

DETERMINAZIONE DEGLI INDICI PMV/PPD ATTRAVERSO MISURE STRUMENTALI E QUESTIONARI NEL MODELLO ADATTIVO

Cinzia Buratti¹, Angelo Milone², Daniele Milone², Salvatore Pitruzzella³, Paola Ricciardi⁴.

¹ CIRIAF, Sez. Fisica Tecnica e Inquinamento Ambientale. Università di Perugia.

² Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali, Università di Palermo.

³ Docente a contratto. Facoltà di Architettura. Università di Palermo.

⁴ CIRIAF, Sez. Inquinamento Acustico e da Emissioni Gassose. Università di Pavia.

SOMMARIO

Il presente lavoro si colloca all'interno dei recenti sviluppi sui modelli adattivi, nei quali l'occupante di un edificio non è più unicamente considerato come un soggetto passivo di scambio termico (UNI EN ISO 7730/2003), bensì interagisce attivamente a tutti i livelli con l'ambiente. E' con questa finalità che è stata elaborata l'attuale revisione della Norma UNI EN ISO 7730, anche se l'approccio risulta ancora troppo generico, per cui manca una definizione appropriata di un modello adattivo. In alcuni studi precedenti erano state analizzate sia sperimentalmente, attraverso misure termoigrometriche, che soggettivamente, attraverso la compilazione di questionari, aule universitarie delle Facoltà di Ingegneria di Perugia, Terni e Pavia. In questa sede, per ampliare la campagna di misura e validare la metodologia, sono presentati i risultati di alcune indagini sperimentali sulle condizioni termoigrometriche di un'aula universitaria della Facoltà di Architettura dell'Università di Palermo, effettuate con strumentazione specifica adatta allo scopo. I principali indici del benessere del monitoraggio sono poi stati confrontati con i risultati di un questionario, a risposta multipla, comprensivo di alcune informazioni necessarie all'applicazione del tradizionale modello statico e di altre del modello adattivo, comune a tutte le sedi universitarie finora analizzate. L'analisi ed il confronto delle due metodologie, sperimentali e soggettive effettuate nel periodo estivo sia ad impianto di condizionamento acceso che spento, sono qui presentati.

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito della disciplina del benessere termoigrometrico non è ancora stato definito un modello adattivo, in cui il soggetto interagisca attivamente a tutti i livelli con l'ambiente circostante. La finalità specifica di questo lavoro è di mettere a confronto due distinte metodologie di analisi: una strumentale, legata alla determinazione sperimentale dei principali parametri termoigrometrici, ed una soggettiva, basata sulla risposta da parte dei singoli occupanti ad un questionario specificatamente elaborato.

La metodologia di misura si basa sul rilievo dei parametri termoigrometrici ambientali previsti dalla UNI-EN-ISO 7730/1994, dalla ISO-DIS 7730/2003, dalla UNI-EN-ISO 10551/2002 e dall'ASHRAE Standard 55/1992, utili ai fini di una valutazione del comfort sia attraverso il metodo tradizionale sia attraverso il nuovo approccio adattivo.

Il questionario, a risposta multipla, è comprensivo di alcune informazioni necessarie all'applicazione del tradizionale modello statico e di altre del modello adattivo proposto nella ISO/DIS 7730/2003 e nell'ASHRAE 55/P.

Nello specifico il confronto tra le due metodologie è stato applicato in aule universitarie, in analisi precedenti presso l'Università di Perugia e Pavia [1]; oggetto di studio del presente lavoro è un'aula della Facoltà di Architettura dell'Università di Palermo.

2. DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE DI STUDIO

Per il presente studio è stata utilizzata un'aula della Facoltà di Architettura dell'Università di Palermo, già oggetto di precedenti ricerche [2, 3], la cui planimetria è riportata in figura 1.

L'aula, dotata di impianto di condizionamento con un

sistema misto ad aria primaria e fan-coils, può ospitare fino a 60 persone, ma durante la campagna sperimentale è stata occupata da 54 studenti, disposti come in figura 1.

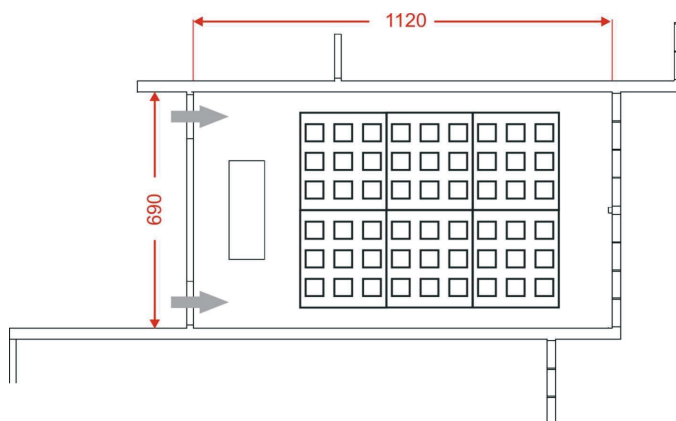


Figura 1 Planimetria dell'aula oggetto di studio.

I rilievi sono stati effettuati nei giorni 7 e 8 giugno 2005, già in clima estivo per la città di Palermo, giorni in cui erano presenti sempre gli stessi studenti che seguivano il corso di Tecnica del Controllo Ambientale; ciò è risultato essere un dato positivo, in quanto gli studenti, da tempo informati sulla sperimentazione, erano a conoscenza delle problematiche inerenti la stessa, anche oggetto di studio del corso.

L'aula è stata suddivisa in 6 zone (*frames*) e ciascuna zona in nove postazioni (*clusters*) (figura 1).

Nel primo giorno sono state effettuate contestualmente misure strumentali e rilevamenti soggettivi mediante questionari, basati anche sul modello adattivo, ad impianto spento. Nel giorno successivo sono state ripetute le misure strumentali ed i test adattivi con l'impianto di condi-

zionamento acceso.

La campagna di monitoraggio è stata effettuata nei due casi, impianto spento e acceso, poiché nelle stagioni intermedie (per esempio maggio, ottobre) l'impianto viene spento, malgrado le aule siano soggette ad un elevato irraggiamento solare, anche diretto.

Si è proceduto quindi ad un confronto tra la porzione di aula direttamente colpita dai raggi solari osservata durante le misure e quella ottenuta con l'uso del software Ecotect®, che permette la simulazione del percorso solare.

Nelle figure 2 e 3 sono evidenziate le aree direttamente irraggiate nei giorni 7 Giugno (giorno di inizio della campagna sperimentale) e 2 Ottobre (altro mese simile sia per le condizioni esterne che interne (impianto spento)), alle ore 10,30.

Nella figura 4 è rappresentata l'aula con la posizione delle sonde (S), l'indicazione dei frames da 1 a 6 e dei clusters da 1 a 9.

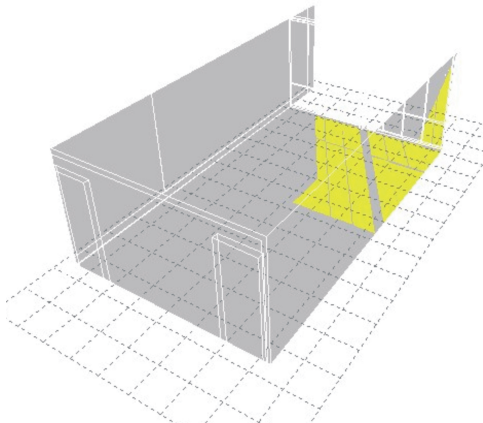


Figura 2 Penetrazione solare il 7 Giugno.

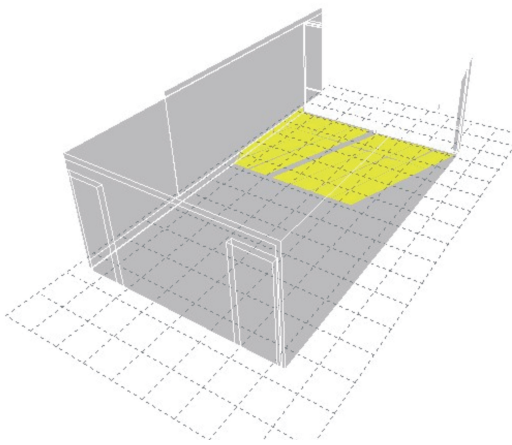


Figura 3 Penetrazione solare il 2 Ottobre.

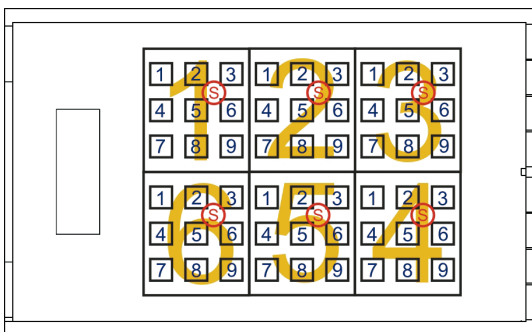


Figura 4 Indicazione delle zone e dei posti e posizione delle sonde di misura.

3.CAMPAGNA SPERIMENTALE

3.1 Misure strumentali

Le misure strumentali sono state eseguite con un multiacquisitore BABUC/A ad 11 canali, con memoria fino a 20.000 campioni, con il quale sono stati acquisiti i seguenti parametri:

t_g = temperatura del globotermometro;

t_{bs} = temperatura di bulbo secco;

t_{bu} = temperatura di bulbo umido;

UR = umidità relativa;

V = velocità dell'aria.

Al multiacquisitore sono state pertanto connesse le seguenti sonde: Globotermometro BST 131, Psicrometro BSU 102, Sonda termometrica a bulbo umido a ventilazione naturale BSU 121, Anemometro BSV 105.

Dato l'elevato numero di grandezze da registrare, è stato necessario utilizzare 3 multiacquisitori. In figura 5 è riportata una vista dell'aula con i multiacquisitori utilizzati.

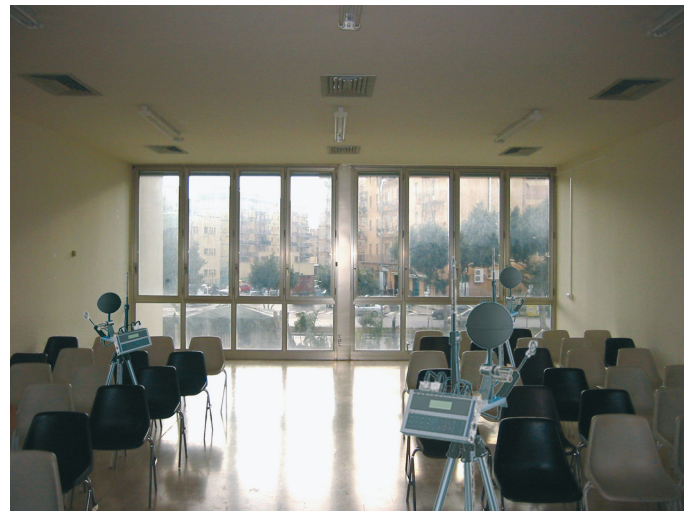


Figura 5 Centraline microclimatiche disposte nell'aula oggetto di studio.

Poiché le misure sono durate 50 minuti (dalle ore 10,00 alle ore 10,50), sono stati acquisiti 10 campioni per ogni singolo parametro, con campionatura programmata ogni 5 minuti.

I dati registrati sono stati trasferiti tramite software di gestione ad un Pc ed elaborati.

Attraverso i dati, insieme ai parametri fisiologici Metabolismo e Resistenza Termica dell'Abbigliamento e l'uso del programma di calcolo UC Berkeley Thermal Comfort Program, sono stati calcolati i valori di PMV e PPD, riportati nelle tabelle 2 e 3, rispettivamente con impianto spento ed acceso e discussi nel seguito.

Per la potenza metabolica media dei soggetti è stato scelto il valore di $72W/m^2$ (pari a 1,2 Met); per l'abbigliamento, considerato il periodo quasi estivo, è stato scelto il valore di 0,7 clo, pari a $0,108 m^2 K/W$.

Durante la campagna di misure interne sono stati monitorati anche i valori della temperatura e dell'umidità esterna; la temperatura media esterna durante i rilievi si è mantenuta pressoché la stessa ($24,2^\circ C$) nei due giorni, mentre l'umidità relativa il primo giorno è stata del 45%, il secondo giorno del 62%.

In tabella 1 sono riportati in sintesi i risultati delle misure: i valori di T, TMR, UR e V sono quelli medi riferiti all'intera aula; lo stesso vale per gli indici PMV e PPD.

Tabella 1 Sintesi dei risultati strumentali

		Impianto spento 07 – Giugno - 2005	Impianto acceso 08 – Giugno - 2005
Valori esterni	T _a (°C)	24,2	24,3
	UR (%)	45	62
	V (m/sec)	0,7	0,6
Valori interni medi	T _a (°C)	24,4	21,5
	TMR (°C)	27,2	22
	UR (%)	58	48
	V (m/sec)	0,05	0,14
Parametri fisiologici	I _{clo}	0,7	0,7
	M (W/m ²)	70	70
Indici calcolati	PMV	1,27	0,44
	PPD (%)	40	8

3.2 Questionari

La normativa tecnica che regola il benessere termoigrometrico negli ambienti confinati è in continua evoluzione, infatti la UNI-EN-ISO 7730/1994 è stata integrata dalla ISO/DIS 7730/2003, mentre con la UNI-EN-ISO 10551 si è voluto introdurre il concetto dell'interazione uomo-ambiente, dando la possibilità al soggetto di un controllo personale del microclima (approccio adattivo).

Il questionario che è stato sottoposto agli occupanti dell'aula, già elaborato dai ricercatori dell'Università di Perugia [2] a partire da quello contenuto nella norma UNI-EN-ISO 10551, si divide in tre parti: nella prima parte sono richiesti i dati personali (età e sesso); nella seconda vengono richiesti pareri sulla percezione, sul comfort, sulla preferenza termica, sull'accettabilità e sulla tollerabilità, non solo per la temperatura ma anche per il movimento dell'aria e per i gradienti termici; nell'ultima parte sono richiesti pareri sulla possibilità di poter intervenire sulle condizioni ambientali. Tutti gli intervistati, infine, dovevano indicare la loro posizione nell'aula (1.1 ÷ 6.9).

I questionari sono stati distribuiti agli studenti dopo circa 20 minuti che erano in aula. Dei 54 studenti presenti, 45 erano uomini e 9 donne; la distinzione fra i due sessi, anche in considerazione della netta prevalenza di uomini, non ha portato a differenze significative.

I parametri più significativi elaborati a partire dai questionari sono sintetizzati nella tabella 2. Da essi si evince che ad impianto spento gli studenti avvertivano una sensazione di disagio e che lo scarso movimento dell'aria aggravava il disagio. Nettamente migliori sono i risultati ad impianto acceso.

Nelle tabelle 3 e 4 tutti i risultati sono messi a confronto e nelle stesse sono riportati gli scostamenti del PMV e della PPD per ciascun *frame*; nelle figure 6, 7, 8 e 9 sono infine confrontati i valori del PMV e del PPD di ogni *frame* con quelli strumentali acquisiti. Tutti i risultati sono commentati nel seguito.

Tabella 2 Sintesi dei parametri adattivi più significativi ottenuti dall'analisi dei questionari

	Impianto Spento	Impianto Acceso
Numero questionari	54	54
Età media soggetti	21	21
PMV medio	1,54	0,59
Scostamento PMV	0,69	0,39
Insoddisfazione Termica (%)	94,4	22,2
Preferenza Termica (%)	92,6	18,5
Inaccettabilità termica (%)	77,8	7,41
Fastidio Termico (%)	96,3	7,41
Inaccettabilità velocità dell'aria (%)	72,2	18,5
Inaccettabilità GTV (%)	42,6	9,3
Preferenza GTV (%)	42,6	70,4
Soddisfazione controllo ambientale	48,1	5,6

4. RISULTATI

I risultati ottenuti, sia strumentali che adattivi, mostrano che ad impianto di climatizzazione spento si avverte uno stato di disagio che riguarda soprattutto gli occupanti della metà di aula verso le pareti vetrate, con particolare discomfort nel *frame* n° 4, il più interessato dall'irraggiamento solare diretto. In tale area, infatti, si è pervenuti ad un PMV adattivo di +2,11, con una percentuale di insoddisfatti del 78%, ed un PMV strumentale di +1,62 con una percentuale di insoddisfatti del 59%. Un esame più accurato delle risposte date dagli intervistati di tale *frame* ha evidenziato che gli studenti della prima fila (*clusters* 4.3 - 4.6 - 4.9) avevano espresso il giudizio di molto caldo (+3) e massima insoddisfazione nei riguardi della velocità dell'aria (ad impianto spento infatti la velocità dell'aria è praticamente nulla). Il giudizio di molto caldo, malgrado la temperatura media dell'aria superasse di poco i 24°C, è legato all'irraggiamento diretto a cui erano sottoposti.

Anche negli altri *frames* le PPD sono superiori al 10%, valore massimo tradizionalmente consigliato dalla normativa tecnica [9], sia per i rilievi strumentali che per i risultati dei questionari.

Con l'impianto di climatizzazione acceso i risultati peggiori dei questionari sono ancora quelli del *frame* 4 (PMV = +0,89), con una percentuale di insoddisfatti del 22%.

Il miglioramento ottenuto dipende non solo dalle migliori condizioni termoigrometriche, ma anche da una maggiore velocità dell'aria.

Per quanto riguarda i rilievi strumentali, il peggior valore del PMV è pari a +0,60, con una percentuale di insoddisfatti del 12%, sempre nel *frame* 4; anche nei *frames* 2, 3 e 5 i risultati dei questionari forniscono una PPD superiore al 10%.

I risultati dei rilievi strumentali ad impianto acceso forniscono valori della PPD sempre entro il 10%, tranne che per il *frame* 4, per il quale si ha una PPD del 12%.

L'esame della tabella 1, derivante dall'elaborazione della porzione di questionario relativa agli aspetti adattivi, mostra un'elevata insoddisfazione termica ad impianto spento (94%),

notevolmente ridotta ad impianto acceso (22%); anche gli altri parametri migliorano nettamente nel passare da impianto spento ad impianto acceso.

Nelle figure 6 e 7 sono messi a confronto i valori del PMV derivanti dai questionari e quelli derivanti dalle misure, rispettivamente per impianto spento e impianto acceso; in entrambi i casi i valori derivati dai questionari sono più elevati rispetto a quelli derivati dalle misure, con una variazione massima di +0.49 per impianto spento e di +0.22 per impianto acceso (figura 10). Stesso andamento si riscontra per le corrispondenti PPD (figure 8 e 9), con una variazione massima del 19% per impianto spento e del 10% per impianto acceso (figura 11).

Tabella 3 Sintesi dei risultati strumentali ed adattivi ottenuti con l'impianto spento

FRAME	QUESTIONARIO				STRUM.			
	PMV	N. Risposte	PMV MEDIO	PPD (%)	PMV	PPD (%)	Δ PMV	Δ PPD (%)
1								
	+2	2						
	+1	6						
	0	1						
	-1	0						
	-2	0						
2	+3	1	1,44	47	1,26	40	+0,18	+7
	+2	3						
	+1	4						
	0	1						
	-1	0						
	-2	0						
3	+3	2	1,56	52	1,31	40	+0,25	+12
	+2	2						
	+1	4						
	0	1						
	-1	0						
	-2	0						
4	+3	3	2,11	78	1,62	59	+0,49	+19
	+2	4						
	+1	2						
	0	0						
	-1	0						
	-2	0						
5	+3	2	1,89	70	1,54	54	+0,35	+16
	+2	4						
	+1	3						
	0	0						
	-1	0						
	-2	0						
6	+3	0	1,11	29	0,92	22	+0,19	+7
	+2	2						
	+1	6						
	0	1						
	-1	0						
	-2	0						

Tabella 4 Sintesi dei risultati strumentali ed adattivi ottenuti con l'impianto acceso.

FRAME	QUESTIONARIO				STRUM.			
	PMV	N. Risposte	PMV MEDIO	PPD (%)	PMV	PPD (%)	Δ PMV	Δ PPD (%)
1								
	+2	0						
	+1	4						
	0	4						
	-1	1						
	-2	0						
2	+3	0	0,56	11	0,40	8	+0,16	+3
	+2	0						
	+1	5						
	0	4						
	-1	0						
	-2	0						
3	+3	0	0,67	15	0,45	9	+0,22	+6
	+2	1						
	+1	4						
	0	4						
	-1	0						
	-2	0						
4	+3	0	0,89	22	0,60	12	+0,19	+10
	+2	1						
	+1	6						
	0	2						
	-1	0						
	-2	0						
5	+3	0	0,67	15	0,50	10	+0,17	+5
	+2	0						
	+1	6						
	0	3						
	-1	0						
	-2	0						
6	+3	0	0,44	9	0,35	8	+0,09	+1
	+2	0						
	+1	5						
	0	3						
	-1	1						
	-2	0						

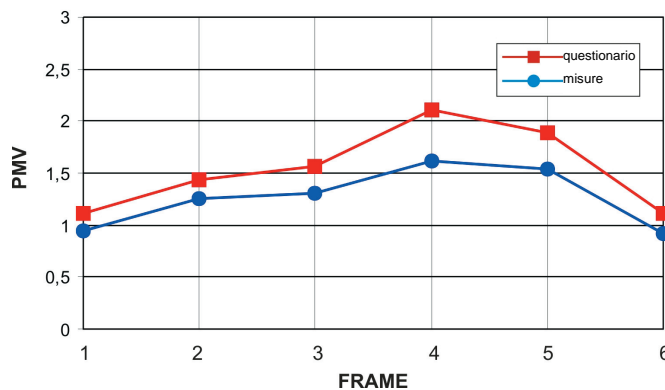


Figura 6 Confronto dei PMV strumentali e adattivi ad impianto spento

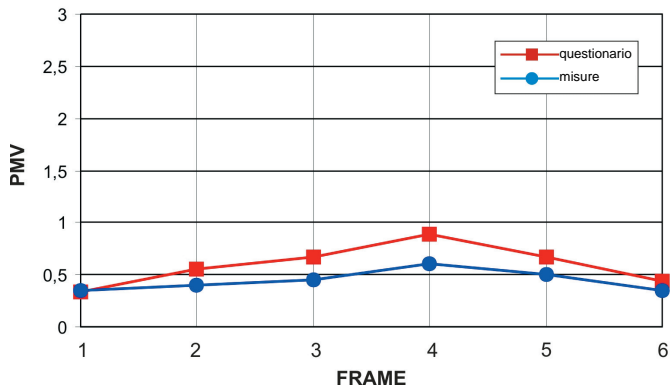


Figura 7 Confronto dei PMV strumentali e adattivi ad impianto acceso

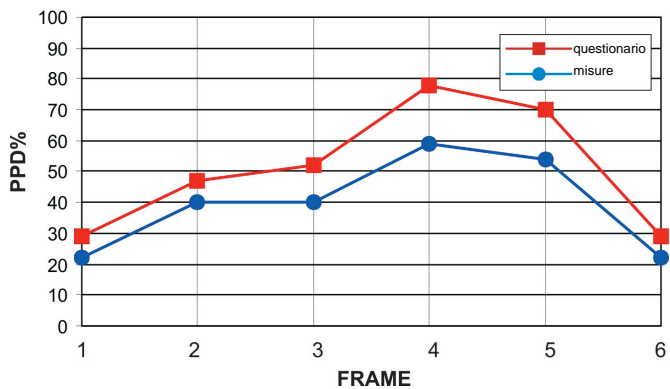


Figura 8 Confronto dei PPD strumentali e adattivi ad impianto spento

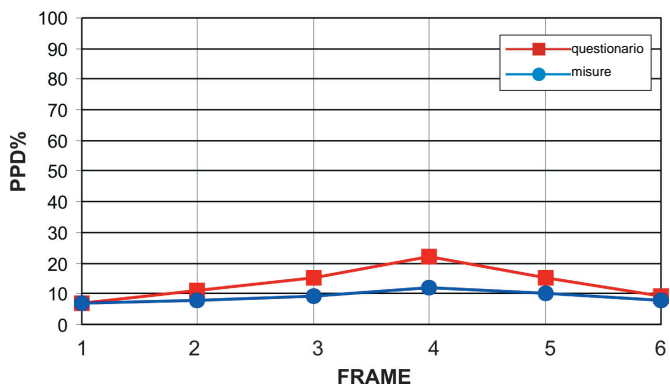


Figura 9 Confronto dei PPD strumentali e adattivi ad impianto acceso

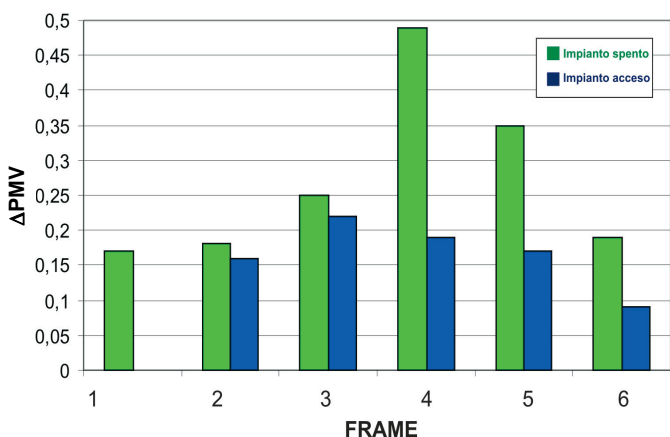


Figura 10 Variazione del PMV tra dati strumentali e dati soggettivi, per impianto spento e impianto acceso.

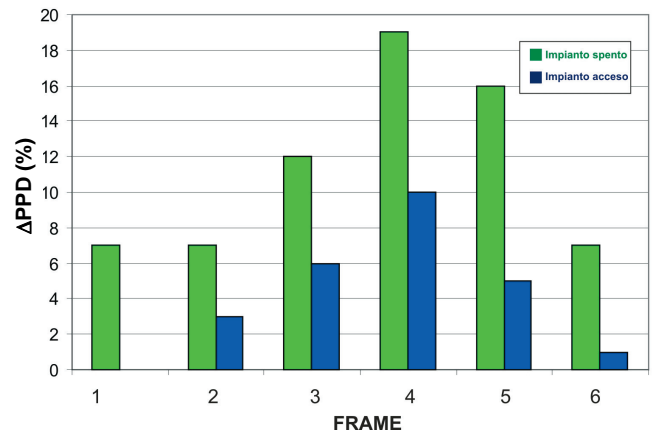


Figura 11 Variazione della PPD tra dati strumentali e dati soggettivi, per impianto spento e impianto acceso.

I valori adattivi di ogni singolo *cluster* sono stati ancora sovrapposti ai valori medi strumentali di ogni *frame*, attraverso una rappresentazione cromatica.

Nelle figure 12 e 13 si evidenzia una netta differenza cromatica tra *frames* e *clusters* nel primo caso e una più concorde restituzione cromatica nel secondo caso.

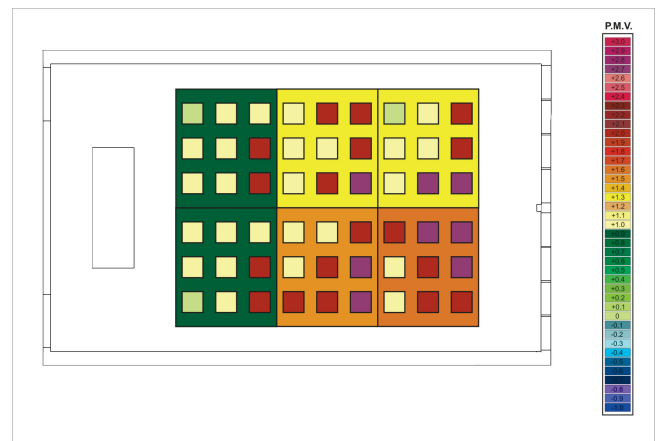


Figura 12 Restituzione cromatica dei PMV strumentali e adattivi ad impianto spento.

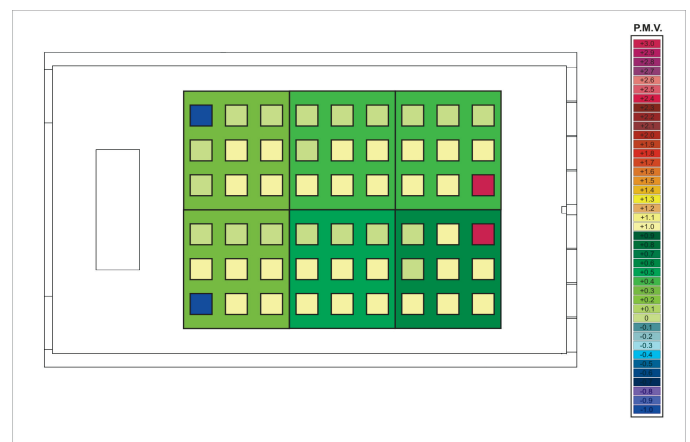


Figura 13 Restituzione cromatica dei PMV strumentali e adattivi ad impianto acceso

5. CONCLUSIONI

Al fine di valutare le condizioni di comfort microclimatico secondo l'approccio tradizionale e secondo un approccio che tenga conto dello stato attuale delle conoscenze in merito ai modelli adattivi, in questo lavoro sono stati presentati i risultati di una campagna sperimentale e della compilazione di un questionario, presso un'aula della Facoltà di Architettura di Palermo. Sia le indagini sperimentali che il questionario sono state condotte con le stesse metodologie con cui sono state in precedenza analizzate alcune aule delle Università di Perugia e di Pavia.

Attraverso il confronto tra la metodologia sperimentale e quella soggettiva del questionario si è osservato che, con l'aumento del discomfort locale, i risultati tra i due metodi si differenziano considerevolmente fino a raggiungere uno scarto massimo di 0.59 per il PMV. Quando invece si è in presenza di valori di comfort locali più soddisfacenti, con valori di PMV prossimi a +0,5 (percentuale di insoddisfatti del 10%), lo scostamento diminuisce notevolmente fino a quasi annullarsi ($\Delta PMV=0,08$).

In analogia con quanto riscontrato nelle aule dell'Università di Pavia, i risultati dei questionari dimostrano che prevale la sensazione di caldo.

Inoltre i questionari, e quindi la valutazione soggettiva, pongono sempre in evidenza le condizioni più critiche, per cui alcuni fattori come l'irraggiamento, la velocità dell'aria, la possibilità di interagire con la regolazione dell'impianto amplificano le sensazioni, e nel caso specifico, la sensazione di caldo.

Successive e più approfondite considerazioni potranno essere elaborate al termine di una campagna di monitoraggio invernale

ELENCO DEI SIMBOLI

GTV = Gradiente Termico Verticale (°C);
PMV = Voto Medio Previsto (-);
PPD = Percentuale Prevista di Insoddisfatti;
T = Temperatura dell'aria (°C);
TMR = Temperatura Media Radiante (°C);
UR = Umidità Relativa (%);
V = Velocità dell'aria (m/s).

BIBLIOGRAFIA

1. Buratti C., Ricciardi P., Simoncini C., *Il benessere termoigrometrico nelle aule universitarie: Primi risultati di una campagna sperimentale presso le Università di Perugia e Pavia effettuata secondo nuove metodologie basate sul modello adattivo*. Atti del 5° Congresso Nazionale CIRIAF. Perugia, 2005.
2. Milone A., Baiamonte V., Campione F., Milone D., Pitruzzella S., *Influenza di sistemi passivi sul PMV in ambienti Moderati*. Atti del 5° Congresso Nazionale CIRIAF. Perugia, 2005.
3. Milone A, Moncada Lo Giudice G, *Limiti del comfort su soggetti esposti a radiazione termica asimmetrica*-Condizionamento dell'aria, riscaldamento e refrigerazione n° 5 Maggio,1992.
4. Arnone D, Baiamonte V, Milone A, *Osservazioni sistematiche sul comportamento di studenti delle scuole elementari sottoposti a moderato stress da calore*-Condizionamento dell'aria, riscaldamento e refrigerazione n° 11 Novembre ,1991.

5. ASHRAE. *Thermal environmental conditions for human occupancy*. BSR/ASHRAE Standard 55P. Fourth Public Review. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2003.
6. ISO 7730, *Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*, International Organisation for Normalisation, Switzerland, 1994.
7. UNI Ergonomia - *Valutazione degli effetti termici (thermal strain) mediante misurazioni fisiologiche. Norma UNI-EN-ISO 9886*. Milano: Unificazione Italiana, 2004.
8. UNI-EN-ISO 10551-*Ergonomia degli ambienti termici Valutazione dell'influenza dell'ambiente termico Mediante scale di giudizio soggettive*, 2002.
9. Fanger, P. O. *Thermal Comfort: Analysis and Applications* in Environmental Engineering. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
10. Fanger, P.O. *Calculations of Thermal Comfort: Introduction of a Basic Comfort Equation*. ASHRAE Transactions 73, 1967.
11. Humphreys, Michael, et al., Editors. *Standards for Thermal Comfort: Indoor Air Temperature Standards for the 21st. Century*. London: Chapman Hall, 1995.
12. Humphreys, Michael A. *An Adaptive Approach to Thermal Comfort Criteria: Building for the Senses, the Economy and Society. in Naturally Ventilated Buildings*. Derek Clements-Croome. (ed.) London: E & FN Spon, 1997.
13. Humphreys, M. and F. Nicol, *Understanding the Adaptive Approach to Thermal Comfort*. ASHRAE Transactions 104, 1998.
14. Humphreys, M.A. and F.J. Nicol, *Outdoor Temperature and Indoor Thermal Comfort: Raising the Precision of the Relationship for the 1998 ASHRAE Database of Field Studies*. ASHRAE Transactions 106, 2000.
15. Panayiotopoulos T., Zabakolas D., Maras D., Blatsis I., *Incorporating logic programming techniques for improving the thermal comfort of a building*. Engineering Laboratory Department of Informatics, University of Piraeus. Greece 2003.