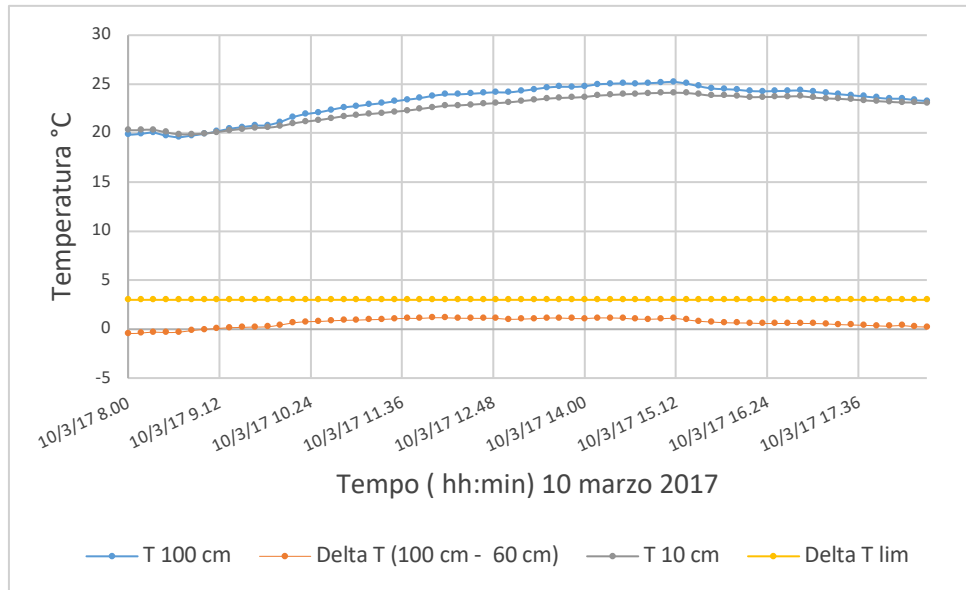


Figura 6.2.6 Confronto tra la variazione del Delta T livello testa e livello caviglie e il valore limite di 3 °C suggerito dalla normativa (ufficio 5 – soppalco).

b) Ufficio 5 – Piano terra



Figura 6.2.7 Pianta ufficio 5 – Piano terra. Il posizionamento dei tinytag è indicato dalla stellina celeste.

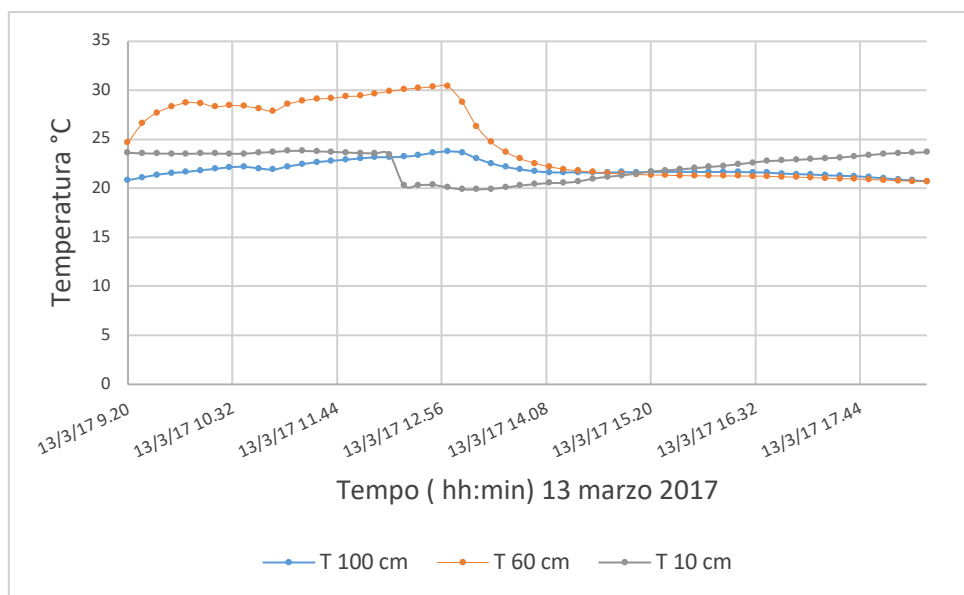


Figura 6.2.8 Andamento della temperatura interna a diverse altezze dal pavimento nell'ufficio 5 – piano terra.

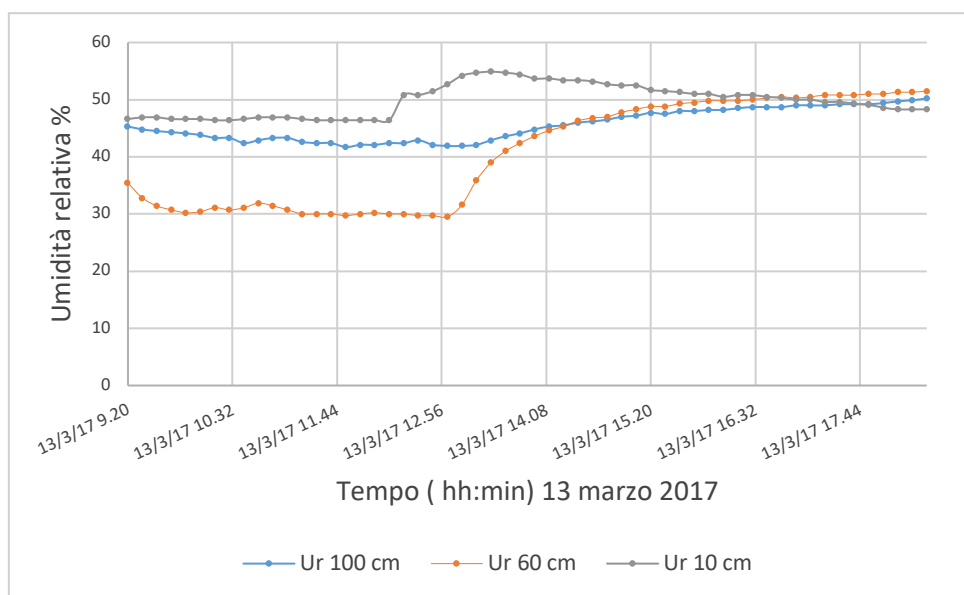


Figura 6.2.9 Andamento dell'umidità relativa interna a diverse altezze dal pavimento nell'ufficio 5 – piano terra.

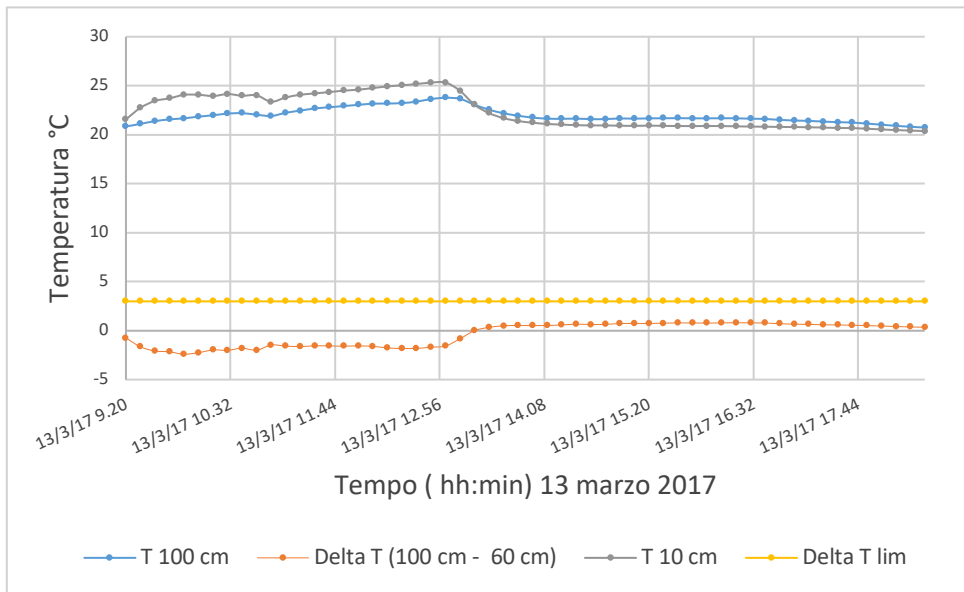


Figura 6.2.10 Confronto tra la variazione del Delta T livello testa e livello caviglie e il valore limite di 3 °C suggerito dalla normativa (ufficio 5 - piano terra)

Misure di temperatura e umidità relativa interna

c) Ufficio 9 – Soppalco



Figura 6.2.11 Pianta ufficio 9 – Soppalco. Il posizionamento dei tinytag è indicato dalla stellina celeste.

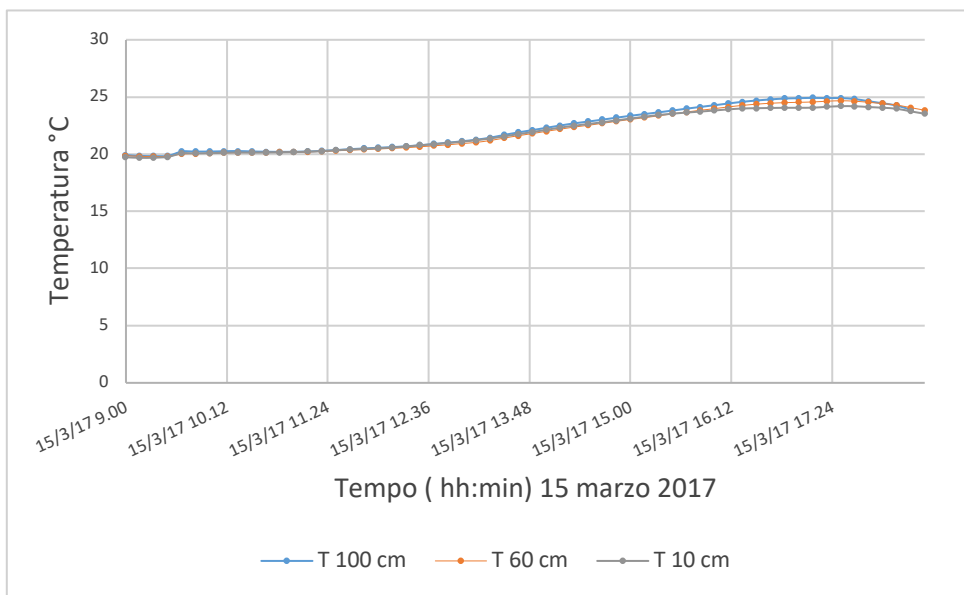


Figura 6.2.12 Andamento della Temperatura interna a diverse altezze dal pavimento nell'ufficio 9 – soppalco.

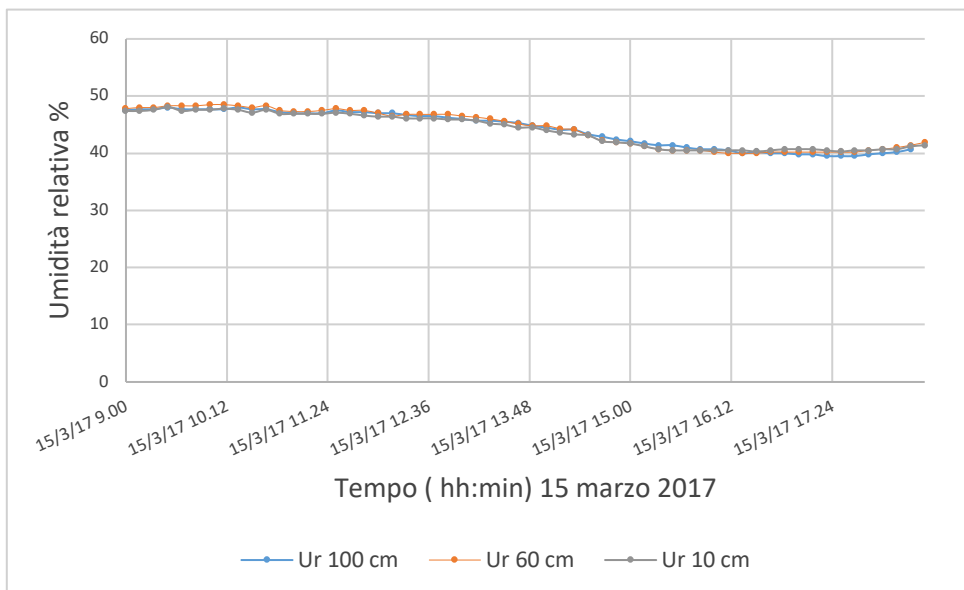


Figura 6.2.13 Andamento dell'umidità relativa interna a diverse altezze dal pavimento nell'ufficio 9 – soppalco.

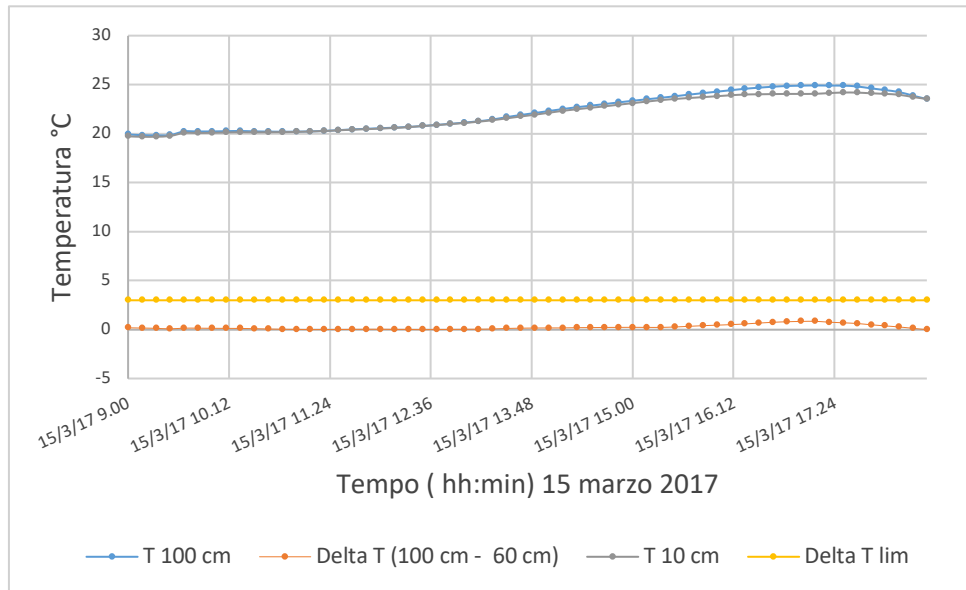


Figura 6.2.14 Confronto tra la variazione del Delta T livello testa e livello caviglie e il valore limite di 3 °C suggerito dalla normativa (ufficio 9 – soppalco).

d) Ufficio 9 – Piano terra

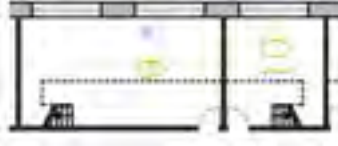


Figura 6.2.15 Pianta ufficio 9 – Piano terra. Il posizionamento dei tinytag è indicato dalla stellina celeste.

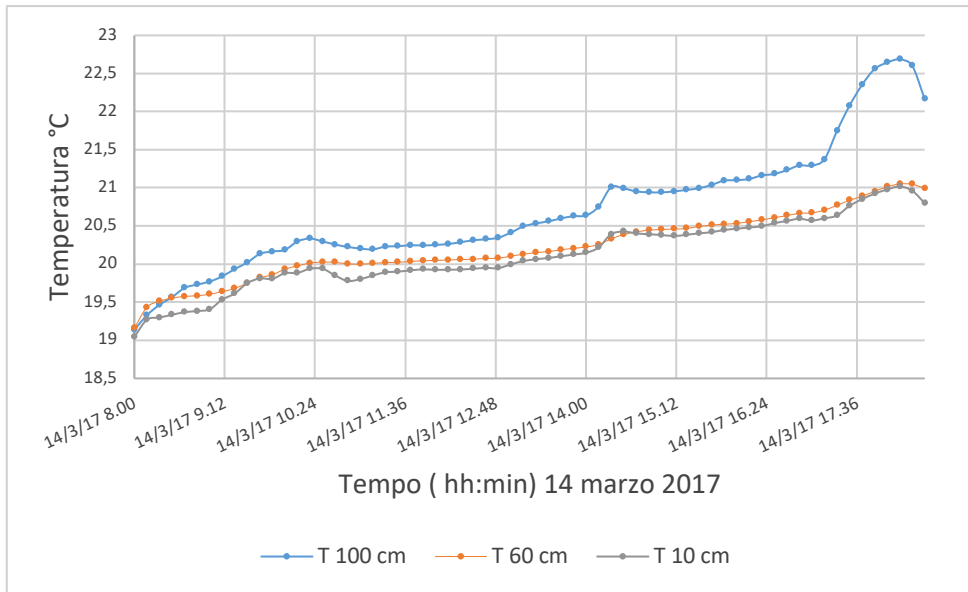


Figura 6.2.16 Andamento della Temperatura interna a diverse altezze dal pavimento nell'ufficio 9 – piano terra.

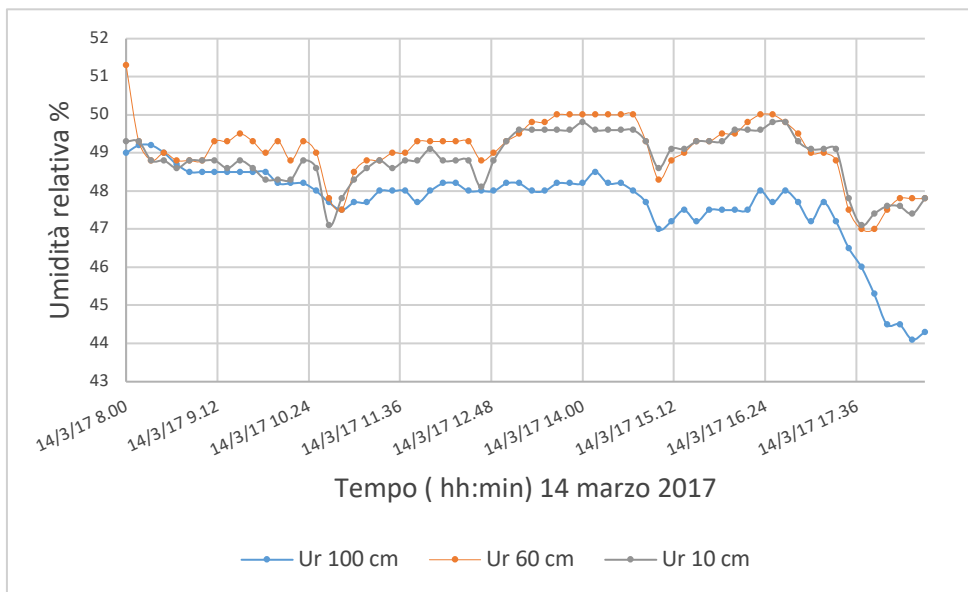


Figura 6.2.17 Andamento dell'umidità relativa interna a diverse altezze dal pavimento nell'ufficio 9 – piano terra.

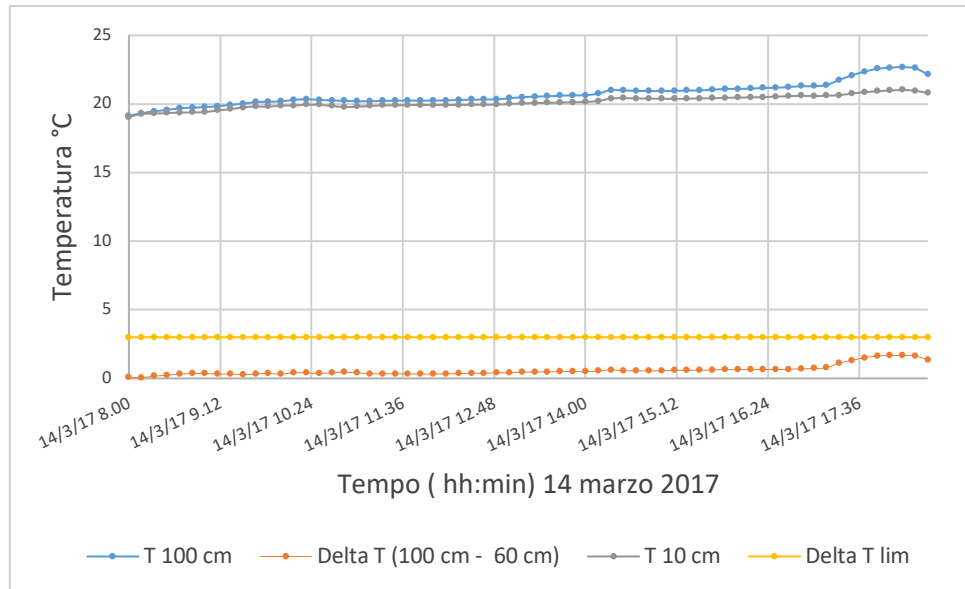


Figura 6.2.18 Confronto tra la variazione del Delta T livello testa e livello caviglie e il valore limite di 3 °C suggerito dalla normativa (ufficio 9 - piano terra).

e) Ufficio 14



Figura 6.2.19 Pianta ufficio 14. Il posizionamento dei Tinytag è indicato dalla stellina celeste.

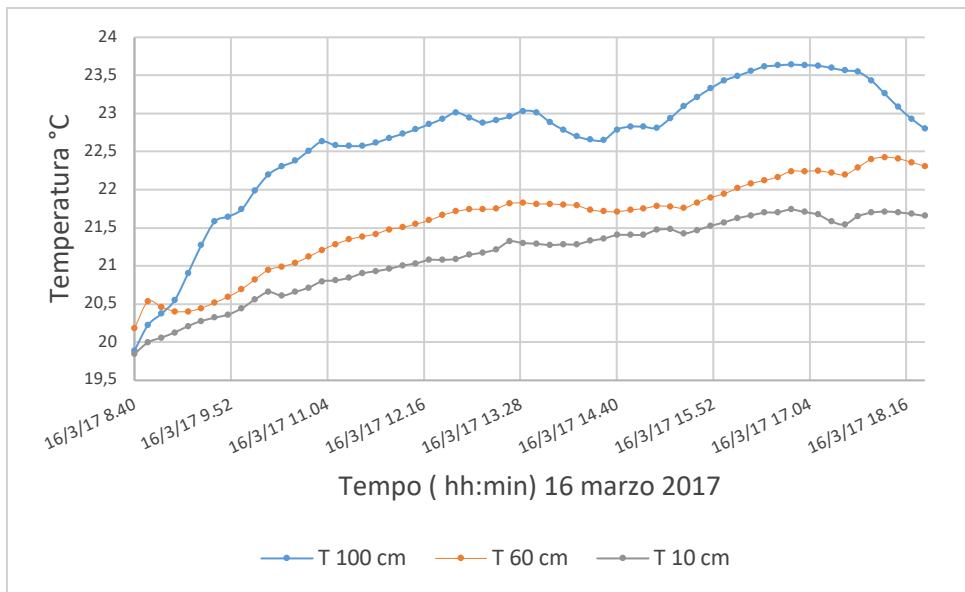


Figura 6.2.20 Andamento della temperatura interna a diverse altezze dal pavimento nell'ufficio 14.

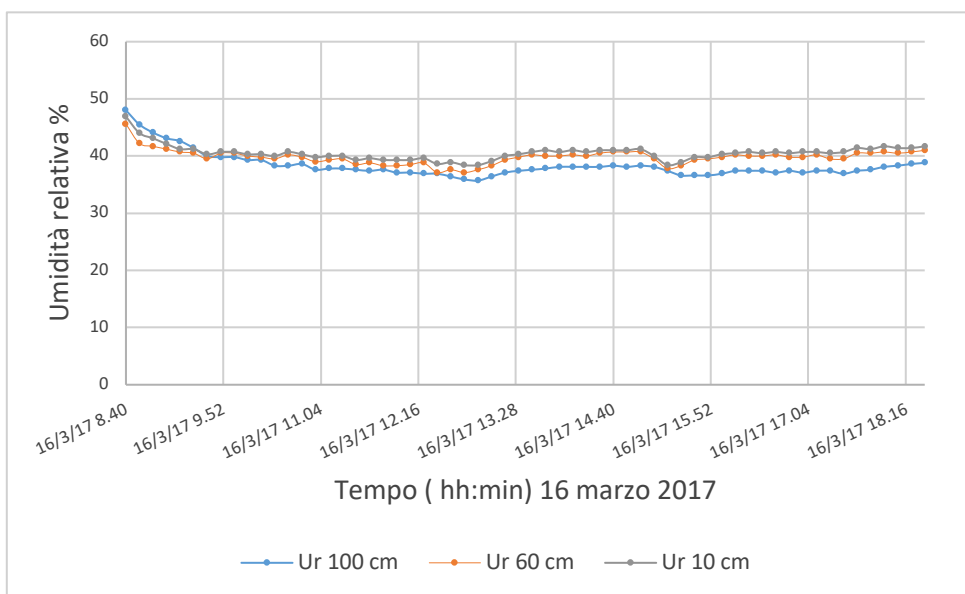


Figura 6.2.21 Andamento dell'umidità relativa interna a diverse altezze dal pavimento nell'ufficio 14.

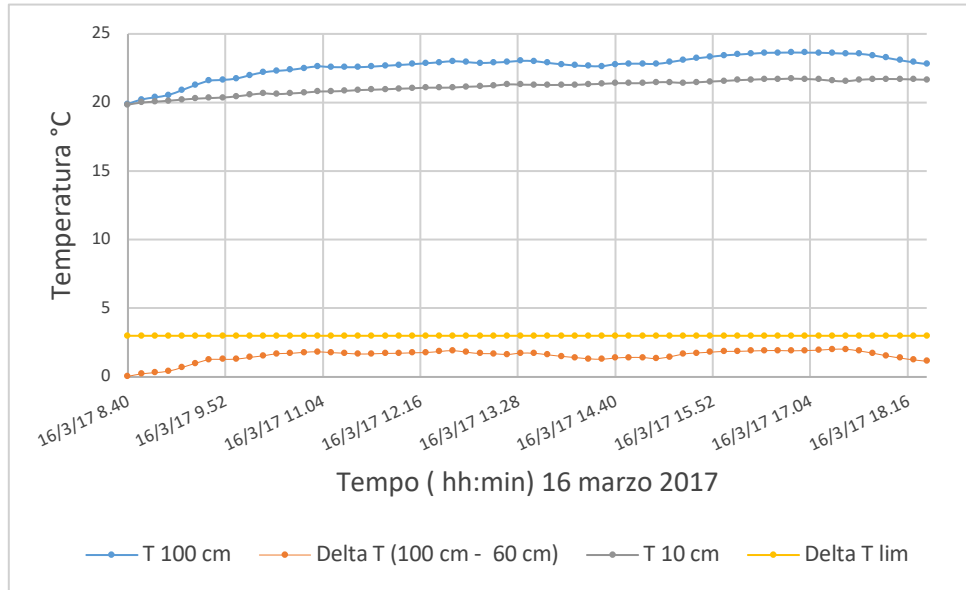


Figura 6.2.22 Confronto tra la variazione del Delta T livello testa e livello cavie e il valore limite di 3 °C suggerito dalla normativa (ufficio 14).

6.3 Esito del monitoraggio

L'analisi del monitoraggio microclimatico indoor è stata condotta nell'edificio Sotacarbo nell'arco temporale che va dal 19 dicembre al 03 febbraio. Lo studio ha interessato un totale di 3 ambienti dell'area uffici:

- Ufficio 5 – piano terra;
- Ufficio 9 – piano terra e soppalco;
- Ufficio 14.

Le misure sono state effettuate nelle reali condizioni operative degli ambienti oggetto di studio, con impianto di condizionamento acceso, dal lunedì al venerdì nelle ore lavorative 08:00 – 18:30, adoperando come valori fissi di resistenza termica all'abbigliamento e di tasso metabolico rispettivamente 1 clo e 1,2 met.

Oltre ai dati del monitoraggio relativi all'intero periodo di analisi, sono stati riportati nel dettaglio i grafici delle seguenti settimane, intese come rappresentative del periodo analizzato:

- Ufficio 5: 20-23/12/16; 23-27/01/17;
- Ufficio 9: 19-20/12/16; 16-20/01/17;
- Ufficio 14: 16-20/01/17; 30/01-03/02/17;

Complessivamente, i risultati dei rilievi strumentali negli ambienti analizzati, nel mese di dicembre, forniscono valori medi dell'indice PMV che ricadono quasi sempre nell'intervallo di "benessere termico" $-0,5 < PMV < +0,5$ - suggerito dalla normativa ISO 7730. Globalmente, si osserva che le condizioni di comfort termico all'interno di questi ambienti sono garantite. Nel mese di gennaio, è emerso quanto segue:

- ufficio 9: Nelle prime ore del mattino, coincidenti con l'inizio della giornata lavorativa, si percepisce, sia al piano terra che nella zona soppalcata, un ambiente termicamente freddo, con valori di PMV ricadenti nell'intervallo -1 e $-1,5$. La situazione cambia con l'avvio dei ventilconvettori, facendo registrare nella fascia oraria 13-14, nel soppalco, valori di PMV tendenti al caldo. Al piano terra, di contro, i dati relativi al voto medio oscillano su valori tali per cui la valutazione dell'ambiente varia da una condizione di freddo ($PMV > -1$), ad una di benessere termico raggiunta dal primo pomeriggio in poi. Per quanto detto, si evidenzia l'utilizzo di sistemi di riscaldamento ausiliari (stufette elettriche) nelle postazioni lavorative al piano terra. Tale evidenza è da ricercarsi nel posizionamento dei fan-coil in prossimità del solaio e delle superfici finestrate presenti solo nella parte alta. In particolare nella settimana dal 16 al 20 Gennaio, si osserva che la temperatura interna nel piano terra è di $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ e nella zona soppalcata è superiore ai 20 , con un $\Delta T \geq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ufficio 5 – piano terra: Si evidenzia una condizione di benessere termico per la quasi totalità del periodo analizzato. Il PMV assume valori superiori all'unità solo ad inizio giornata. Anche le temperature interne variano da un minimo di 17 per poi attestarsi attorno ai $22, 23\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ufficio 14: anche in questo caso, nell'orario di ingresso, il mancato condizionamento degli ambienti di interesse ne determina un basso livello di comfort. Con l'avvio del sistema di climatizzazione la valutazione dell'ambiente termico risulta accettabile, con valori di $PMV < 1$. La temperatura interna a regime è prossima ai $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

In antitesi, i risultati ottenuti nella campagna sperimentale condotta nella stagione estiva della precedente annualità, hanno evidenziato, come illustrato nelle grafiche sottostanti, condizioni termiche complessivamente accettabili per tutti e tre gli ambienti. Il valore medio del PMV ricade sempre nell'intervallo di benessere termico, assumendo valori al di fuori di questo, nell'ufficio 14 e nella zona soppalcata dell'ufficio 9, in concomitanza con lo spegnimento dei ventilconvettori, raggiungendo una percentuale di insoddisfatti maggiori del 30%. Nell'ufficio 9, al piano terra, si osserva una temperatura massima di $26\text{ }^{\circ}\text{C}$; $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ è quella registrata nella zona soppalcata, con un $\Delta T_{\text{max}} = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Per quanto spiegato la stagione con il più alto grado di criticità risulta essere quella invernale.

Tabella 6.3.1 Andamento degli indici PMV e PPD e della temperatura nell'ufficio 9 – 18/07/16 – 22/07/16.

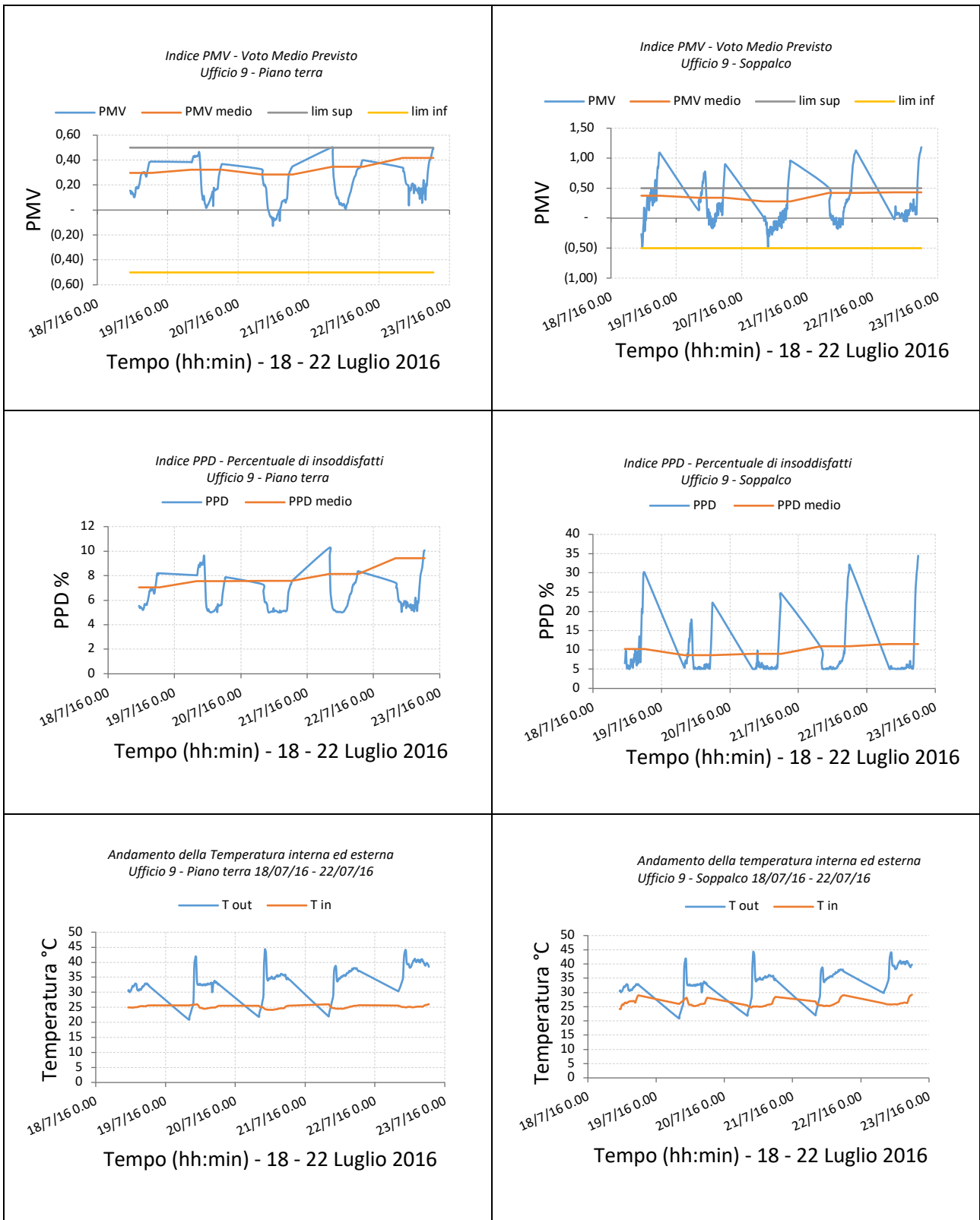
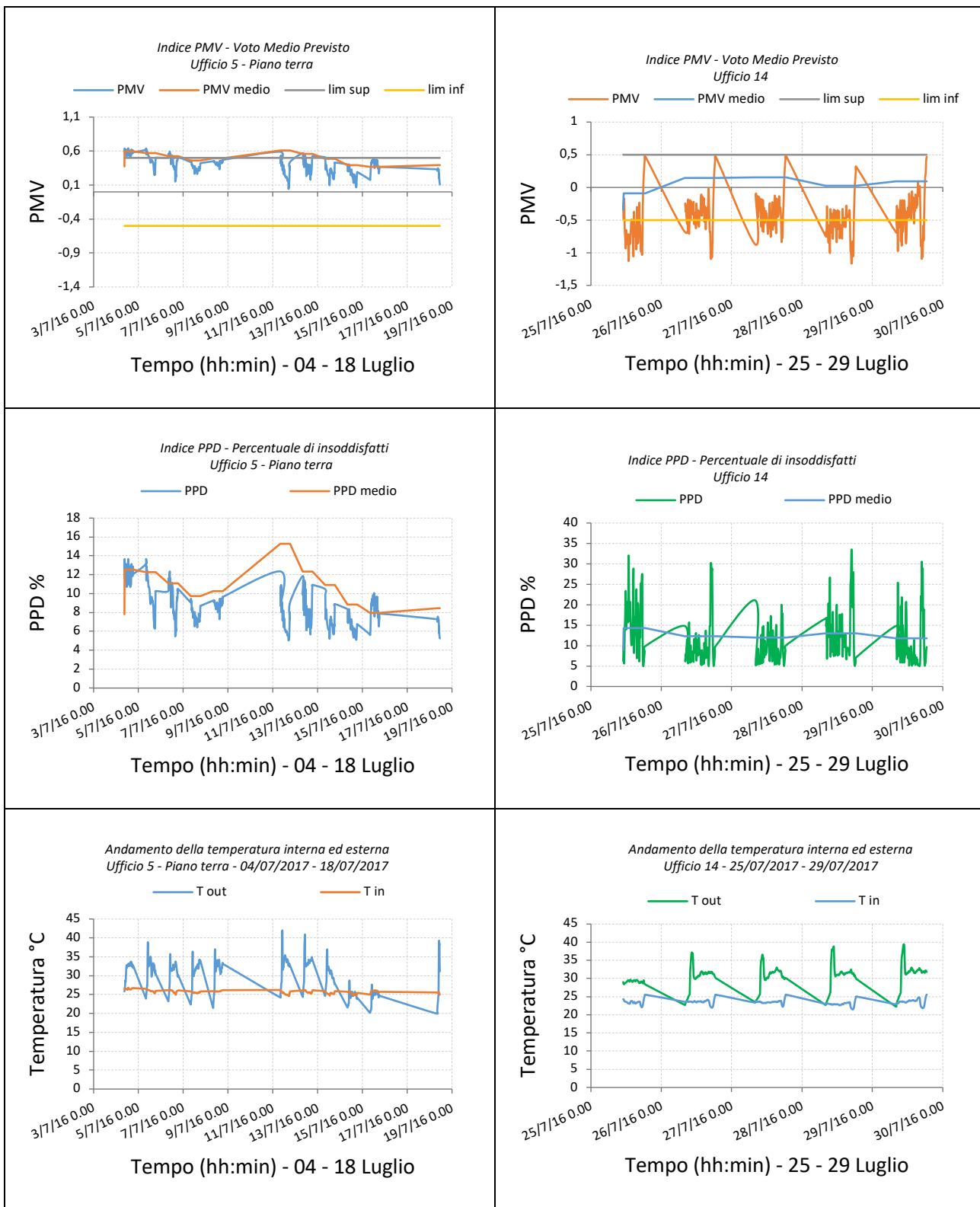


Tabella 6.3.2 Andamento degli indici PMV e PPD e della temperatura nell'ufficio 5 (04/07/16 – 18/07/16) e nell'ufficio 14 (25/07/16 – 29/07/16).



Unitamente all'analisi delle condizioni di comfort globali, sono state eseguite, in specifici ambienti, delle indagini relative al discomfort locale dovuto alla non uniformità delle variabili ambientali, temperatura e umidità relativa interna.

Attraverso le misure di queste ultime variabili, valutate alla quota di: 10 cm, 60 cm e 1 m dal pavimento - distanze che corrispondono, per una persona seduta, rispettivamente a livello delle caviglie, livello delle ginocchia e livello della nuca - è stato possibile confrontare il gradiente verticale della temperatura dell'aria tra i livelli 1 m e 10 cm ($\Delta T(1\text{ m} - 10\text{ cm})$) con il valore limite suggerito dalla normativa ($\Delta T_{\text{lim}} = 3^\circ\text{C}$).

Dai risultati ottenuti è emerso che, per tutti gli ambienti monitorati, questo limite è sempre rispettato. Per quanto concerne la qualità dell'aria, la concentrazione di CO_2 negli uffici oggetto di studio non supera quasi mai i 1000 ppm.

Si è provveduto in ultimo ad effettuare un'indagine relativa al comfort illuminotecnico nelle postazioni di lavoro all'interno degli uffici oggetto di studio. I dati dell'illuminamento sono relative a misurazioni effettuate in periodo invernale. Si è fatto riferimento alla UNI EN 12464-1, che prevede per gli operatori che lavorano al videoterminale, un illuminamento medio di 500 lux. Appare ben illuminata la zona soppalcata dell'ufficio 9, mentre al piano terra, sia per l'ufficio 9 che per l'ufficio 5, l'apporto di luce naturale è scarso e si registrano valori compresi tra 400 e 500 lux solo con l'ausilio di luce artificiale. L'ufficio 14 risulta poco illuminato anche per via della maggior distanza dal punto di misura al corpo luce. Si sottolinea che anche con luci accese lux < di 300.

L'indagine microclimatica ha evidenziato le criticità relative agli ambienti monitorati, rappresentando un elemento preliminare in relazione ad una possibile riqualificazione energetica degli edifici.

7 Conclusioni

Il presente lavoro approfondisce e analizza la qualità globale degli ambienti interni negli edifici. Le attività previste costituiscono una base finalizzata alla caratterizzazione del patrimonio edilizio pubblico insistente sulla Regione Sardegna, e allo sviluppo di una metodologia per interventi di efficienza energetica in edifici vincolati nel territorio del Sulcis. Gli obiettivi sono molteplici e riguardano lo studio dei parametri che definiscono la qualità di un ambiente interno e l'analisi dell'influenza degli occupanti nella gestione dei parametri indoor. In particolare sono state approfondite tematiche relative al comfort termico, illuminotecnico e della qualità dell'aria in due edifici pubblici storici ad uso ufficio.

L'indagine, condotta nel Comune di Carbonia, ha riguardato due edifici storici risalenti all'epoca fascista e adibiti ad uso ufficio: il palazzo municipale e l'edificio ospitante il centro ricerche Sotacarbo.

In riferimento agli stabili sopra citati, si è provveduto, in periodi distinti, ad attrezzare gli ambienti monitorati con centraline di misura "GRILLO MMTS" dotate di sensori di microclima interno (in termini di temperatura, umidità, concentrazione di CO₂, velocità e direzione del vento). La scelta degli spazi da monitorare è stata fatta considerando sia la loro esposizione che la loro ubicazione in modo da comprendere i lati con differenti esposizioni solari. Le misure sono state effettuate nelle reali condizioni operative degli ambienti, dal lunedì al venerdì, con l'impianto di condizionamento acceso, nel corrispondente orario di lavoro. Tenuto conto dell'attività che l'individuo svolge all'interno dell'ambiente considerato (funzione del metabolismo energetico M [W/m²] met) e del tipo di vestiario utilizzato dagli occupanti durante il monitoraggio (la resistenza termica dell'abbigliamento I_{cl}), l'elaborazione dei dati ha permesso di valutare, tramite foglio di calcolo, lo stato di comfort termico all'interno degli edifici, determinandone gli indici PMV (voto medio previsto) e PPD (percentuale di persone insoddisfatte) relativi al comfort termico globale. Si è infine provveduto ad effettuare un'indagine relativa al comfort illuminotecnico nelle postazioni di lavoro all'interno degli ambienti oggetto di studio.

Per quanto concerne il palazzo comunale, i rilievi sono stati condotti nel periodo che va dal 3 agosto al 29 settembre 2017 e l'indagine ha riguardato un totale di 11 spazi di lavoro.

Le prime due settimane di monitoraggio rappresentano quelle climaticamente più calde con un graduale decremento delle temperature in quelle successive. Sulla base di quanto detto, la valutazione termica degli ambienti nelle settimane più critiche è di "leggermente caldo" e i valori di PMV e della PPD rientrano nell'intervallo di "ambienti termicamente accettabili" nelle settimane seguenti e nell'intervallo di benessere termico dal 20 al 29 settembre.

Confrontando le variabili temperatura e umidità interna nei differenti uffici si osserva che non tutti rispettano gli standard previsti dalle Linee Guida ISPSEL, registrando talvolta valori di temperatura interna prossimi ai 30 °C. Lo studio ha consentito di evidenziare uno scarso livello di comfort termico negli ambienti monitorati, imputabile alla mancanza di regolazione della temperatura interna, alla scarsa efficienza degli impianti di condizionamento e alla mancanza o carenza di schermature solari. La concentrazione di CO₂ per quasi tutti gli spazi monitorati non supera i 1000 ppm e generalmente i valori maggiori si registrano laddove più persone condividono lo stesso ambiente. Dai rilievi sull'illuminamento è emerso che, nelle postazioni di lavoro, i valori di luminosità naturale sono spesso inferiori ai 500 lux previsti dalla norma UNI EN 12464-1 ed appaiono ben illuminati solo sei ambienti su undici.

L'analisi del monitoraggio microclimatico nell'edificio Sotacarbo, avvenuta nel mese di dicembre e gennaio 2016-2017, ha interessato un totale di 3 ambienti di lavoro. Oltre ai grafici relativi al periodo di analisi, sono state monitorate nello specifico alcune settimane, caratteristiche per ciascun ambiente.

Complessivamente, i risultati dei rilievi strumentali negli ambienti analizzati forniscono, nel mese di dicembre, valori medi dell'indice PMV che ricadono nell'intervallo di "benessere termico" $-0,5 < PMV < +0,5$ suggerito dalla normativa ISO 7730. Le maggiori criticità sono state riscontrate, per tutti gli ambienti, nel mese di gennaio. In particolare, l'errato posizionamento dei ventilconvettori, in prossimità del solaio negli

ambienti a doppia altezza non ha contribuito a determinare un adeguato livello di comfort termico. Fondamentalmente la valutazione dell'ambiente termico nel primo mattino, all'apertura degli uffici, è quella di "freddo", sia nel piano terra che nel soppalco. Con l'avvio dei ventilconvettori, dopo 4/5 ore lavorative, si registrano nel soppalco valori di PMV tendenti al caldo, mentre al piano terra, con l'ausilio di stufe elettriche si riescono a raggiungere condizioni di benessere termico. La temperatura interna dell'ambiente specificato non presenta caratteristiche di omogeneità, con un ΔT di circa 4 °C tra i due piani.

Si è provveduto, inoltre, ad eseguire delle indagini relative al discomfort locale dovuto alla non uniformità delle variabili ambientali, temperatura e umidità relativa interna. Attraverso le misure di queste ultime è stato possibile confrontare il gradiente verticale della temperatura dell'aria con il valore limite suggerito dalla normativa. Dai risultati ottenuti è risultato che, per tutti gli ambienti monitorati, questo limite è sempre rispettato. La qualità dell'aria all'interno degli ambienti, in termini di concentrazione di CO₂ è da considerarsi buona, registrando valori quasi sempre al di sotto dei 1000 ppm.

Dalle misure dell'illuminamento si è rilevato che la zona soppalcata risulta ben illuminata, mentre in quelle al piano terra si registrano valori di lux accettabili solo con l'ausilio di luce artificiale. Solo un ufficio su tre risulta scarsamente illuminato, raggiungendo con luci accese valori di lux < 300.

A fronte del monitoraggio microclimatico, riguardante la stagione estiva dell'annualità passata e quella invernale della presente, e relativa al Centro Ricerca Sotacarbo, è emersa una maggiore criticità nei mesi invernali.

L'indagine microclimatica ha evidenziato le problematiche relative agli ambienti monitorati, rappresentando un elemento preliminare in relazione ad una possibile riqualificazione energetica degli edifici.

8 Riferimenti bibliografici

1. Corgnati, S.P., Filippi, M., Maga, C., Energy certification of existing building: comparison between actual and calculated energy demand for space heating, CLIMAMED 2005 International Conference, Madrid, Spagna, 23-25 Febbraio 2005.
2. Sundstrom, E., Town, J.P., Rice, R.W., Osborn, D.P. and Brill, M. (1994), Office noise, satisfaction, and performance, *Environment and Behavior*, 26(2), pp. 195-222.
3. Alfano et al., 2004.
4. Carnevale D.G., (1992), Physical Settings of Work. *Public Productivity and Management Review*, 15, 4, 423-436.
5. De Dear, Richard J. And Brager, Gail Schiller. 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, v 104, n Pt 1A, p 145-167, 1998.
6. ASHRAE Handbook-Fundamentals, American Society of Heating, refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2001.
7. Van Bommel W.J.M., Van den Beld G.J. Lighting for work: a review of visual and biological effects , *Lighting Research and Technologies* 36(4):255-269 (2004).
8. Woods et Al. – “Office worker perceptions of indoor air quality effects on discomfort and performance” – *Proceedings of Indoor Air '87*, *ibid*, vol.2 464-468.
9. Sundell J. 2004. The history of indoor air quality and health. *Indoor Air* 14 (Suppl 14). pp. 51-58.
10. Melikov A.K., Cermak R. and Mayer M. 2002. Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices, *Energy and Buildings*, Vol. 34, pp. 829–836.
11. Giorgio Peghin, Antonella Sanna: Carbonia, città del Novecento. Guida all'architettura moderna della città.
12. “Studio sperimentale del microclima interno in edifici pubblici del Sulcis” C. Frau, E. Loria, A. Madeddu, F. Poggi, Report Rds/PAR2015/xxx (in attesa di pubblicazione).