

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

C. Buratti¹, P. Ricciardi², C. Simoncini¹

¹CIRIAF, Sez. Fisica Tecnica e Inquinamento Ambientale, Università di Perugia, Via Duranti 67, 06125 Perugia

²CIRIAF, Sez. Inquinamento Acustico e da Emissioni Gassose, Università di Pavia, Via Ferrata 1, 27100 Pavia

SOMMARIO

La UNI EN ISO 7730, relativa alle condizioni di benessere termoigrometrico in ambienti termici moderati, si basa su un modello statico che vede gli occupanti di un ambiente come soggetti passivi di scambio termico. Negli ultimi anni si stanno sviluppando modelli adattivi, nei quali l'occupante di un edificio interagisce a tutti i livelli con l'ambiente; l'attuale revisione della UNI EN ISO 7730, poiché nessuno dei modelli adattivi proposti in Letteratura ha trovato conferme e consensi, si occupa dell'adattamento solo in modo generico ed informativo.

Nel presente lavoro è stato elaborato un questionario a risposta multipla, 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. Il questionario è stato utilizzato in una campagna sperimentale svoltasi presso due aule della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia e presso un'aula della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pavia. Contestualmente si è effettuato il monitoraggio delle condizioni termoigrometriche, con strumentazione specifica adatta allo scopo ed in grado di calcolare i principali indici del benessere. I dati rilevati mediante i questionari e le strumentazioni sono stati confrontati tra di loro; inoltre i dati utili ai fini dell'applicazione dei modelli adattivi sono stati elaborati secondo l'approccio statistico suggerito dalle recenti normative in materia.

INTRODUZIONE

Il livello di qualità della vita si sta avviando verso standard sempre più elevati, pertanto richiede la definizione estremamente puntuale dei requisiti microclimatici atti a garantire, negli spazi in cui l'uomo vive e lavora, condizioni di benessere termoigrometrico sia globale sia locale.

La sensazione di benessere è strettamente legata alla produzione di calore metabolico, allo scambio di energia con l'ambiente ed alle conseguenti variazioni fisiologiche e di temperatura del corpo.

Nel campo degli ambienti moderati le Norme Internazionali ASHRAE Standard 55/1992 [1] e ISO 7730/1994 [2] forniscono i limiti e le raccomandazioni a cui attenersi affinché si ottengano le condizioni di benessere.

La UNI EN ISO 7730, relativa alle condizioni di benessere termoigrometrico in ambienti termici moderati, si basa su un modello statico che vede gli occupanti di un ambiente come soggetti passivi di scambio termico. Negli ultimi anni si stanno sviluppando modelli adattivi, nei quali l'occupante di un edificio interagisce a tutti i livelli con l'ambiente, attraverso azioni che gli consentono di creare le condizioni per il raggiungimento della soddisfazione dei confronti del microclima, attuando un processo di adattamento che consiste in una graduale diminuzione delle reazioni individuali agli stimoli ambientali.

L'introduzione della ISO-DIS 7730/2003 [3], revisione della normativa vigente, suggerisce di suddividere gli ambienti termici in più categorie, distinguendo più condizioni limite di accettabilità. Tuttavia, poiché nessuno dei modelli adattivi proposti in Letteratura ha trovato conferme e consensi, la revisione si occupa dell'adattamento solo in modo generico ed informativo. Numerosi studi e ricerche sono pertanto attualmente in corso, a supporto dei modelli adattivi, al fine di

poter tradurre in indici quantitativi le azioni che il soggetto può mettere in atto per migliorare le proprie condizioni di comfort.

Scopo del presente lavoro è la valutazione delle condizioni di benessere termoigrometrico in aule universitarie; esso si colloca nella fase di messa a punto della metodologia di indagine e comprende una prima fase sperimentale relativa a rilievi effettuati nella stagione autunnale e invernale.

Gli ambienti termici esaminati sono costituiti da tre aule universitarie:

- Aula F della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia – sede di Perugia (denominata Aula 1);
- Aula 2 della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia – sede di Terni (denominata Aula 2);
- Aula 8 della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pavia – sede di Pavia (denominata Aula 3).

Le aule, differenti per caratteristiche architettoniche, dimensioni, capienza e tipologia degli impianti presenti, sono state interessate dallo studio nella stagione autunnale e in quella invernale, rispettivamente a fine novembre, a febbraio e a marzo. I risultati sono stati correlati in ogni caso alle condizioni climatiche esterne.

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.

Inoltre si è effettuato un rilievo della sensazione di benessere all'interno degli ambienti attraverso la distribuzione di questionari, appositamente elaborati, agli occupanti. Il questionario contiene informazioni sulla risposta soggettiva alle condizioni termiche dell'ambiente da vari punti di vista: sensazione termica, comfort, preferenza termica, accettabilità,

tollerabilità, possibilità di un controllo individuale del microclima, soddisfazione riguardo al controllo individuale e uso dei diversi meccanismi di controllo del microclima. Esso consente pertanto di studiare gli aspetti comportamentali dell'interazione uomo - ambiente termico anche secondo l'approccio adattivo.

I risultati dei questionari sono stati analizzati in accordo con quanto previsto dalla UNI-EN-ISO 10551/2001 [4] e confrontati con i risultati dei rilievi microclimatici.

CAMPAGNA SPERIMENTALE

Il nuovo modello adattivo

Come è noto, il settore degli ambienti termici è regolato ormai in quasi tutti i suoi aspetti da una serie di norme internazionali; in particolare, per gli ambienti termici moderati la norma più importante è la UNI-EN-ISO 7730/1994 [2], che definisce gli indici di comfort PMV e PPD, ma altrettanto nota ed utilizzata, pur essendo uno Standard Nazionale, è la ASHRAE Standard 55/1992 [1], che definisce gli intervalli di variabilità delle condizioni termoigrometriche ottimali per il benessere.

Queste due norme sono attualmente in fase di revisione e il dibattito sulle nuove versioni è vivace, in quanto alcune delle modifiche proposte sono importanti: ad esempio, nella ISO/DIS 7730/2003 [3] sono introdotte le classi di accettabilità e i concetti di isolamento termico dinamico dell'abbigliamento e di adattamento, mentre nella ASHRAE Standard 55/2004 [4] scompare l'indice ET^* (temperatura effettiva corretta), che viene sostituito dagli indici PMV e PPD, il cui calcolo costituisce un metodo di valutazione analitica che va ad affiancarsi a quello grafico, già presente nella versione del 1992, e a quello, nuovo, degli spazi naturalmente ventilati.

La norma UNI-EN-ISO 7730/1994 è basata su un modello che vede le persone all'interno degli ambienti come soggetti passivi di scambio termico e prescrive temperature ottimali pressoché costanti, a parità dei valori di sei variabili indipendenti (temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria, temperatura media radiante, isolamento termico del vestiario, livello di attività metabolica).

Negli ultimi anni molti ricercatori hanno iniziato a mettere in dubbio la validità di questo tipo di impostazione, che non tiene conto di importanti fattori come quelli climatici, culturali, sociali e contestuali, ed hanno introdotto il concetto di *adattamento*, che spiega come il contesto e la storia termica di ciascun soggetto possano modificare le aspettative e le preferenze termiche degli occupanti (Brager e de Dear 1998 [5], Humphreys e Nicol 1998 [6], Corgnati e Fracastoro 2002 [7]).

Nel modello adattivo l'occupante di un edificio non è più semplicemente inteso come un soggetto passivo, così come appariva nel modello statico, ma come un agente attivo che interagisce a tutti i livelli con l'ambiente in cui soggiorna.

Il modello adattivo introduce quindi algoritmi di controllo e di risposta che permettono di migliorare il livello di comfort termico degli occupanti e di ridurre il consumo di energia. Alla base del modello di comfort adattivo c'è la convinzione che il soggetto, consciamente o inconsciamente, svolge un ruolo attivo nella creazione delle condizioni termiche che preferisce e che, per raggiungere più facilmente la soddisfazione nei confronti del microclima, attua un processo di adattamento,

definito come quel processo di graduale diminuzione delle reazioni individuali agli stimoli ambientali.

Si distinguono tre tipi di adattamento:

- *comportamentale*: complesso dei cambiamenti che una persona mette in atto, consciamente o no, per modificare i parametri che regolano il bilancio termico del corpo; può essere suddiviso in personale, tecnologico e culturale;
- *fisiologico*: l'esposizione prolungata a date condizioni riduce lo stress; nelle condizioni tipiche degli ambienti moderati questo tipo di adattamento ha un'influenza trascurabile sulla percezione del comfort;
- *psicologico*: le esperienze pregresse e le aspettative modificano la percezione degli stimoli sensoriali e la reazione ad essi.

L'analisi dei dati statistici di de Dear e Brager (1998) [5] porta a ritenere che, tra i tre meccanismi di adattamento quello comportamentale fornisce alle persone un ruolo attivo nel mantenimento del proprio comfort, proprio perché direttamente legato al bilancio termico del corpo umano.

I ricercatori che stanno studiando il modello adattivo hanno talvolta proposto delle relazioni per le valutazioni ambientali. In particolare è stato proposto un modello che comporta una temperatura ottimale variabile, legata alle condizioni meteorologiche esterne, che tiene conto delle esperienze termiche pregresse e delle attuali aspettative degli occupanti (Brager e de Dear 2000) [8].

In ogni caso nessuno dei modelli proposti ha ancora trovato conferme e consensi, ed è il motivo per cui la ISO/DIS 7730/2003 si occupa dell'adattamento solo in modo qualitativo.

Questionario

Il questionario utilizzato nella campagna sperimentale è stato elaborato a partire da quello contenuto nella norma UNI-EN-ISO 10551 [4]; esso è stato integrato con ulteriori domande connesse alle opportunità per gli occupanti di fare uso di controlli del loro intorno termico e della soddisfazione derivante da ciò, per valutare l'influenza dell'aspetto comportamentale nell'adattamento personale all'ambiente termico. Esso analizza l'ambiente da vari punti di vista:

- sensazione termica;
 - comfort;
 - preferenza termica;
 - accettabilità;
 - tollerabilità;
 - possibilità di un controllo individuale del microclima;
 - soddisfazione riguardo al controllo individuale;
 - uso dei diversi meccanismi di controllo del microclima.
- Il questionario, a risposta multipla, risulta composto di 3 parti:
- Parte prima: dati personali (età; sesso);
 - Parte seconda: questionario termico (attività svolta negli ultimi 10, 20, 30 e 60 minuti; composizione dell'abbigliamento; sensazione termica; giudizio sulla tollerabilità dell'ambiente termico, del movimento dell'aria, della differenza di temperatura tra testa e caviglie; eventuale preferenza per condizioni diverse);
 - Parte terza: controlli ambientali personali (possibilità di intervenire sulle condizioni microclimatiche dell'ambiente attraverso l'apertura di porte e finestre, la regolazione dell'impianto ecc. e relativa soddisfazione per le possibilità di intervento; posizione orientativa all'interno dell'aula, da indicare su apposita piantina).

Strumentazione

I rilievi strumentali sono stati effettuati mediante due stazioni di rilevamento:

- stazione BABUC della LSI;
- stazione HSA DGT della TCR Tecora.

La linea strumentale BABUC si compone di un multiacquisitore a 11 canali con memoria di 20.000 campioni (64 kb), denominato BABUC A (fig. 1). Il sistema, in grado di riconoscere automaticamente il sensore connesso e di accogliere in qualunque ingresso qualsiasi sensore della gamma BABUC, può essere programmato in cicli di misura. Ad esso sono state connesse le seguenti sonde:

- sonda per la misura della temperatura dell'aria (accuratezza $\pm 0,17^\circ\text{C}$);
- sonda anemometrica a filo caldo, per misure della velocità media dell'aria e di intensità di turbolenza (accuratezza ± 5 cm per v_a comprese tra $0 \div 0,5$ m/s, ± 10 cm per v_a comprese tra $0,5 \div 1,5$ m/s e 4% per $v_a > 1,5$ m/s);
- sonda psicrometrica a ventilazione forzata (accuratezza sulla temperatura $\pm 0,13^\circ\text{C}$, sull'umidità relativa $\pm 2\%$);
- sonda globotermometrica in rame nero opaco (riflessione $< 2\%$), di 15 cm di diametro, per la misura della temperatura media radiante (accuratezza $\pm 0,17^\circ\text{C}$);
- sonda barometrica assoluta (accuratezza ± 1 hPa);
- sonda doppia di temperatura (temperatura superficiale del pavimento e dell'aria a 10 cm dal suolo, accuratezza $\pm 0,17^\circ\text{C}$); consente di ottenere la percentuale di insoddisfatti per la temperatura del pavimento, la percentuale di insoddisfatti per il gradiente termico verticale (quando è abbinata ad una sonda di temperatura dell'aria a 1,1 m dal suolo) (UNI-EN-ISO 7730);
- sonda per la misura della radiazione netta (accuratezza $\pm 3\%$); consente di ottenere la temperatura asimmetrica radiante, la percentuale di insoddisfatti da asimmetria radiante, la radiazione netta e la temperatura della termopila, ossia del sensore nero del radiometro;
- sonda per la misura della concentrazione di anidride carbonica (accuratezza ± 3 p.p.m. nell'intervallo $0 - 3000$ p.p.m.).



Figura 1: Centraline microclimatiche BABUC A.

La centralina microclimatica HSA DGT (fig. 2) della TCR – TECORA è dotata di quattro sonde standard e tre ingressi opzionali:

- psicrometro a ventilazione forzata: incorpora due sensori standardizzati al platino per la misura della temperatura

secca e umida a ventilazione forzata (accuratezza sulla temperatura $\pm 0,18^\circ\text{C}$, accuratezza sull'umidità relativa $\pm 3\%$);

- anemometro: a filo caldo (accuratezza ± 5 cm per v_a comprese tra $0 \div 0,5$ m/s, ± 10 cm per v_a comprese tra $0,5 \div 1,5$ m/s, 4% per $v_a > 1,5$ m/s);
- globotermometro: sfera di rame sottile del diametro di 15 cm, verniciata esternamente di nero opaco, con all'interno una termoresistenza standardizzata al platino (accuratezza $\pm 0,17^\circ\text{C}$);
- temperatura umida naturalmente ventilata: sensore di temperatura standardizzato al platino mantenuto umido da una calza di cotone (accuratezza sulla temperatura $\pm 0,20^\circ\text{C}$, accuratezza sull'umidità relativa $\pm 3\%$).



Figura 2: Centralina microclimatica HSA DGT.

Metodologia di misura

I rilievi sono stati effettuati in tre aule differenti per collocazione geografica, tipologia, caratteristiche architettoniche, tipologia degli impianti presenti; le principali caratteristiche delle aule oggetto di studio e i dati sui rilevamenti sono riportati in tab. 1.

Le misure sono state effettuate in più postazioni all'interno delle aule, al fine di valutare l'uniformità delle condizioni termoisometriche dell'ambiente. In fig. 3 e 4 sono riportate la pianta e una foto dell'aula 1, con le postazioni delle strumentazioni di misura:

- postazione 1 e 2 per la centralina microclimatica BABUC;
- postazione 3 per la centralina microclimatica HSA DGT.

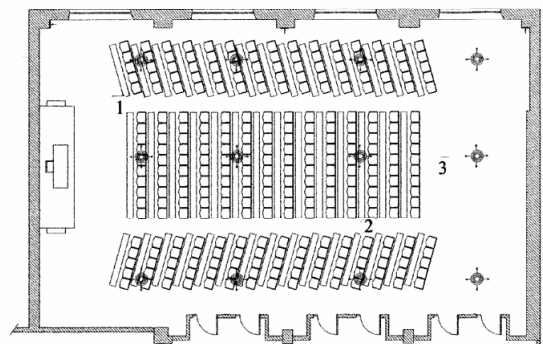


Figura 3 Pianta aula 1 con le postazioni di misura (1, 2 e 3).



Fig. 4: Aula 1 durante i rilievi

In fig. 5 e 6 sono riportate la pianta e una foto dell'aula 2, con le postazioni delle strumentazioni di misura:

- postazione 1 per la centralina microclimatica BABUC;
- postazione 2 per la centralina microclimatica HSA DGT.

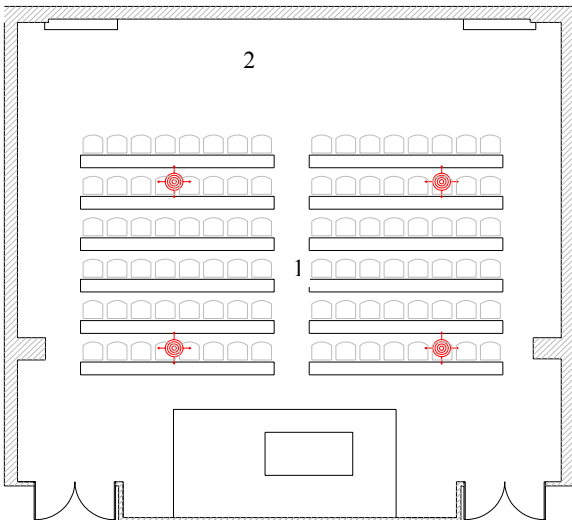


Figura 5: Pianta aula 2 con le postazioni di misura (1 e 2).



Fig. 6: Aula 2 durante i rilievi

In fig. 7 e 8 sono riportate la pianta e una foto dell'aula 3, con le postazioni delle strumentazioni di misura:

- postazione 1, 2 e 3 per la centralina microclimatica BABUC;
- postazione 4 per la centralina microclimatica HSA DGT.

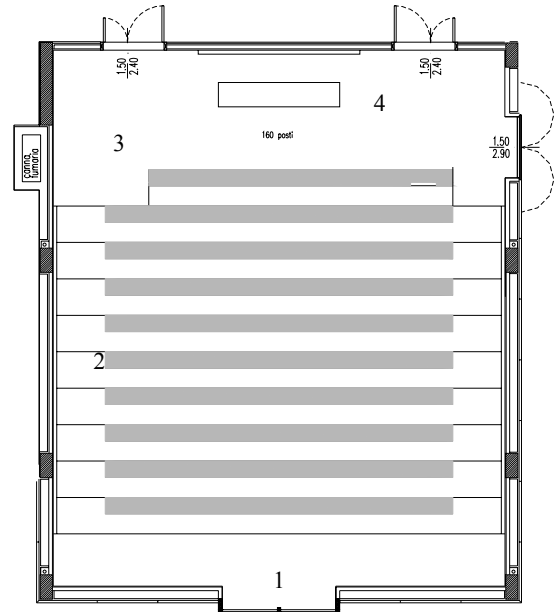


Figura 7: Pianta aula 3 con postazioni di misura (1, 2, 3, 4).



Fig. 8: Aula 3 durante i rilievi

La scelta dei punti di misura ha tenuto conto dei seguenti fattori:

- disposizione degli studenti nell'aula: le strumentazioni sono state collocate in prossimità delle aree più affollate;
- presenza di superfici verticali fredde o calde quali le aperture;
- facilità collocazione della strumentazione.

Sia l'inizio dei rilievi che la distribuzione del questionario sono avvenuti dopo un intervallo di tempo di almeno 30 minuti, necessario agli occupanti per adattarsi alle condizioni climatiche esistenti. Ciascun rilievo effettuato nello stesso giorno è composto di più sotto-rilievi, effettuati in postazioni e tempi diversi.

Dato l'elevato numero di sonde utilizzate nel rilievo, è stato necessario impiegare due centraline BABUC/A perfettamente identiche.

Tab. 1: Caratteristiche delle aule e dati sui rilevamenti.

	Aula 1	Aula 2	Aula 3
Ubicazione	Perugia	Terni	Pavia
Capienza (posti)	300	96	160
Finestre	si	no	si
Gradinata	no	no	si
Impianto	a tutt'aria	misto	a tutt'aria
Numero rilievi	3	3	2
Periodo rilievi	autunno (nov. – dic. 04)	inverno (feb.– mar. 04)	inverno (mar. 04)
Questionari totali	349	52	169

Si sono misurate le seguenti grandezze:

- temperatura di bulbo secco;
- temperatura di bulbo umido;
- velocità dell'aria;
- temperatura del globotermometro;
- pressione atmosferica;
- temperatura dell'aria a livello del collo (1,10 metri dal suolo);
- temperatura dell'aria a livello delle caviglie (0,1 m dal suolo);
- temperatura del pavimento;
- temperatura radiante asimmetrica;
- concentrazione di anidride carbonica.

Attraverso tali grandezze si sono calcolati:

- umidità relativa dell'aria;
- temperatura media radiante;
- temperatura operativa;
- PMV (voto medio previsto);
- PPD (percentuale prevista di insoddisfatti);
- intensità della turbolenza;
- PPD per gradiente termico verticale;
- PPD per temperatura del pavimento;
- PPD per asimmetria radiante;
- PPD per correnti d'aria.

Ogni giorno di misura in aula è stato accompagnato da una misura in esterno, effettuata tramite la centralina BABUC/A; si sono misurate le seguenti grandezze:

- temperatura dell'aria;
- umidità relativa dell'aria;
- concentrazione di anidride carbonica nell'aria;
- pressione atmosferica.

RISULTATI

Misure

Una sintesi dei risultati delle misure effettuate nelle aule è riportata in Tab. 2: sono indicati i valori medi misurati durante ciascun rilievo e i valori medi globali relativi a ciascuna aula delle principali grandezze utili ai fini della valutazione delle condizioni di benessere.

Per ragioni di brevità si sono riportate le grandezze relative al comfort globale all'interno dell'ambiente; si sono invece omessi i risultati relativi alle possibili cause di discomfort locale (gradiente termico verticale, temperatura del pavimento, asimmetria radiante, correnti d'aria). Ad un primo esame, infatti (i risultati sono ancora in fase di elaborazione), non si sono riscontrati valori troppo elevati della PPD per tali parametri. Essi tuttavia costituiranno analisi approfondita per successivi lavori, che potranno essere completati quando i rilievi copriranno le diverse stagioni.

Dai dati riportati in tab. 2 si evince che:

Tab. 2: sintesi dei risultati dei rilievi effettuati nelle aule.

	Rilievo	Aula 1	Aula 2	Aula 3
T _{est} (°C)	1	-	5,2	6,0
	2	-	4,7	9,7
	3	12,2	8,8	-
UR _{est} (%)	1	71	62	47
	2	96	98	29
	3	91	50	-
T (°C)	1	22,5	21,2	22,6
	2	24,1	24,8	21,7
	3	24,2	20,9	-
UR (%)	1	50	63	30
	2	45	53	26
	3	49	60	-
T _{mr} (°C)	1	23,6	20,9	24,0
	2	24,0	22,9	19,9
	3	25,2	20,3	-
v _a (m/s)	1	0,090	0,004	0,059
	2	0,016	0,006	0,081
	3	0,033	0,012	-
M (W/m ²) U	1	72	72	72
	2	72	72	72
	3	72	72	-
Icl (clo) U	1	1,48	1,10	0,81
	2	1,29	0,73	0,77
	3	1,22	0,72	-
M (W/m ²) D	1	69	69	69
	2	69	69	69
	3	69	69	-
Icl (clo) D	1	1,45	0,28	0,88
	2	1,40	0,73	0,74
	3	1,30	0,81	-
PMV U	1	0,11	0,03	-0,01
	2	0,39	0,31	-0,70
	3	0,45	-0,54	-
PMV D	1	-0,02	-0,40	0,01
	2	0,39	0,23	-0,87
	3	0,41	-0,48	-
PPD ₁ U (%)	1	5,4	6,2	6,1
	2	8,5	7,8	16,3
	3	11,0	11,2	-
PPD ₂ U (%)	1	5,2	6,3	6,4
	2	8,1	7,6	18,1
	3	10,4	11,8	-
PPD ₁ D (%)	1	5,3	5,4	6,1
	2	8,4	7,0	21,9
	3	10,1	9,8	-
PPD ₂ D (%)	1	5,4	5,7	6,2
	2	8,2	7,0	24,1
	3	9,9	10,0	-

- la temperatura dell'aria risulta negli intervalli raccomandati;
- l'umidità relativa dell'aria assume valori ottimali nelle aule 1 e 2, mentre risulta troppo bassa nell'aula 3;
- la temperatura media radiante è prossima alla temperatura dell'aria, pertanto non si riscontra un'influenza significativa

- delle superfici radianti;
- la velocità dell'aria è sempre molto contenuta e comunque al di sotto dei limiti massimi consigliati;
- il PMV, sia per gli uomini che per le donne, risulta sempre compreso nell'intervallo $-0.5 \div +0.5$, con valori della PPD inferiori al 10% per le Aule 1 e 2; la PPD relativa all'Aula 3 è compresa tra il 10 e il 15%, pur essendo il PMV medio compreso nell'intervallo $-0.5 \div +0.5$. Ciò è dovuto al fatto che la media del PMV deriva da risultati esterni a detto intervallo, perciò la PPD supera il 10%.

Questionari

Nell'elaborazione dei questionari, i parametri ai quali si è fatto riferimento sono i seguenti:

- età media dei soggetti;
- voto medio previsto (PMV);
- dispersione intorno al valor medio del PMV;
- indice di insoddisfazione termica (%): definito dal rapporto tra persone insoddisfatte / persone che hanno espresso un giudizio (è valutato come la percentuale di persone che hanno risposto *leggero fastidio, fastidio, molto fastidio*, alla domanda (“*questa sensazione ti procura uno stato di...*”));
- indice di preferenza termica (%): definito dal rapporto tra persone che vogliono cambiare / persone che hanno espresso un giudizio (è valutato come la percentuale di persone che hanno risposto *molto più freddo, più freddo, un po' più freddo, un po' più caldo, più caldo, molto più caldo* alla domanda (“*in questo momento vorresti avere....*”));
- indice di inaccettabilità termica (%): definito dal rapporto tra persone che lo ritengono inaccettabile / persone che hanno espresso un giudizio (è valutato come la percentuale di persone che hanno risposto *no, non è accettabile* alla domanda (“*considerando soltanto le tue personali preferenze, questo ambiente, dal punto di vista termico, è accettabile o inaccettabile?*”));
- indice di fastidio termico (%): definito dal rapporto tra persone che non lo tollerano / persone che hanno espresso un giudizio (è valutato come la percentuale di persone che hanno risposto *un po' difficile da tollerare, abbastanza difficile da tollerare, molto difficile da tollerare, intollerabile* alla domanda (“*secondo te questo ambiente è...*”));
- indice di inaccettabilità per il movimento dell'aria (%): definito dal rapporto tra persone che hanno espresso un giudizio negativo / persone che hanno espresso un giudizio (è valutato come la percentuale di persone che hanno risposto *completamente inaccettabile, leggermente inaccettabile, inaccettabile*, alla domanda (“*il movimento dell'aria in questo momento è...*”));
- indice di inaccettabilità per il gradiente termico verticale (%): definito dal rapporto tra persone che hanno espresso un giudizio negativo / persone che hanno espresso un giudizio (è valutato come la percentuale di persone che hanno risposto *completamente inaccettabile, leggermente inaccettabile, inaccettabile* alla domanda (“*ritieni la differenza di temperatura tra testa e caviglie...*”));
- indice di preferenza per il gradiente termico verticale (%): definito dal rapporto tra persone che vogliono cambiare / persone che hanno espresso un giudizio (è valutato come la percentuale di persone che hanno risposto *minore, maggiore* alla domanda (“*preferiresti una differenza di temperatura tra testa e caviglie...*”));

- indice di insoddisfazione per il controllo ambientale (%): persone che hanno espresso un giudizio negativo / persone che hanno espresso un giudizio (è valutato come la percentuale di persone che hanno risposto *molto insoddisfatto, insoddisfatto, leggermente insoddisfatto*, alla domanda (“*nei confronti delle possibilità che ti vengono offerte, ti ritieni?*”));

Una sintesi dei risultati è riportata in tab. 3. Da essi si evince che:

- gli occupanti avvertono una sensazione termica spostata verso il leggero caldo;
- gli elevati valori degli indici termici di insoddisfazione, preferenza e fastidio sottolineano come sia difficile sopportare le condizioni termiche esistenti;
- lo scarso movimento dell'aria aggrava ulteriormente il disagio dei presenti, specialmente nell'Aula 2;
- a parte l'Aula 2, il gradiente termico verticale non presenta percentuali di insoddisfatti troppo elevate;
- relativamente ai controlli ambientali a disposizione degli utenti, la maggior parte dei presenti, soprattutto nelle Aule 2 e 3, presenta un'elevata insoddisfazione.

Sulla base dei risultati fin qui elaborati, sebbene parziali, si può concludere che l'Aula 2 è quella rispetto alla quale gli occupanti presentano globalmente un maggiore grado di insoddisfazione; ciò è probabilmente legato alla sensazione psicologica derivante loro dall'assenza di finestre.

CONCLUSIONI

Il benessere termoigrometrico negli ambienti confinati è regolamentato dalla UNI-EN-ISO 7730/1994; la norma, attualmente in revisione, è in procinto di essere sostituita dalla ISO-DIS 7730/2003, che introduce 3 categorie di ambienti con diversi criteri di valutazione del comfort. Questa modifica è sicuramente opportuna, in quanto aumenta la possibilità di rispondere alle diverse esigenze dell'utenza.

Il progetto di norma ISO-DIS 7730/2003 non ha comportato modifiche strutturali alle procedure di valutazione degli ambienti termici moderati normalmente in uso; tuttavia, sebbene in modo qualitativo, introduce l'approccio adattivo, nel quale il soggetto interagisce a tutti i livelli con l'ambiente, attraverso azioni che gli consentono di creare le condizioni per il raggiungimento della soddisfazione dei confronti del microclima (possibilità di intervenire sulle condizioni microclimatiche dell'ambiente attraverso l'apertura di porte e finestre, la regolazione dell'impianto e relativa soddisfazione per le possibilità di intervento).

Nel lavoro sono presentati i primi risultati di una campagna sperimentale effettuata presso alcune aule delle Università di Perugia e di Pavia, 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.

Pertanto si sono effettuati i rilievi delle principali grandezze ambientali ed i calcoli dei relativi indici del benessere in tre aule differenti per collocazione geografica, tipologia, caratteristiche architettoniche, tipologia degli impianti presenti; inoltre, per tener conto dell'approccio adattivo, si è elaborato un questionario di concezione originale per la valutazione dell'ambiente termico direttamente da parte degli occupanti.

Nelle tre Aule oggetto di studio sono stati distribuiti e compilati complessivamente 570 questionari; i risultati

derivanti dalla loro elaborazione sono stati confrontati con quelli ottenuti attraverso i rilievi strumentali.

Tabella 3: Sintesi dei parametri più significativi ottenuti dall'analisi dei questionari

	Rilievo	Aula 1		Aula 2		Aula 3	
n. questionari	1	137	349	17	52	108	169
	2	89		24		61	
	3	123		11		-	
età soggetti	1	20,0	20,0	22,0	22,0	20,0	20,0
	2	20,0		22,0		20,0	
	3	20,0		23,0		-	
PMV	1	0,34	0,59	-0,06	0,55	0,69	0,35
	2	0,33		1,63		0,02	
	3	1,10		0,09		-	
Scost. PMV	1	0,44	0,96	0,76	1,08	0,95	0,91
	2	0,60		1,32		0,87	
	3	0,80		1,17		-	
Insodd. Term. (%)	1	33,6	44,23	82,4	69,2	61,1	51,05
	2	34,8		70,8		41,0	
	3	64,3		54,5		-	
Prefer. termica (%)	1	47,4	54,73	76,5	70,0	67,6	55,1
	2	43,8		79,2		42,6	
	3	73,0		54,5		-	
Inacc. termica (%)	1	11,7	12,7	41,2	43,4	27,8	19,65
	2	9,0		70,8		11,5	
	3	17,4		18,2		-	
Fast. termico (%)	1	38,7	42,0	82,4	79,2	54,6	43,7
	2	36,0		91,7		32,8	
	3	51,3		63,6		-	
Inacc. v _a (%)	1	32,8	39,5	76,5	83,1	56,5	52,85
	2	29,2		100,0		49,2	
	3	56,5		72,7		-	
Inacc. GTV (%)	1	28,5	25,1	64,7	64,7	32,4	30,15
	2	22,5		75,0		27,9	
	3	24,3		54,5		-	
prefer. GTV (%)	1	40,1	35,9	88,2	77,0	39,8	35,45
	2	38,2		79,2		31,1	
	3	29,6		63,6		-	
Ins. cont. amb. (%)	1	40,9	45,53	94,1	87,5	69,4	75,7
	2	46,1		95,8		82,0	
	3	49,6		72,7		-	

I risultati mostrano che, sebbene sulla base delle misure effettuate i parametri rientrano quasi sempre negli intervalli consigliati dalla normativa, i questionari evidenziano condizioni più critiche. Infatti, spesso, nonostante i valori degli indici di comfort rientrino nei limiti da normativa, solo una modesta percentuale di occupanti si trova a proprio agio con l'intorno termico ed i giudizi espressi dai soggetti interessati amplificano la situazione di leggero caldo presente mediamente in tutti i casi esaminati. Questa discrepanza è in parte dovuta alla scarsa possibilità da parte degli occupanti di intervenire sulle condizioni dell'ambiente, in parte allo scarso movimento dell'aria, cui è correlata anche l'insoddisfazione per il gradiente termico verticale.

La distinzione fra persone di sesso maschile e femminile non ha portato a risultati significativi, ma si evidenzia come

per le donne, avendo un metabolismo leggermente più basso, sia più facile sopportare le condizioni di leggero caldo dell'ambiente.

In conclusione, sulla base dei risultati fin qui elaborati, si può concludere che i fattori psicologici influenzano notevolmente il giudizio degli occupanti; infatti i valori massimi dei parametri che descrivono il grado di insoddisfazione sono stati rilevati nell'Aula 2, che è caratterizzata dall'assenza di finestre.

Considerazioni conclusive più esaustive potranno essere tratte al termine della campagna di misure, che coinvolgerà un numero maggiore di aule e sarà estesa anche alle altre stagioni dell'anno.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori intendono ringraziare il prof. Francesco Fantozzi per aver consentito l'effettuazione delle prove in Aula 2 durante le sue lezioni.

NOMENCLATURA

D = donne;
ET* = temperatura effettiva corretta (°C);
GTV = gradiente termico verticale;
I_{cl} = isolamento termico del vestiario (clo, m²K/W);
M = metabolismo (met, W/m²);
PPD = percentuale prevista di insoddisfatti (%);
PMV = voto medio previsto;
T = temperatura (°C);
U = uomini;
UR = umidità relativa (%);
v = velocità (m/s).

Pedici:

a = aria;
est = esterno;
mr = media radiante;
1 = calcoli effettuati ai sensi della UNI EN ISO 7730/94;
2 = calcoli effettuati ai sensi della ISO DIS 7730/2003.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ASHRAE, "Thermal environment conditions of human occupancy – ASHRAE Standard 55-92", American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Ga., USA, 1992.
- ISO, 2003. Ergonomics of thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort. ISO/DIS 7730. Geneva: International Standardization Organization, 2003.
- UNI-EN-ISO 10551– Ergonomia degli ambienti termici – Valutazione dell'influenza dell'ambiente termico mediante scale di giudizio soggettive. Gennaio 2002.
- de Dear R.J., Brager G.S., 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. ASHRAE Transactions, 104 (1A), 145-167.
- Humphreys M.A., Nicol J.F., 1998. Understanding the adaptive approach to thermal comfort. ASHRAE Transactions, 104 (1B), 991 - 1004.
- Cornati S.P., Fracastoro G.V., 2002. Linee guida per la modellazione di grandi serre. CdA, XLV (3), 54-63.

7. de Dear R.J., Brager G.S., 2000. A standard for natural ventilation. *ASHRAE J.*, 42 (10), 21-28.
8. ASHRAE, 2004. "Thermal Environment Conditions for Human Occupancy – ASHRAE Standard 55/2004". Geneva, 2003.
9. ISO, Evaluation of thermal strain by physiological measurements, ISO Standard 9886, Geneva, International Standardization Organization, 1992.
10. UNI, "Ergonomia – Determinazione della produzione di energia termica metabolica", Norma UNI-EN 28996, Unificazione Italiana, Milano, 1995.
11. UNI, "Ambienti termici – Strumenti e metodi per la misura delle grandezze fisiche", Norma UNI-EN 27726, Unificazione Italiana, Milano, 1996.
12. ISO, "Ergonomics of the thermal environment – Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble", ISO Standard 9920, International Standardization Organization, Geneva (Svizzera), 1995.
13. UNI, "Ambienti termici – Strumenti e metodi per la misura delle grandezze fisiche", Norma UNI-EN 27726, Unificazione Italiana, Milano, 1996.
14. UNI-EN-ISO 9920 – Ergonomia degli ambienti termici – Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativi dell'abbigliamento. Marzo 2004.
15. UNI-EN 28996 – Ergonomia – Determinazione della produzione di energia termica metabolica. Maggio 1996.
16. ASHRAE Standard 62.1/2004 – Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
17. FANGER P.O., *Thermal comfort*, McGraw Hill, New York, 1970.
18. NEVINS R.G., DARWISH M.A., "Heat transfer through corporea", in "Trattato di fisiologia medica di Mountcastle, seconda edizione, vol. 2, cap.56, pp. 1527-1570, Piccin, Padova, 1977.
19. GAGGE A.P., STOLWIJK J.A.J., Nishi Y., "An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response", *ASHRAE Transactions*, 77(1), American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Ga., USA, 1971.
20. OLESEN B.W., "Thermal comfort requirements for floors", Proc. Of Meeting of IIR, Belgrade, 1977.
21. VOGT J.J., METZ B., "Ambiente termico", in *Manuale di fisiologia del lavoro* (Scherrer e coll. Eds.), cap. 7, pp. 183-222, Masson, Milano, 1984.
22. OLESEN B.W., "Local thermal discomfort", *Bruel and Kjaer Technical Review*, n.1, pp. 3-41, 1985.
23. ALFANO G., D'AMBROSIO F.R., "La misura della resistenza termica conduttiva equivalente dell'abbigliamento", *Condizionamento dell'aria, riscaldamento, refrigerazione*, n. 30, pp. 109-119, 1986.
24. FANGER O.P., "The PMV index and the international comfort standard, Practical application", Proc. Of AICARR seminar on thermal comfort and the controlled environment, Naples, Marzo 1986.
25. ASHRAE Handbook, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Ga., USA, 1993.
26. McCullough E.A., Olesen B.W., Hong S., 1995. Thermal insulation provided by chairs. *ASHRAE Transactions*, 110 (1), 795-802.
27. Havenith G., Holmer I., 2002. Calculation of dynamic heat and vapour resistance. *Proceedings of Environmental Ergonomics IX*.
28. Fisher, R.A (1973). "*Statistical methods for research workers*" (14th edition). New York.
29. Siegel, S. e Castellan, N.J.. "*Statistica non Parametrica*", seconda edizione, McGraw-Hill Libri Italia, Milano, 1979.
30. Lamberto Soliani *Manuale di statistica*, Università di Parma, edizione novembre 2004.