

COMFORT TERMOIGROMETRICO IN AMBIENTI INTERNI: CORRELAZIONI TRA VALORI SPERIMENTALI E MODELLI MATEMATICI

Cinzia Buratti*, Paola Ricciardi**, Nicola Sisti*, Marco Vergoni*

* Dipartimento di Ingegneria Industriale - Sezione di Fisica Tecnica - Università degli Studi di Perugia

**Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale - Università degli Studi di Pavia

SOMMARIO

L'analisi delle condizioni di comfort termoigrometrico all'interno di alcune aule universitarie, oggetto del presente studio, è stata effettuata dalla Sezione di Fisica Tecnica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Pavia. L'indagine si è basata su una vasta campagna sperimentale, già oggetto di precedenti studi, durante la quale sono stati acquisiti, per mezzo di rilievi strumentali e della compilazione di questionari da parte degli occupanti, i dati necessari al calcolo degli indici di benessere tradizionali e delle grandezze proprie del modello di Wray, il quale, partendo dall'equazione di Fanger introduce un nuovo indice termico, denominato Temperatura Equivalente Uniforme. Analizzando i dati ottenuti si sono messe in relazione le coppie di parametri: voto medio previsto meno la differenza tra la temperatura equivalente uniforme e la temperatura uniforme di comfort e la percentuale prevista degli insoddisfatti e la stessa differenza tra la temperatura equivalente uniforme e la temperatura uniforme di comfort, riscontrando per la prima un legame di tipo lineare, per la seconda una relazione polinomiale di secondo grado. Si sono infine confrontati i valori della Temperatura Operativa T_o e della Temperatura Equivalente Uniforme T_{eu} ottenuti per ogni singolo rilievo sperimentale, osservando una sostanziale coincidenza delle due grandezze.

1. INTRODUZIONE

La concezione di comfort termoigrometrico all'interno di ambienti confinati sta subendo un lento, ma indispensabile processo di revisione, con l'intento di trovare correlazioni il più possibile generali fra dati sperimentali e rilievi condotti secondo i nuovi modelli adattivi contenuti nella recente norma UNI EN ISO 7730:2006, nella UNI EN ISO 10551:2002 e nella norma statunitense ASHRAE Standard 55/2004 [1, 2, 3].

La Sezione di Fisica Tecnica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Pavia, è attiva da alcuni anni nello studio delle condizioni di comfort all'interno delle aule universitarie. La ricerca consiste in estese indagini sperimentali, volte al rilievo dei principali indici del benessere mediante misure delle grandezze termoigrometriche ambientali e valutazioni soggettive espresse da un numero statisticamente significativo di persone presenti all'interno degli ambienti, basate sia sui tradizionali modelli statici, sia sui modelli adattivi, di più recente introduzione [4, 5, 6].

In particolare, è stata condotta una campagna di misure che ha interessato tre diverse aule con differenti caratteristiche architettoniche, impiantistiche e di esposizione; le misure negli ambienti sono state correlate con i rilievi condotti in esterno, in diverse giornate rappresentative delle condizioni autunnali, invernali e primaverili. Contemporaneamente ai rilievi strumentali, sono stati distribuiti agli occupanti dei questionari appositamente redatti, in accordo con la norma UNI EN ISO 10551; in fase di elaborazione si sono confrontati i risultati dei rilievi con le risposte fornite dal campione di soggetti.

Il presente lavoro si propone di correlare i risultati sperimentali ottenuti nelle diverse campagne di misura sopra

menzionate con quelli ottenibili mediante modelli presenti in Letteratura. In particolare, il confronto è stato effettuato prendendo in considerazione il modello di Wray [7] il quale, partendo dall'equazione di Fanger [9], introduce un nuovo indice termico, denominato Temperatura Equivalente Uniforme. Tale indice ha la funzione di mettere in relazione le reali condizioni termoigrometriche con quelle ideali, rappresentate da un ambiente equivalente dotato di temperatura uniforme. La finalità è quella di fornire un parametro intuitivo di più rapido impiego rispetto agli indici tradizionali.

Per ciascuna giornata di misura, in corrispondenza di ogni singolo rilievo strumentale, sono stati calcolati i valori medi delle principali grandezze, correlandoli con la composizione tipica del vestiario degli occupanti e ottenendo una prima serie di valori degli indici PMV e PPD . Per gli stessi rilievi si sono calcolate, secondo il modello di Wray, le condizioni ottimali di Temperatura Uniforme (T_u) e quelle reali espresse dalla Temperatura Equivalente Uniforme (T_{eu}); lo scostamento tra i valori ottimali e quelli reali è stato confrontato con i tradizionali indici PMV e PPD , al fine di valutare la congruità dell'approccio del modello con le tradizionali procedure proposte da Fanger.

Infine, un'ulteriore correlazione è stata ricercata fra Temperatura Operativa e Temperatura Equivalente Uniforme.

2. CAMPAGNA SPERIMENTALE

I dati sui quali si basa il presente studio sono stati raccolti nel corso di una campagna di misure all'interno di aule universitarie, differenti sia per collocazione geografica che per dimensioni, capienza, tipologia degli impianti installati ed esposizione alla radiazione solare, già oggetto di precedenti

studi [4, 6].

In particolare l'indagine ha coinvolto le seguenti aule:

- Aula F della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia, sede di Perugia;
- Aula 2 della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia, sede di Terni;
- Aula 8 della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pavia, sede di Pavia.

Le misure sono state effettuate utilizzando centraline microclimatiche, durante le stagioni autunnale, invernale e primaverile comprese tra il 2004 e il 2005, rispettivamente nei mesi di novembre, febbraio e marzo, maggio e giugno. La metodologia di misura prevede l'acquisizione delle grandezze stabilite dalla UNI EN ISO 7730:2006, dalla UNI EN ISO 10551:2002 e dall'ASHRAE Standard 55/1992, attraverso le quali è possibile ricavare gli indici di benessere tradizionali, nonché definire il comfort secondo il nuovo approccio adattivo.

Contemporaneamente all'acquisizione dei dati sperimentali è stato distribuito nelle aule, per la compilazione da parte degli occupanti, un questionario, elaborato a partire dal modello contenuto nella UNI EN ISO 10551, integrato con ulteriori domande riguardo alle possibilità di azione sui controlli delle condizioni termoigrometriche interne. Esso si divide in tre parti fondamentali:

- dati personali (età, sesso);
- aspetti termici (attività svolta negli ultimi minuti, composizione dell'abbigliamento, sensazione termica, ecc.);
- controlli ambientali personali (possibilità di intervenire sulle condizioni microclimatiche dell'ambiente attraverso l'apertura o la chiusura di porte e finestre, la regolazione dell'impianto, ecc.).

Sia l'inizio dei rilievi che la distribuzione dei questionari sono avvenuti dopo circa mezz'ora dall'ingresso degli studenti all'interno delle aule, al fine di consentire il loro adattamento alle condizioni climatiche esistenti. Ciascuna giornata di misura è composta da più rilievi, effettuati in successione in postazioni diverse individuate in relazione alla disposizione degli studenti all'interno delle aule, alla presenza di superfici verticali fredde o pareti vetrate e alla facilità di collocazione della strumentazione.

Si riporta, in Tab. 1, un riepilogo delle caratteristiche delle aule e dei rilievi effettuati.

Tab. 1: caratteristiche peculiari delle aule considerate e dei rilievi effettuati.

	<i>Aula F</i>	<i>Aula 2</i>	<i>Aula 8</i>
<i>Ubicazione</i>	Perugia	Terni	Pavia
<i>Capienza</i>	300	96	160
<i>Finestre</i>	sì	no	sì
<i>Gradinata</i>	no	no	sì
<i>Impianto</i>	tutt'aria	misto	tutt'aria
<i>Giornate</i>	5	4	6
<i>Periodi rilievi</i>	autunno (nov.-dic. '04) primavera (mag. '05)	inverno (feb.-mar. '05) primavera (mag. '05)	inverno (mar. '05) primavera (mag.-giu. '05)
<i>Questionari</i>	349	52	169

Per le condizioni di comfort all'interno delle aule nel corso della campagna sperimentale, facendo riferimento alla resistenza termica media degli occupanti calcolata dai questionari, si sono ottenuti per la stagione autunnale valori molto buoni: il PMV risulta infatti sempre compreso nell'intervallo $-0.5 \div +0.5$ proprio della Categoria "B" indicata nell'Appendice A della UNI EN ISO 7730, tranne che per due rilievi del 2/12/2004, dove raggiunge valori poco al di sopra di questo limite ($PMV = 0.6$ e $PMV = 0.78$, Categoria "C"). Una situazione più o meno analoga è stata riscontrata anche nel corso della stagione invernale, durante la quale il PMV rientra all'interno degli stessi limiti, risultando poco al di fuori solo in corrispondenza di due rilievi, nelle giornate del 4/3/2005 e dell'8/3/2005 (rispettivamente $PMV = 0.64$ e $PMV = -0.65$). Molto più variabile è invece l'andamento del comfort relativo alla stagione primaverile, che dipende dalle condizioni meteorologiche, con valori che si mantengono all'interno dell'intervallo raccomandato o poco al di fuori di esso per la maggior parte delle giornate, per poi raggiungere $PMV = -1.62$ in corrispondenza della giornata del 27/5/2005.

3. ANALISI TEORICA

3.1 Il modello di Wray

Il modello proposto da William O. Wray [7] nasce originariamente come metodo di valutazione delle condizioni di comfort termico all'interno di edifici riscaldati con sistemi solari passivi, tuttavia ogni considerazione può essere estesa a qualsiasi tipo di ambiente che presenti una disuniformità termica abbastanza marcata.

In contrapposizione ai due indici proposti dall'ASHRAE Handbook [8] per caratterizzare gli ambienti termicamente non uniformi (Temperatura Operativa e Temperatura Operativa Umida), giudicati da Wray troppo poco generali e non esplicitamente correlati con le condizioni di comfort, egli introduce un unico indice termico più generale, chiamato Temperatura Equivalente Uniforme (T_{eu}). La T_{eu} è definita come la temperatura uniforme ($T_{eu} = T_{mr} = T_a$) di un ambiente confinato immaginario all'interno del quale una persona percepirebbe la stessa sensazione termica dell'ambiente reale non uniforme che si sta considerando. Il fondamento teorico dal quale Wray ricava la T_{eu} è l'equazione del comfort termico di Fanger [9]. Nelle ipotesi di temperatura superficiale della pelle e di grado di secrezione del sudore correlati con il livello di attività metabolica (per mezzo di opportune relazioni empiriche) e linearizzando i termini del quarto ordine dovuti alla trasmissione del calore per irraggiamento, l'equazione di Fanger assume la forma:

$$L = A - 0.41 [43 - 0.052A - 1.92\phi(T_a - 273) + 25.3\phi] +$$

$$- 0.49(0.86A - 50) + 0.0023A [44 - 1.92\phi(T_a - 273) + 25.3\phi] \quad (1)$$

$$- 0.0014A(307 - T_a) + 1.58 \cdot 10^{-7} f_{cl} T_{av}^3 (T_{cl} - T_{mr})$$

$$- f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)$$

Risolvendo l'Eq. (1) nelle ipotesi di $L = 0$ e $T_{mr} = T_a = T_u$, Wray definì la Temperatura Uniforme di Comfort T_u come la temperatura uniforme di un ambiente chiuso nel quale il soggetto si trovi in condizioni ottimali di comfort termico (carico termico nullo), la quale rappresenta l'obiettivo da raggiungere per ottenere le condizioni di benessere. Di

conseguenza la differenza $T_{eu} - T_u$ rappresenta una misura della distanza dalle condizioni di comfort per l'ambiente reale considerato.

Il modello proposto da Wray può essere rappresentato graficamente in uno spazio $T_a - T_{mr}$ (Fig. 1), del quale la linea della temperatura uniforme è la bisettrice ($T_{mr}=T_a$). Dall'equazione linearizzata di Fanger è possibile ricavare tutte le combinazioni di T_a e T_{mr} che determinano il livello ottimale di comfort ($L=0$): tutte queste combinazioni sono rappresentate in tale spazio da una retta con pendenza negativa s , che prende il nome di *linea del comfort*. L'intersezione tra questa retta e quella della temperatura uniforme rappresenta proprio T_u . Un ambiente reale qualsiasi, termicamente non uniforme, è rappresentato nel piano da un punto, individuato dalle sue temperature T_a^* e T_{mr}^* : tracciando da questo punto la parallela alla linea del comfort, l'intersezione con la retta della temperatura uniforme individua infine T_{eu} . Per mezzo di semplici relazioni geometriche, quest'ultima può essere calcolata come segue:

$$T_{eu} = \left(\frac{1}{1-s} \right) T_{mr}^* + \left(\frac{s}{s-1} \right) T_a^* \quad (2)$$

dove in generale $s = s(A, I_{cl}, f_{cl}, h_c, \phi)$.

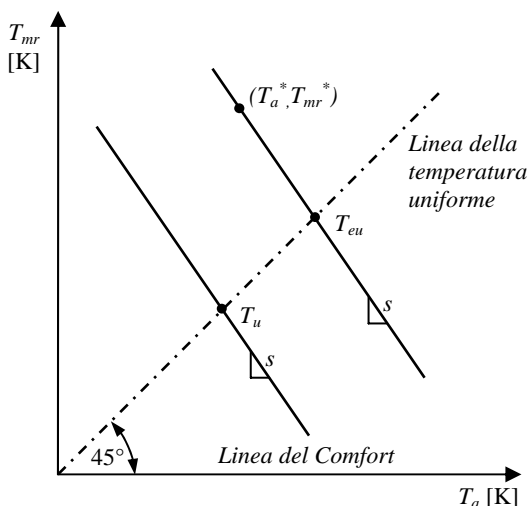


Fig. 1: rappresentazione grafica della relazione tra i parametri di temperatura e la linea del comfort [8].

3.2 Applicazione del modello di Wray ai dati sperimentali

L'applicazione del modello di Wray ha inizio con la determinazione della T_u , temperatura da raggiungere per ottenere le condizioni ottimali di comfort. Per risolvere l'Eq. (1) sotto le ipotesi elencate al paragrafo precedente, occorre assegnare un valore alle grandezze che in essa compaiono (A , ϕ , T_{cb} , f_{cb} , h_c). Dall'analisi dei dati personali raccolti nei questionari è possibile ricavare il numero di uomini e di donne presenti durante le misure; fissando i valori di metabolismo per entrambi i sessi è stata ricavata la media pesata dei valori di attività (A). Considerata la sedentarietà del compito svolto dagli studenti che seguono le lezioni universitarie, si sono fissati dei valori pari a 72 e 69 W/m² rispettivamente per gli uomini e le donne. Analizzando invece la parte termica dei

questionari, si può ricavare per ciascun individuo la composizione dell'abbigliamento. Attribuendo agli abiti i valori di resistenza termica riportati nell'Appendice C della [1], si è calcolato per ogni giornata di misura il valore medio di isolamento termico del vestiario degli occupanti ($I_{cl,med}$), oltre ai valori massimo e minimo ($I_{cl,max}$, $I_{cl,min}$), rappresentativi rispettivamente dell'individuo più vestito e di quello meno vestito, indipendentemente dal sesso. Il valore dell'isolamento termico del vestiario non figura esplicitamente nell'Eq. (1), ma è indispensabile per ricavare gli altri parametri T_{cb} , f_{cb} , h_c ad esso associati. Per far ciò ci si avvale del programma informatico proposto nell'Appendice D della [1] per il calcolo degli indici PMV (Predicted Mean Vote) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), implementato tramite linguaggio Visual Basic, dal quale sono estrapolati i coefficienti suddetti, ricavati sempre in corrispondenza di $I_{cl,med}$, $I_{cl,min}$, $I_{cl,max}$. I valori della temperatura dell'aria T_a , della temperatura media radiante T_{mr} e della velocità dell'aria relativa al corpo umano v_{ar} sono ricavati dai rilievi sperimentali, così come il valore dell'umidità relativa ϕ .

Facendo uso dei parametri così ottenuti sono state calcolate le T_u , sempre in corrispondenza dei valori minimo, medio e massimo di resistenza termica del vestiario.

Utilizzando gli stessi parametri, sono state calcolate le T_{eu} associate all'aula considerata, per mezzo dell'Eq. (2). I valori di s sono stati ricavati dai grafici contenuti in [7], tracciati da Wray per valori medi prefissati di f_{cl} , h_c , v_{ar} ($f_{cl}=1.15$, $h_c=2.83$ W/m² K, $v_{ar}=0.1$ m/s) e interpolando in base ai valori di A , ϕ e I_{cl} considerati. L'accuratezza del risultato ottenuto utilizzando tale metodo grafico è garantita dalla scarsa sensibilità della T_{eu} rispetto ad s : variando tale parametro di quantità maggiori dell'approssimazione introdotta, si ottiene una corrispondente oscillazione della T_{eu} di circa 0,1-0,2 °C, cosicché l'incertezza del risultato finale può dirsi di gran lunga compresa entro questi limiti. Di conseguenza, non appare giustificato il ricorso al metodo analitico per la determinazione di s , che comporta un ingente aumento del tempo di elaborazione dei dati.

I calcoli sono stati ripetuti per ogni singolo rilievo effettuato, in modo consecutivo durante le giornate di misura. Nel corso della stessa giornata, mantenendosi invariato il campione di studenti all'interno delle aule, rimangono costanti i valori medi di metabolismo e di isolamento termico del vestiario, mentre variano tutte le altre grandezze di interesse. Per quanto riguarda l'Aula 8 di Pavia, i rilievi sono stati effettuati sia al mattino che al pomeriggio, interrotti durante la pausa pranzo che separa i due cicli di lezioni. Il campione di studenti non è pertanto lo stesso nel corso dell'intera giornata e si considerano il mattino e il pomeriggio come due giornate distinte di misura, ad ognuna delle quali sono associati valori diversi di attività metabolica e isolamento termico del vestiario.

Parallelamente a T_u e T_{eu} sono stati calcolati anche gli indici tradizionali di Fanger PMV e PPD , facendo sempre uso del programma di calcolo riportato nella [1].

3.3 Confronto tra l'approccio di Wray e quello di Fanger

Dai valori di T_u e T_{eu} di ogni singolo rilievo si sono calcolate le differenze $T_{eu} - T_u$ e $|T_{eu} - T_u|$, al fine di effettuare un confronto con gli indici di Fanger, PMV e PPD . Per entrambe le differenze, un valore nullo determina la coincidenza tra temperatura uniforme di comfort e temperatura equivalente uniforme ($T_u=T_{eu}$) e corrisponde alle condizioni di benessere termometrico. La $|T_{eu} - T_u|$ esprime per mezzo di un unico valore la distanza dalle condizioni di comfort: più il

valore è grande, più ci troviamo distanti dalla condizione di benessere. La $T_{eu} - T_u$, pur conservando la proporzionalità della sensazione, aggiunge al valore il segno, che sarà positivo se all'ambiente considerato è associata una sensazione di caldo, negativo se è associata una sensazione di freddo. Per quanto detto, il valore di $T_{eu} - T_u$ è direttamente confrontabile con il PMV , mentre la $|T_{eu} - T_u|$ può essere confrontata con la PPD .

Sulla base di queste considerazioni si sono messi in relazione da un lato i valori di PMV e $T_{eu} - T_u$, dall'altro PPD e $|T_{eu} - T_u|$, verificando l'esistenza di semplici relazioni che legassero le due coppie di grandezze. L'analisi è stata compiuta riportando su due grafici le differenze $T_{eu} - T_u$ e $|T_{eu} - T_u|$ in ascissa, mentre in ordinata sono indicati rispettivamente il PMV e la PPD , calcolate dai dati sperimentali. Si è proceduto tracciando sui grafici (Figg. 2 e 3) l'andamento dei punti rappresentativi dei singoli rilievi strumentali in corrispondenza dei valori minimi, medi e massimi dell'isolamento termico del vestiario. Sugli stessi grafici sono state tracciate le linee di tendenza che meglio approssimano l'andamento dei punti considerati: in particolare per il grafico $(T_{eu} - T_u) - PMV$ è stata considerata una regressione lineare, mentre per il grafico $|T_{eu} - T_u| - PPD$ si è presa in considerazione una regressione polinomiale di secondo grado.

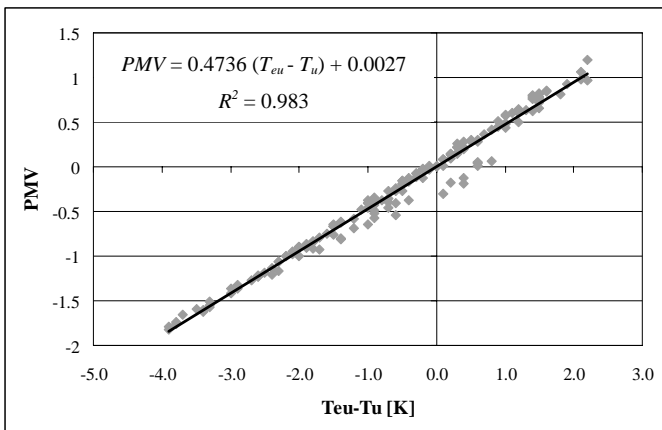


Fig. 2: andamento del PMV in funzione di $T_{eu} - T_u$.

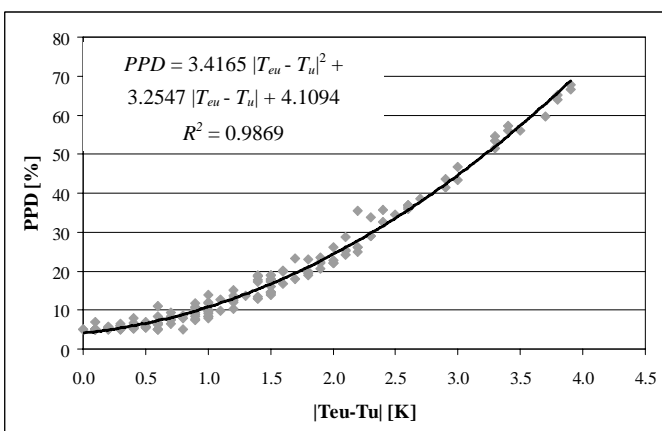


Fig. 3: andamento della PPD in funzione di $|T_{eu} - T_u|$.

Come si può constatare dagli andamenti di PMV e PPD delle figure 2 e 3, esiste una forte e precisa correlazione tra le

coppie di indici calcolate: in particolare il PMV e la differenza $(T_{eu} - T_u)$ sono legati da una dipendenza lineare, mentre la PPD si avvicina molto di più ad una funzione di secondo grado rispetto al modulo $|T_{eu} - T_u|$. Le equazioni delle due curve sono riportate rispettivamente nelle figure 2 e 3. La bontà del "fitting" di tali curve rispetto alle due dispersioni di punti è garantita dal valore dell'indice di determinazione R^2 , per il quale si sono riscontrati nei due casi valori rispettivamente di $R^2 = 0.983$ e $R^2 = 0.987$.

I valori di PMV e PPD calcolati facendo uso delle equazioni viste sopra, inoltre, rispecchiano fedelmente quanto previsto da Fanger in corrispondenza della neutralità termica, espressa dalla condizione $T_{eu} = T_u$: dalla prima equazione si ottiene un valore approssimabile allo zero e quindi perfettamente in linea con il valore nullo stabilito da Fanger; dalla seconda equazione si ottiene invece $PPD \cong 4.11\%$, poco lontano dal valore di riferimento di $PPD = 5\%$.

Le correlazioni e le equazioni ricavate permettono quindi il calcolo di $T_{eu} - T_u$ e $|T_{eu} - T_u|$, a partire dagli indici tradizionali del benessere per intervalli molto ampi dei valori di isolamento termico del vestiario (0,29 – 1,64 clo), propri di tutte le stagioni dell'anno ad eccezione di quella estiva. Tutto ciò consente di rendere molto più intuitivi i concetti connessi al benessere termoisometrico, quantificando con una differenza di temperatura una sensazione di caldo o di freddo provata dagli occupanti all'interno di un ambiente confinato. La temperatura è infatti una grandezza di uso comune e quotidiano, della quale le persone hanno esperienza diretta e con la quale sono abituate da sempre a trattare: esprimere attraverso di essa quello che fino a ieri veniva spiegato con indici di uso riservato agli addetti ai lavori costituisce una novità sostanziale e può essere un valido aiuto alla diffusione verso il grande pubblico dei concetti riguardanti il benessere termoisometrico e della sua gestione all'interno degli ambienti confinati.

3.4 Correlazione tra Temperatura Operativa e Temperatura Equivalente Uniforme

Nel corso dell'elaborazione dei dati raccolti durante la campagna sperimentale, parallelamente al calcolo degli indici di benessere tradizionali e delle temperature proprie della teoria di Wray, è stata calcolata anche la temperatura operativa T_o , definita come la temperatura uniforme di una cavità nera in cui il soggetto scambierebbe la stessa quantità di energia termica, per irraggiamento e convezione, che scambia nell'ambiente reale non uniforme. Il valore ottenuto per ogni singolo rilievo è stato di volta in volta confrontato con la T_{eu} corrispondente, al fine di verificare se le analogie di definizione di queste due grandezze comportassero anche dei valori sperimentali simili. Dall'analisi dei dati ottenuti si evidenzia una sostanziale coincidenza dei due parametri, con scostamenti che solo in rari casi superano il decimo di K, differenza che può quasi sempre ritenersi trascurabile. Nella maggior parte dei casi pratici infatti, quando la velocità dell'aria è bassa (< 0.2 m/s) o quando la differenza tra la T_a e la T_{mr} è piccola (< 4 K), la T_o può essere calcolata con sufficiente approssimazione come media aritmetica tra T_a e T_{mr} , che ovviamente ben poco si discosta dalla T_{eu} . Si ottiene così un'ulteriore semplificazione nel calcolo delle differenze $T_{eu} - T_u$ e $|T_{eu} - T_u|$: la T_o , che può essere calcolata per mezzo dei soli tre parametri T_a , T_{mr} e v_{ar} (sempre determinati nel corso dei rilievi sperimentali), può sostituire direttamente la T_{eu} , evitando così l'uso dell'Eq. (2) che richiede una laboriosa stima del parametro s .

4. CONCLUSIONI

L'analisi delle condizioni di comfort termoigrometrico all'interno delle aule universitarie oggetto del presente studio, effettuata dalla Sezione di Fisica Tecnica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Pavia, si basa su una vasta campagna sperimentale condotta in tre aule diverse per posizione geografica, caratteristiche impiantistiche, architettoniche e di esposizione. Durante tale campagna sperimentale sono stati acquisiti, per mezzo di rilievi strumentali effettuati con apposite centraline microclimatiche e avvalendosi della compilazione di questionari da parte degli occupanti, i dati necessari al calcolo degli indici di benessere tradizionali previsti dalla UNI EN ISO 7730:2006 e delle grandezze proprie del modello di Wray [7]. I dati raccolti sono stati poi elaborati mettendo in relazione il *PMV* con la differenza di temperature ($T_{eu} - T_u$) e la *PPD* con il modulo $|T_{eu} - T_u|$, verificando l'esistenza di una correlazione tra i parametri. Dall'analisi dei risultati ottenuti si è evidenziata, in particolare, la relazione lineare che lega la coppia di parametri *PMV* - ($T_{eu} - T_u$), rappresentata da una retta passante per l'origine, in perfetto accordo con quanto stabilito dalla teoria di Fanger [8], la quale prevede l'annullarsi del *PMV* in condizioni di neutralità termica ($T_{eu} = T_u$, $T_{eu} - T_u = 0$). Per quanto riguarda la coppia *PPD* - $|T_{eu} - T_u|$, si è riscontrata una relazione di secondo grado, con una curva che nelle condizioni di neutralità termica interseca l'asse della *PPD* in corrispondenza di un valore di 4.11%, poco distante dal 5% previsto dalla teoria di Fanger [8].

In corrispondenza di ogni singolo rilievo sperimentale effettuato durante le giornate di misura, si sono infine calcolati i valori della Temperatura Operativa T_o , confrontandoli di volta in volta con i corrispondenti valori della Temperatura Equivalente Uniforme T_{eu} . I risultati ottenuti indicano una sostanziale coincidenza delle due grandezze, avendo rilevato differenze che solo in rari casi superano il decimo di K. Grazie a questo, si deduce la possibilità di snellire la procedura di calcolo delle differenze sopra citate $T_{eu} - T_u$ e $|T_{eu} - T_u|$: senza commettere un errore significativo, si può infatti sostituire la T_o , ottenibile da semplici rilievi microclimatici, alla T_{eu} , evitando così l'uso dell'Eq. (2) e di conseguenza la stima del parametro s che in essa compare.

5. NOMENCLATURA

A	= livello di attività metabolica [W/m ²];
f_{cl}	= rapporto tra la superficie corporea coperta dai vestiti e la superficie di pelle nuda;
h_c	= coefficiente di convezione tra la superficie del vestiario e l'aria [W/m ² K];
I_{cl}	= isolamento termico del vestiario [clo, m ² K/W];
L	= carico termico per unità di superficie corporea [W/m ²];
<i>PMV</i>	= voto medio previsto;
<i>PPD</i>	= percentuale prevista degli insoddisfatti [%];
R^2	= indice di determinazione;
s	= pendenza della linea del comfort;
T_a	= temperatura dell'aria [K];
T_{av}	= media tra le temperature T_{cl} e T_{mr} [K];
T_{cl}	= temperatura superficiale esterna del vestiario [K];
T_{eu}	= temperatura equivalente uniforme [K];
T_{mr}	= temperatura media radiante [K];

T_o	= temperatura operativa [K];
T_u	= temperatura uniforme di comfort [K];
v_{ar}	= velocità dell'aria relativa al corpo umano [m/s];
ϕ	= umidità relativa [%].

Apici:
* = ambiente reale.

Pedici:	
a	= aria;
ar	= aria relativa al corpo umano;
c	= convezione;
cl	= vestiario;
eu	= equivalente uniforme;
min	= relativo al valore minimo di isolamento termico del vestiario;
med	= relativo al valore medio di isolamento termico del vestiario;
max	= relativo al valore massimo di isolamento termico del vestiario;
mr	= media radiante;
o	= operativa;
u	= uniforme di comfort.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- UNI EN ISO 7730, Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale, Febbraio 2006.
- UNI EN ISO 10551, Ergonomia degli ambienti termici - Valutazione dell'influenza dell'ambiente termico mediante scale di giudizio soggettivo, Gennaio 2002.
- ASHRAE Standard 55/2004, Thermal environment conditions for human occupancy, Atlanta, Ga., USA 2004.
- C. Buratti, P. Ricciardi, C. Simoncini, 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, 5° Congresso Nazionale CIRIAF - Atti (Perugia 8-9 aprile 2005).
- C. Buratti, A. Milone, D. Milone, S. Pitruzzella, P. Ricciardi, Determinazione degli indici PMV e PPD attraverso misure strumentali e questionari nel modello adattivo, 6° Congresso Nazionale CIRIAF - Atti (Perugia 7-8 aprile 2006).
- C. Buratti, P. Ricciardi, Thermal-hygrometry comfort in university classrooms: experimental results in north and central Italy Universities conducted with new methodologies based on adaptive models, 3rd International Building Physics Conference, (Montreal, 27-31 agosto 2006).
- William O. Wray, A simple procedure for assessing thermal comfort in passive solar heated buildings, Solar Energy Vol. 25, pp. 327-333 - Pergamon Press Ltd. 1980
- ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1977.
- P.O. Fanger, Thermal comfort, McGraw Hill, New York, 1970.

6. SUMMARY

A research team of the University of Perugia, in cooperation with University of Pavia, is carrying out a comfort analysis inside university classrooms. The investigation had began, in previous studies, from a wide experimental campaign led in three classrooms, different for geographical position and exposure, air conditioning systems and architectural characteristics. During the campaign, all data needed to calculate both Fanger and Wray comfort indices were acquired by instrumental surveys and questionnaire compilation. By means of results analysis, the two couples of parameters $PMV - (T_{eu} - T_u)$ and $PPD - |T_{eu} - T_u|$ were related, noticing a linear function for the first and a second order polynomial function for the second. Finally the values of Operative Temperature T_o and Equivalent Uniform Temperature T_{eu} , calculated for each single experimental survey, were compared, observing a very good agreement between the two quantities, with differences that exceed 0.1 K only for a few number of values.