



Corso

Impianti Termotecnici e riqualificazione energetica

Benessere Termoigrometrico



Programma

- Benessere
 - Metabolismo
 - Benessere termoigrometrico
 - Comfort termico
 - indici di discomfort
 - indici di discomfort locale
 - Accettabilità degli ambienti



Benessere termoigrometrico

- In condizioni di equilibrio l'energia prodotta deve essere scambiata con l'ambiente sotto forma di calore o lavoro

$$M - W - E - C_{resp} - (R + C) = 0$$

- M potenza termica associata al metabolismo
- W lavoro meccanico
- E flusso termico ceduto per evaporazione
- C_{resp} flusso termico ceduto attraverso la respirazione
- R, C flussi termici ceduti per convezione ed irraggiamento



Il Metabolismo Umano

- Il corpo umano è sede di molte trasformazioni chimiche che costituiscono il metabolismo
- Il metabolismo si può distinguere in basale o di riposo, il metabolismo basale varia da individuo a individuo. Il metabolismo di lavoro, è legato invece all'attività muscolare
- L'unità di misura del metabolismo è il W/m^2 , viene però espresso con l'unità M met, $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$



Tasso metabolico

Activity	Metabolic Rate	
	Met Units	W/m ²
Resting		
Sleeping	0.7	40
Reclining	0.8	45
Seated, quiet	1.0	60
Standing, relaxed	1.2	70
Walking (on level surface)		
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2.0	115
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph	2.6	150
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3.8	220
Office Activities		
Reading, seated	1.0	55
Writing	1.0	60
Typing	1.1	65
Filing, seated	1.2	70
Filing, standing	1.4	80
Walking about	1.7	100
Lifting/packing	2.1	120



Flusso termico sensibile ceduto per convezione

- Il flusso ceduto per convezione si può esprimere come

$$\Phi_C = f_{cl} \cdot h_c \cdot A_b \cdot (t_{cl} - t_a)$$

- f_{cl} coefficiente d'area di abbigliamento, $f_{cl} = A_{cl}/A_b$
- t_{cl} temperatura esterna abbigliamento
- t_a temperatura dell'aria
- A_b area del corpo umano
- l'area del corpo si può esprimere con la formula di DuBois

$$A_b = 0,202 \times W_b^{0,425} \times H_b^{0,725} \quad W_b[kg]; H_b[m]$$

- Considerando $H_b = 1.72$ m, $W_b = 1.73$ m si ottiene $A_b = 1.8$ m²



Flusso termico sensibile ceduto per irraggiamento

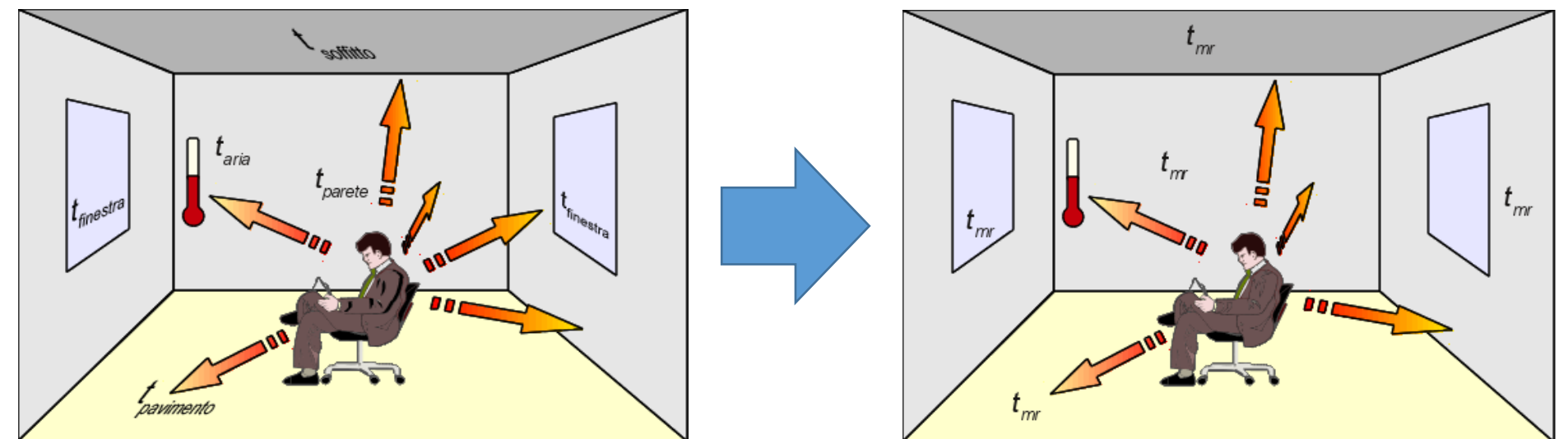
- Flusso termico ceduto per irraggiamento

$$\Phi_R = f_{cl} \cdot A_b \cdot \varepsilon_{cl} \cdot \sigma \cdot (T_{cl}^4 - T_2^4)$$

- Come temperatura T_2 viene utilizzata la temperatura media radiante T_{mr} cioè la temperatura di un ambiente fittizio termicamente uniforme che scambierebbe lo stesso flusso della situazione reale
- Supponendo le superfici nere si ha

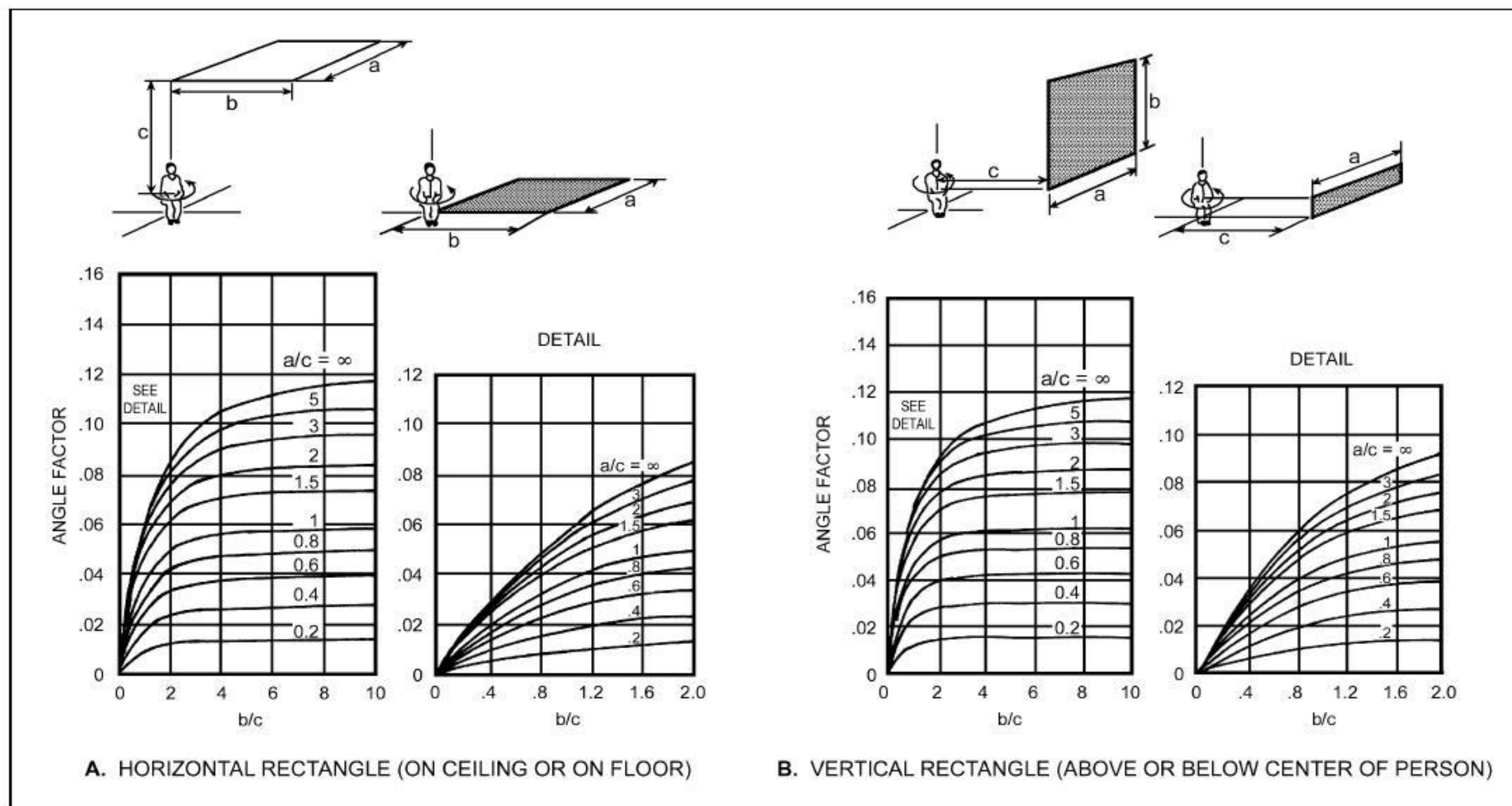
$$(t_{MR} + 273.15)^4 = \sum_i (t_i + 273.15)^4 \cdot F_{p-i}$$

- F_{p-i} fattore di vista





Fattori di vista, persona seduta





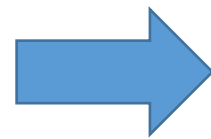
Linearizzazione scambio termico radiativo

- Lo scambio termico radiativo non è lineare
- Per ovviare a tale problema si procede ad una linearizzazione
- Le differenze di temperatura sono molto più piccole del valore assoluto (in K)

$$T_{cl}^4 - T_{mr}^4 = (T_{cl}^2 + T_{mr}^2) \cdot (T_{cl}^2 - T_{mr}^2) = (T_{cl}^2 + T_{mr}^2) \cdot (T_{cl} + T_{mr}) \cdot (T_{cl} - T_{mr})$$

$$\bar{T} = \frac{T_{cl} + T_{mr}}{2}$$

$$\bar{T}^2 \cong \frac{T_{cl}^2 + T_{mr}^2}{2}$$



$$T_{cl}^4 - T_{mr}^4 \cong 4 \cdot \bar{T}^3 \cdot (T_{cl} - T_{mr}) = 4 \cdot \bar{T}^3 \cdot (t_{cl} - t_{mr})$$

$$\Phi_R = A_b \cdot f_{cl} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \bar{T}^3 \cdot (t_{cl} - t_{mr}) = A_b \cdot f_{cl} \cdot h_r \cdot (t_{cl} - t_{mr})$$



Temperatura operativa e flusso termico

- Il flusso specifico scambiato riferendosi ad A_b si esprime come:

$$\Phi_C/A_b = C = f_{cl} \cdot h_C \cdot (t_{cl} - t_a)$$

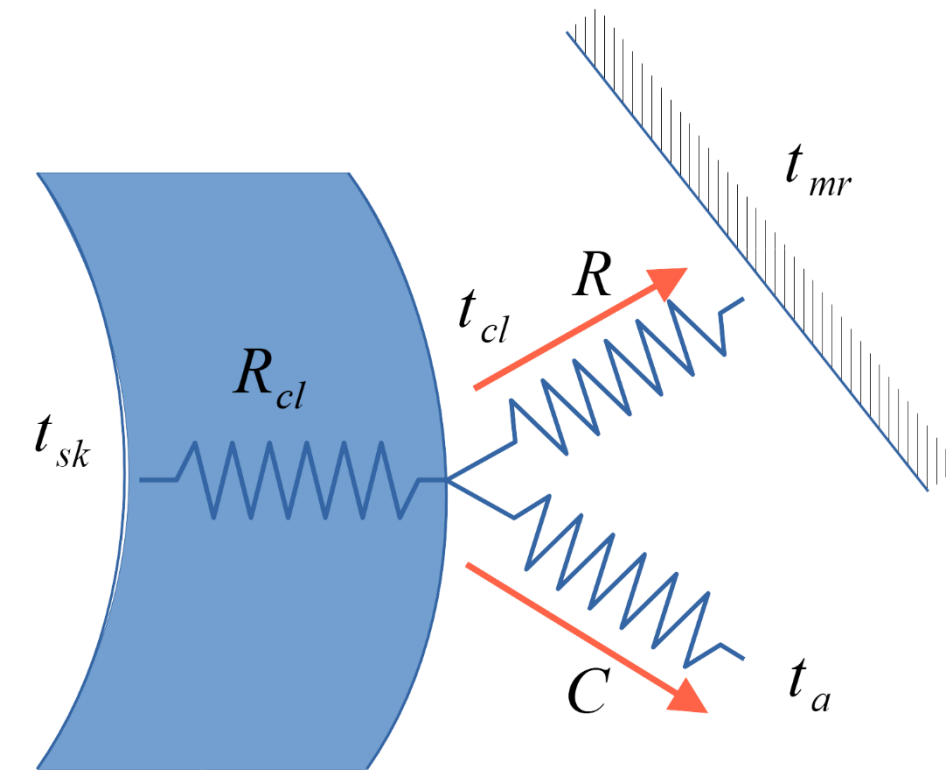
$$\Phi_R/A_b = R = f_{cl} \cdot h_R \cdot (t_{cl} - t_{mr})$$

- t_a e t_{mr} possono essere unificate in una temperatura intermedia t_o temperatura operativa

$$C + R = f_{cl} \cdot h \cdot (t_{cl} - t_o)$$

$$h = h_C + h_R$$

$$t_o = \frac{h_C \cdot t_a + h_R \cdot t_{mr}}{h_C + h_R}$$



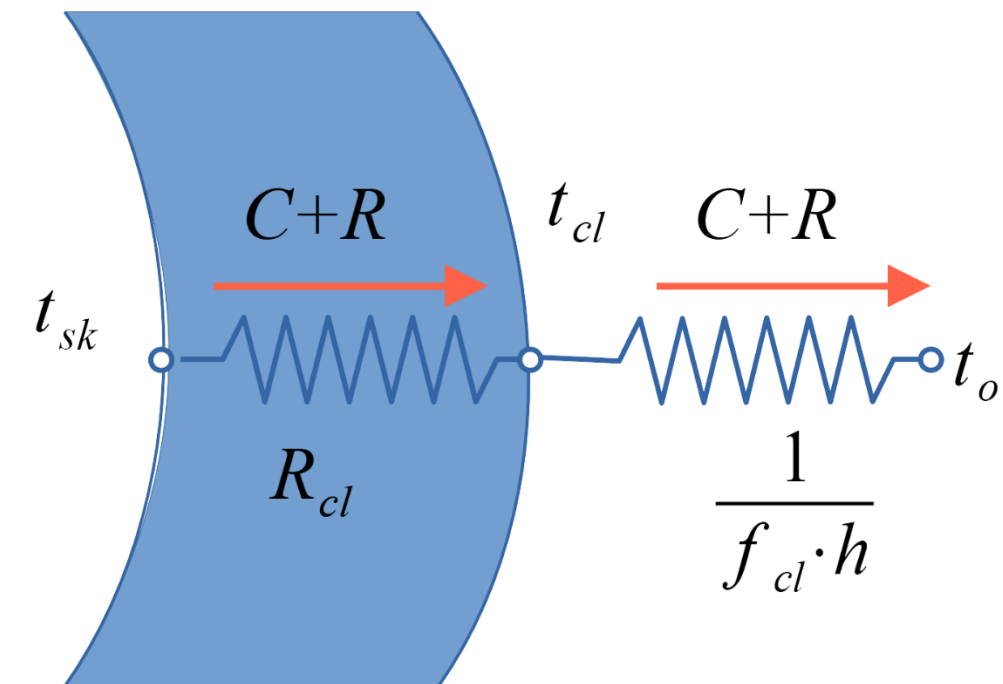


Temperatura operativa e flusso termico

- Non è conveniente avere una relazione dove compare la t_{cl} eliminano questa temperatura utilizzando la resistenza termica degli abiti

$$C + R = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{R_{cl}} = \frac{t_{cl} - t_o}{\frac{1}{f_{cl} \cdot h}}$$

$$C + R = \frac{t_{sk} - t_o}{R_{cl} + \frac{1}{f_{cl} \cdot h}}$$





Vestiario

- Il vestiario aggiunge sia una resistenza termica che una resistenza al passaggio del vapore, la resistenza termica viene espressa in clo; $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$, il valore di resistenza termica del vestiario viene pertanto espresso in I_{clo}
- La resistenza del vestiario al passaggio del vapore può essere espressa come $R_{\text{cl}}^v = 0,90 R_{\text{cl}} / i_{\text{cl}}$ (s m^2)/ kg_a dove i_{cl} è il rapporto tra la resistenza al passaggio di vapore e resistenza termica

vestito	Resistenza (clo)
Estivo (uomo)	0,5
Estivo (donna)	0,3
Invernale (uomo)	1,0
Invernale (donna)	0,7
Invernale pesante	1,5



Abbigliamento tipico

Abbigliamento da lavoro	I_d		Abbigliamento giornaliero	I_d	
	clo	m ² . K/W		clo	m ² . K/W
Mutande, tuta, calzini, scarpe	0,70	0,110	Slip, maglietta, pantaloncini, calzini leggeri, sandali	0,30	0,050
Mutande, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0,75	0,115	Slip, sottoveste, calze, abito leggero con maniche, sandali	0,45	0,070
Mutande, camicia, tuta, calzini, scarpe	0,80	0,125	Mutande, camicia con maniche corte, pantaloni leggeri, calzini leggeri, scarpe	0,50	0,080
Mutande, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	0,85	0,135	Slip, calze, camicia a maniche corte, gonna, sandali	0,55	0,085
Mutande, camicia, pantaloni, grembiule, calzini, scarpe	0,90	0,140	Mutande, camicia, pantaloni leggeri, calzini, scarpe	0,60	0,095
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,00	0,155	Slip, sottoveste, calze, abito, scarpe	0,70	0,105
Biancheria intima a gambe e maniche corte, camicia, pantaloni, tuta, calzini, scarpe	1,10	0,170	Biancheria intima, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0,70	0,110
Biancheria intima a gambe e maniche lunghe, giacca termica, calzini, scarpe	1,20	0,185	Biancheria intima, completo da corsa (maglia e pantaloni), calzini lunghi, scarpe da corsa	0,75	0,115
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca termica, calzini, scarpe	1,25	0,190	Slip, sottoveste, camicia, gonna, calzettoni spessi al ginocchio, scarpe	0,80	0,120
Biancheria intima a maniche e gambe corte, tuta, giacca termica e pantaloni, calzini, scarpe	1,40	0,220	Slip, camicia, gonna, maglione a girocollo, calzettoni spessi al ginocchio, scarpe	0,90	0,140
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca termica e pantaloni, calzini, scarpe	1,55	0,225	Mutande, camicia a maniche corte, camicia, pantaloni, maglione con scollo a V, calzini, scarpe	0,95	0,145



Abbigliamento tipico

Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante e tuta, calzini, scarpe	1,85	0,285	Slip, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,00	0,155
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante e tuta, calzini, scarpe, berretto, guanti	2,00	0,310	Slip, calze, camicia, gonna, gilet, giacca	1,00	0,155
Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, giacca termica e pantaloni, giacca termica per esterno e pantaloni, calzini, scarpe	2,20	0,340	Slip, calze, blusa, gonna lunga, giacca, scarpe	1,10	0,170
Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, giacca termica e pantaloni, parka con imbottitura pesante, tuta con imbottitura pesante, calzini, scarpe, berretto, guanti	2,55	0,395	Biancheria intima, camicia con maniche corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,10	0,170
			Biancheria intima, camicia a maniche corte, camicia, pantaloni, gilet, giacca, calzini, scarpe	1,15	0,180
			Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, camicia, pantaloni, maglione con scollo a V, giacca, calzini, scarpe	1,30	0,200
			Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, gilet, giacca, cappotto, calzini, scarpe	1,50	0,230



Flusso latente ceduto

- Il flusso termico latente è generato da due componenti:
 - Flusso termico per respirazione
 - Flusso termico per traspirazione dalla pelle
- Il flusso termico ceduto per evaporazione dipende dalla temperatura della pelle, umidità dell'aria, velocità dell'aria, percentuale di pelle bagnata, tipo di abbigliamento
- Flusso termico ceduto per respirazione, dipende dal tipo dell'attività e dall'umidità e temperatura dell'aria



Scambi termici latenti

- Gli scambi termici latenti avvengono per
 - Scambi latenti dalla pelle
 - Scambi latenti dalla respirazione
 - Scambi sensibili con la respirazione
- Scambi latenti dalla pelle

$$E_{sk} = \frac{w \cdot (p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl} \cdot h_e}}$$

- Scambi latenti e sensibili da respirazione

$$\Phi_{res} = C_{res} + E_{res} = \frac{\dot{m}_{res} \cdot (h_{ex} - h_a)}{A_b}$$

$$\dot{m}_{w,res} = \frac{\dot{m}_{res} \cdot (W_{ex} - W_a)}{A_b}$$

$$\dot{m}_{res} = K_{res} \cdot M \cdot A_b$$

$$K_{res} = 1.43 \cdot 10^{-6} \text{ kg/J}$$



Scambi termici latenti

- Scambio termico latente dalla pelle

$$E_{rsw} \approx \dot{m}_{rsw} \cdot h_{fg}$$

$\dot{m}_{rsw}$ portata di di massa del sudore

h_{fg} calore latente di evaporazione

- Massimo scambio latente

$$w_{rsw} = \frac{E_{rsv}}{E_{max}}$$

- E_{max} massimo scambio latente per sudorazione

$$E_{max} = h_{e,c} \cdot (p_{sk,s} - p_a)$$

- p_a pressione parziale del vapore nell'aria

- Coefficienti di scambio del calore e di massa

$$i_m \cdot LR = \frac{h_{e,c}}{h_s}$$

i_m indice di permeabilità al vapore

LR relazione di Lewis

$$LR = 16.5 \text{ K/kPa}$$

- Senza sudorazione per regolazione

- $E_{df,min} = 0.06 \cdot E_{max}$



Scambi termici latenti

- Termine diffusive (parte non coperta da sudore)

$$E_{dif} = (1 - w_{rsw}) \cdot 0.06 \cdot E_{max}$$

- Scambio latente totale con regolazione

$$\begin{aligned} E_{sk} &= E_{rsw} + E_{dif} = \\ w_{rsw} \cdot E_{max} + (1 - w_{rsw}) \cdot 0.06 \cdot E_{max} \\ E_{sk} &= w_{sk} \cdot E_{max} \end{aligned}$$

w_{sk} frazione bagnata di pelle

- Perdite per respirazione

- Con la respirazione abbiamo sia carichi latent che sensibili
- Dipende dal metabolismo
- Condizioni estive:

$$E_{res} = C_{res} + L_{res} \cong 0.09 \cdot M$$

- Leggermente maggiore in inverno

$$E_{res} \cong 0.1 \cdot M$$



Comfort termico

- Regime stazionario

$$M = W + C + R + E_{sk} + E_{res}$$

$$M(1 - 0.05 - 0.1) = F_{cl} \cdot f_{cl} \cdot h(T_{sk} - T_o) + w_{sk} \cdot i_m \cdot LR \cdot h_s \cdot (p_{sk,s} - p_a)$$

- Per avere comfort l'equazione di bilancio termico deve essere soddisfatta, possiamo scrivere una relazione tra parametri

$$f(I_{cl}, M, t_a, v_a, UR, t_{mr}, t_{sk}, E) = 0$$

- La temperatura della pelle a lo scambio latente possono essere scritti utilizzando gli altri parametri. Risultano sei parametri liberi



Comfort termico

- Si può definire il comfort termico come quella situazione in cui si esprime soddisfazione nei riguardi del microclima
- comfort termico globale, relativo alla persona nel suo insieme
- comfort locale, si studia il comportamento di una parte specifica
- entrambe le esigenze devono essere soddisfatte.



Indici di comfort

- Sono stati introdotti vari indici per evidenziare uno scostamento dalla situazione di comfort, la norma italiana UNI-EN-ISO 7730 considera l'indice di sensazione *PMV* (predicted Mean Vote)
- il PMV è un indice di sensazione su una scala di voti funzione dei parametri ambientali e caratteristici del soggetto quali l'abbigliamento e l'attività.

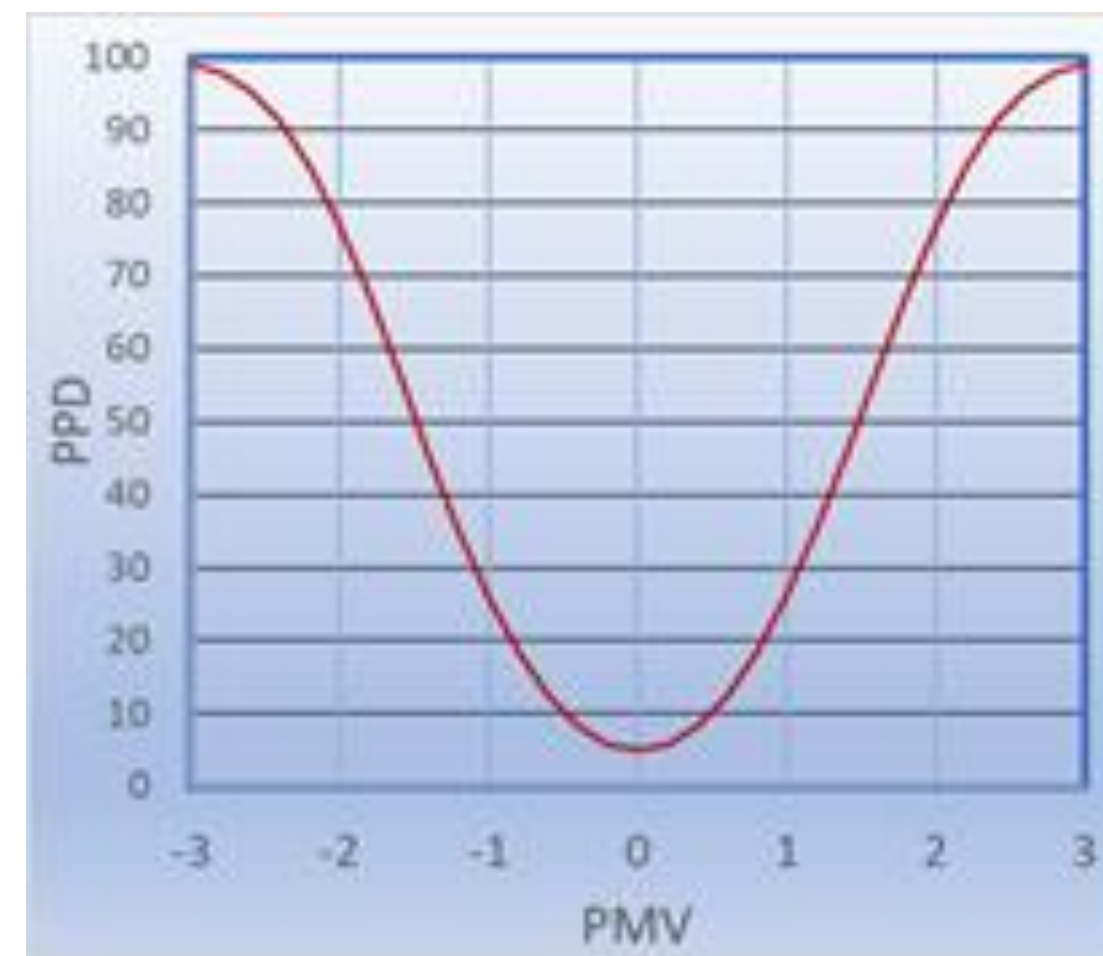
VOTO	SENSAZIONE
+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Né caldo né freddo
-1	Leggermente Freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo



Indici di comfort

- Il PMV rappresenta statisticamente il voto che un individuo darebbe ad un ambiente termico, è necessario tener in conto anche l'effetto della dispersione dei voti, pertanto è stato introdotto un altro indice:
- il PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)Il PPD rappresenta la percentuale di persone che nell'ambiente considerato esprimerebbero un voto pari o superiore a 2, il PPD è stato correlato al PMV

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2}$$





Indici di discomfort locale

- Oltre al comfort globale deve essere verificato anche il comfort locale, cioè vanno evitate situazioni in cui in alcune parti dell'ambiente si verificano condizioni di disagio, tali situazioni si possono verificare per esempio per correnti d'aria o per gradienti termici.

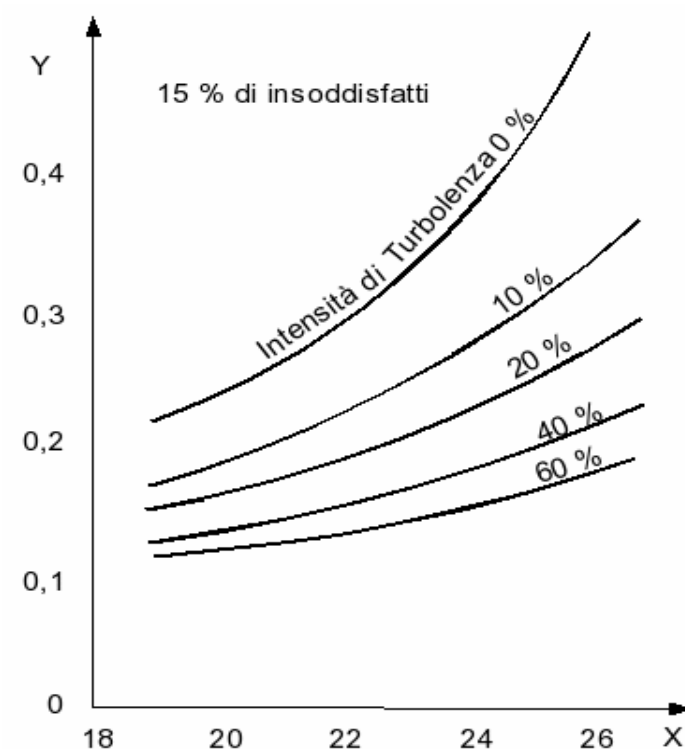
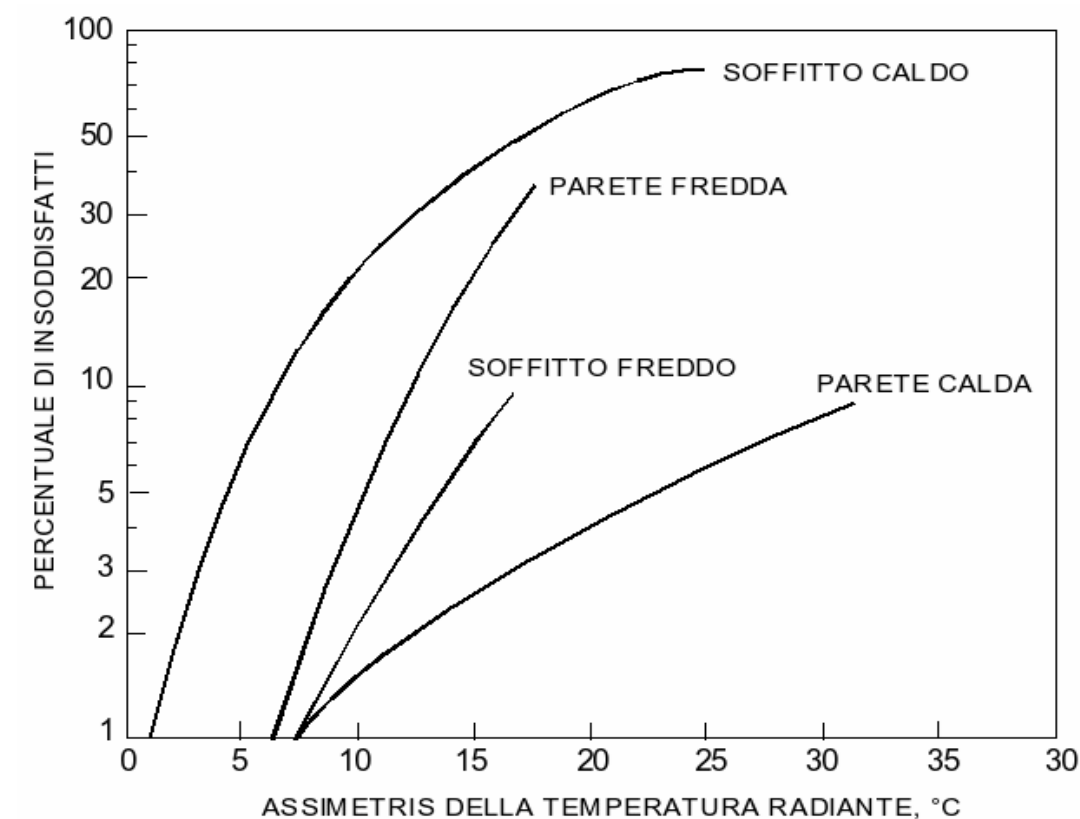


Figura valida per attività leggera, principalmente sedentaria ($70 \text{ W/m}^2 = 1,2 \text{ met}$)





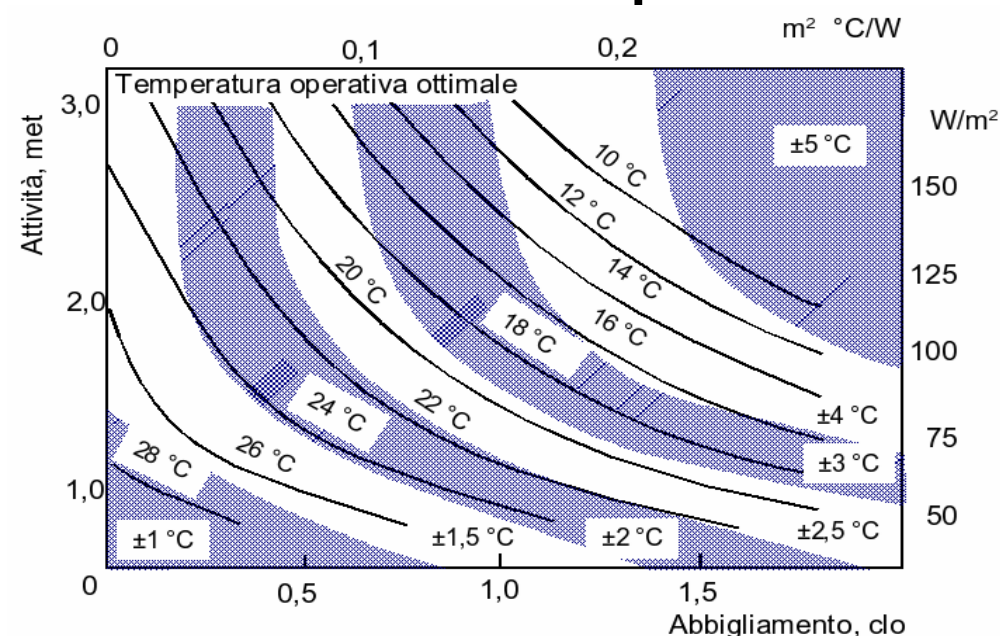
UNI 7730 - Categoria Edifici

Categoria	Stato termico nel complesso		Discomfort locale			
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				Differenza temperatur a verticale	Pavimento caldo o freddo	Assimetria radiante
A	< 6	$-0,2 < \text{PMV} < +0,2$	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	$-0,5 < \text{PMV} < +0,5$	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	$-0,7 < \text{PMV} < +0,7$	< 30	< 10	< 15	< 10

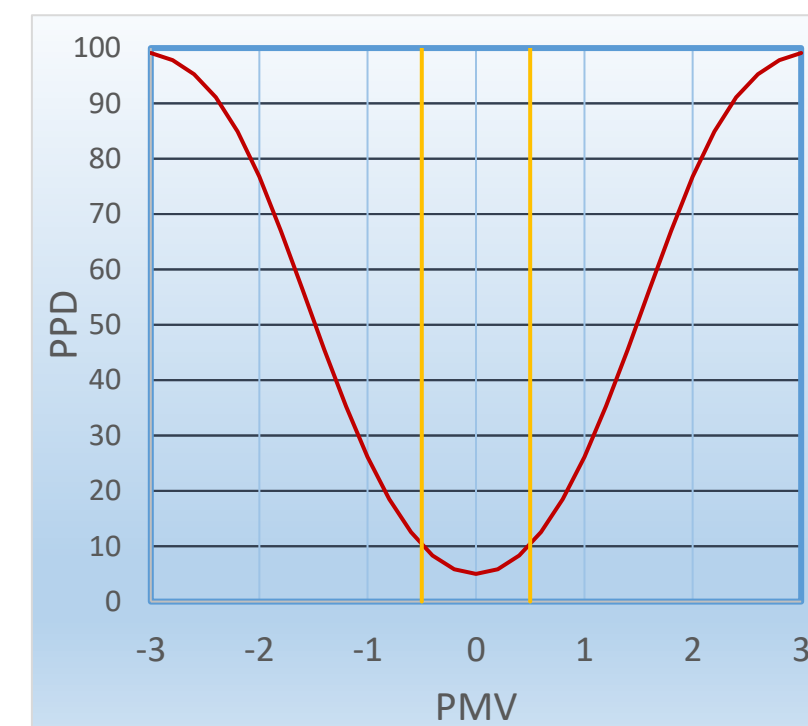


Accettabilità di un Ambiente

- L'accettabilità di un ambiente può essere definita come quella serie di valori dei parametri ambientali caratterizzati da un PPD inferiore o uguale ad una certa soglia.
- Un valore limite comunemente accettato è un PPD inferiore o uguale a 10%, a cui corrisponde un PMV compreso tra -0,50 e +0,50

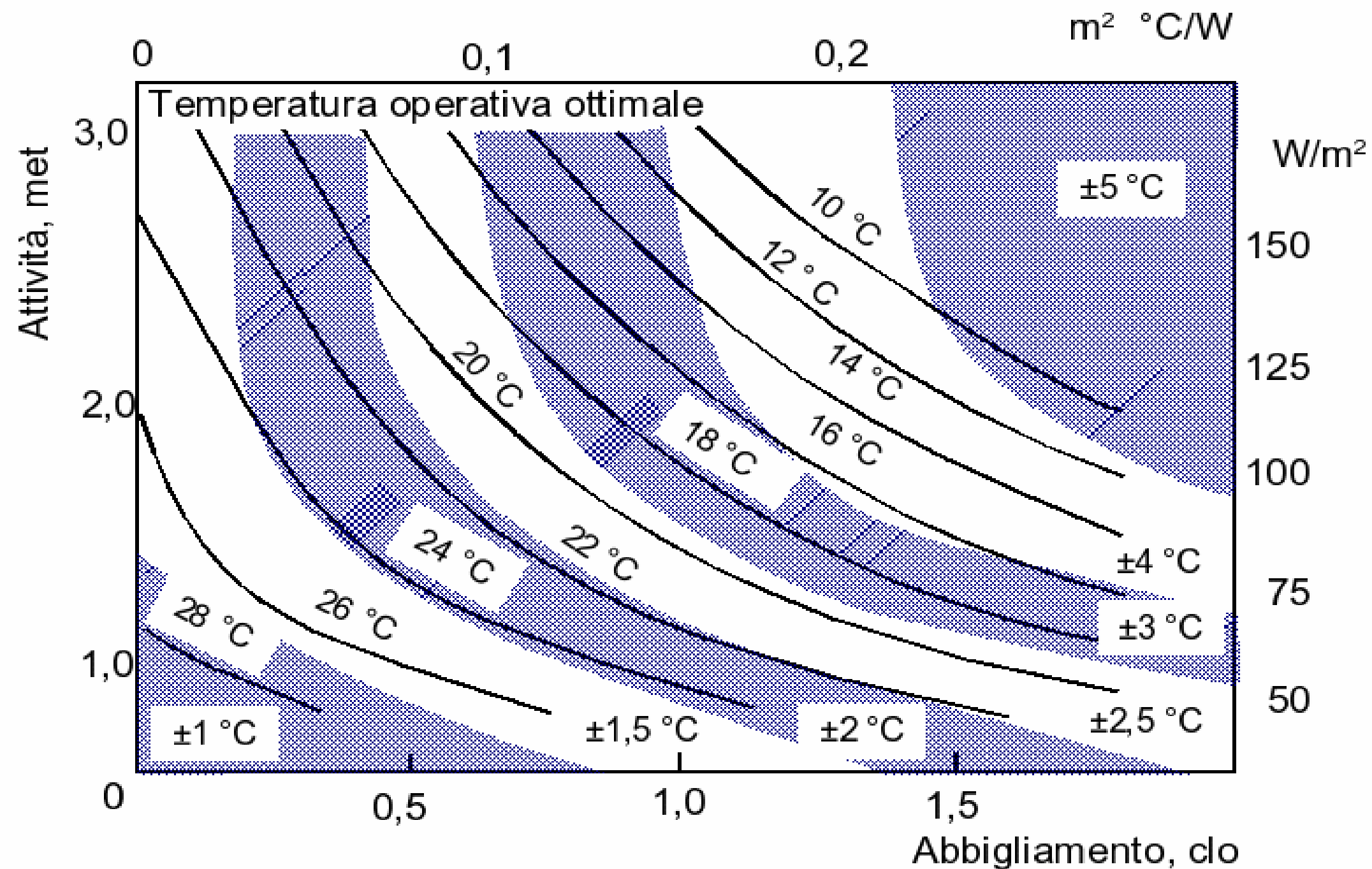


Le aree ombreggiate indicano l'intervallo di benessere Δt rispetto alla temperatura ottimale in cui $0,5 < PMV < 0,5$. Le velocità relative di aria è valutata pari a zero per $M < 1$ met e con la relazione $v_{ar} = 0,3 (M-1)$ per $M > 1$ met. L'umidità relativa è pari al 50 %





Condizioni di benessere





ASHRAE 55 zone di comfort

This graph is only applicable for the following conditions:

Metabolic Rate: 1.3 met

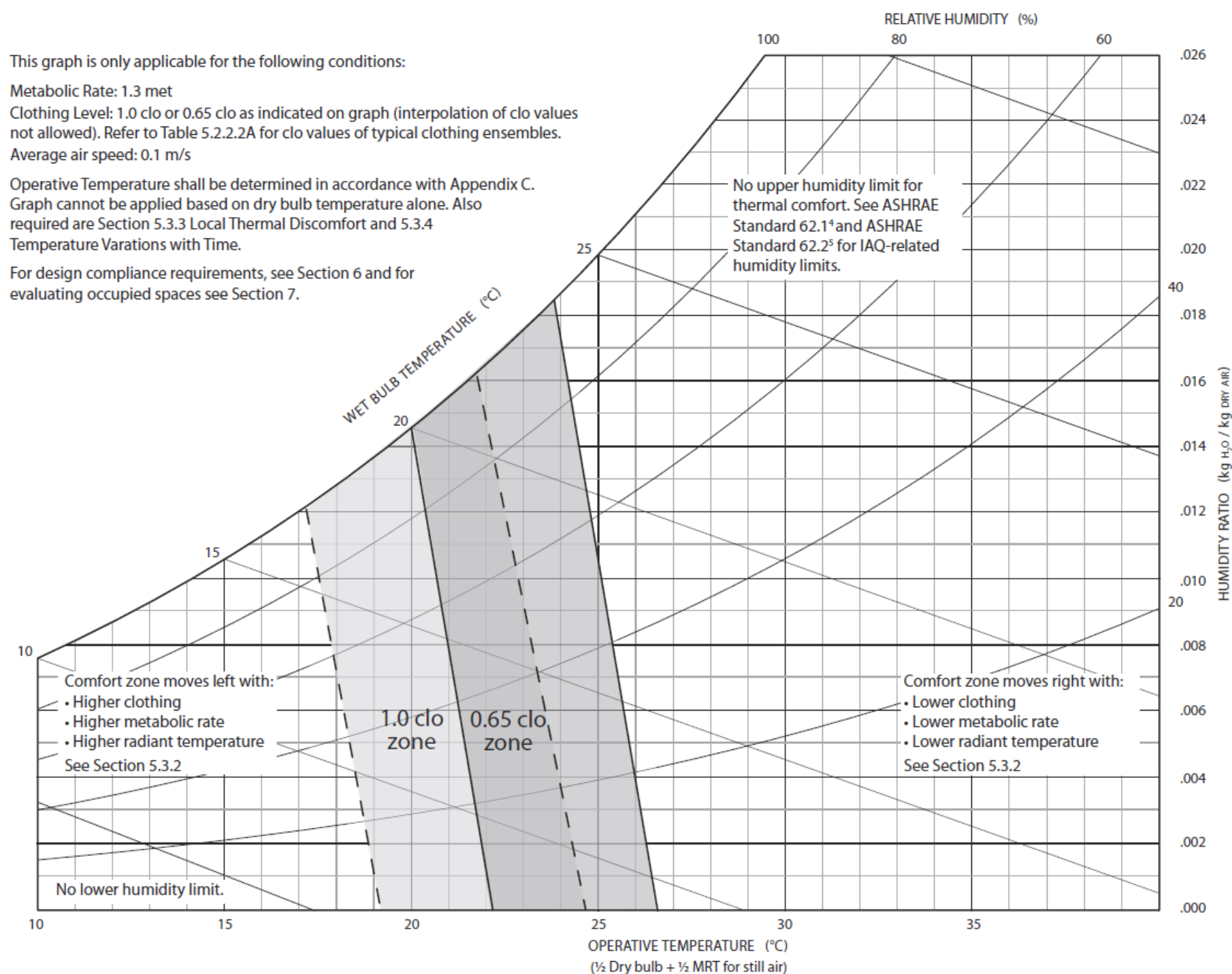
Clothing Level: 1.0 clo or 0.65 clo as indicated on graph (interpolation of clo values not allowed). Refer to Table 5.2.2.2A for clo values of typical clothing ensembles.

Average air speed: 0.1 m/s

Operative Temperature shall be determined in accordance with Appendix C.

Graph cannot be applied based on dry bulb temperature alone. Also required are Section 5.3.3 Local Thermal Discomfort and 5.3.4 Temperature Variations with Time.

For design compliance requirements, see Section 6 and for evaluating occupied spaces see Section 7.





ASHRAE 55 comfort

This graph is only applicable for the following conditions:

Metabolic Rate: 1.3 met or 2.0 met as indicated on graph (interpolation of met values not allowed)

Clothing Level: 0.65 clo

Average air speed: 0.1 m/s

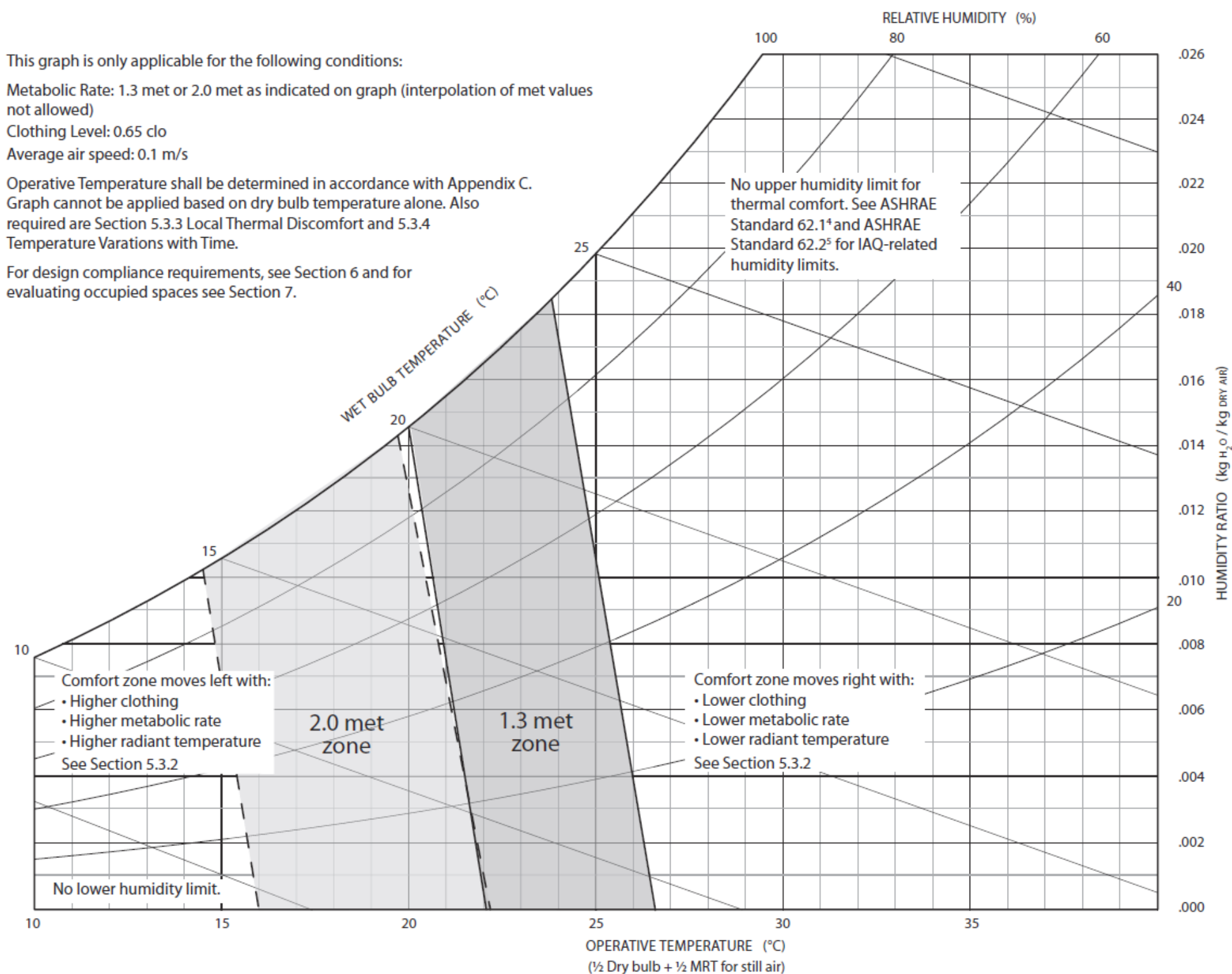
Operative Temperature shall be determined in accordance with Appendix C.

Graph cannot be applied based on dry bulb temperature alone. Also

required are Section 5.3.3 Local Thermal Discomfort and 5.3.4

Temperature Variations with Time.

For design compliance requirements, see Section 6 and for evaluating occupied spaces see Section 7.





Centralina benessere termico

- Misure ambientali e benessere sono effettuate con un sistema BABUC M



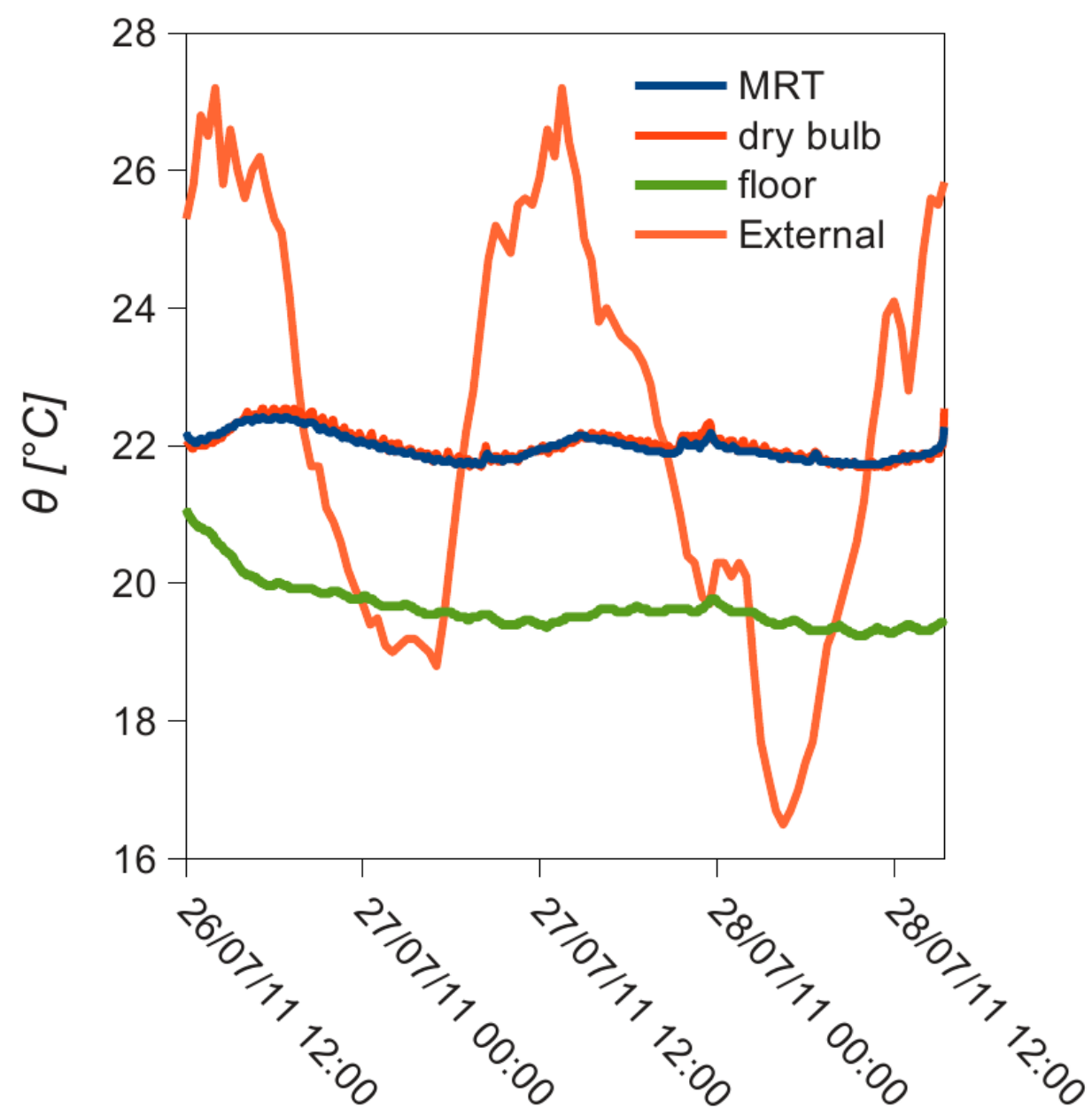


Sistema Babuc

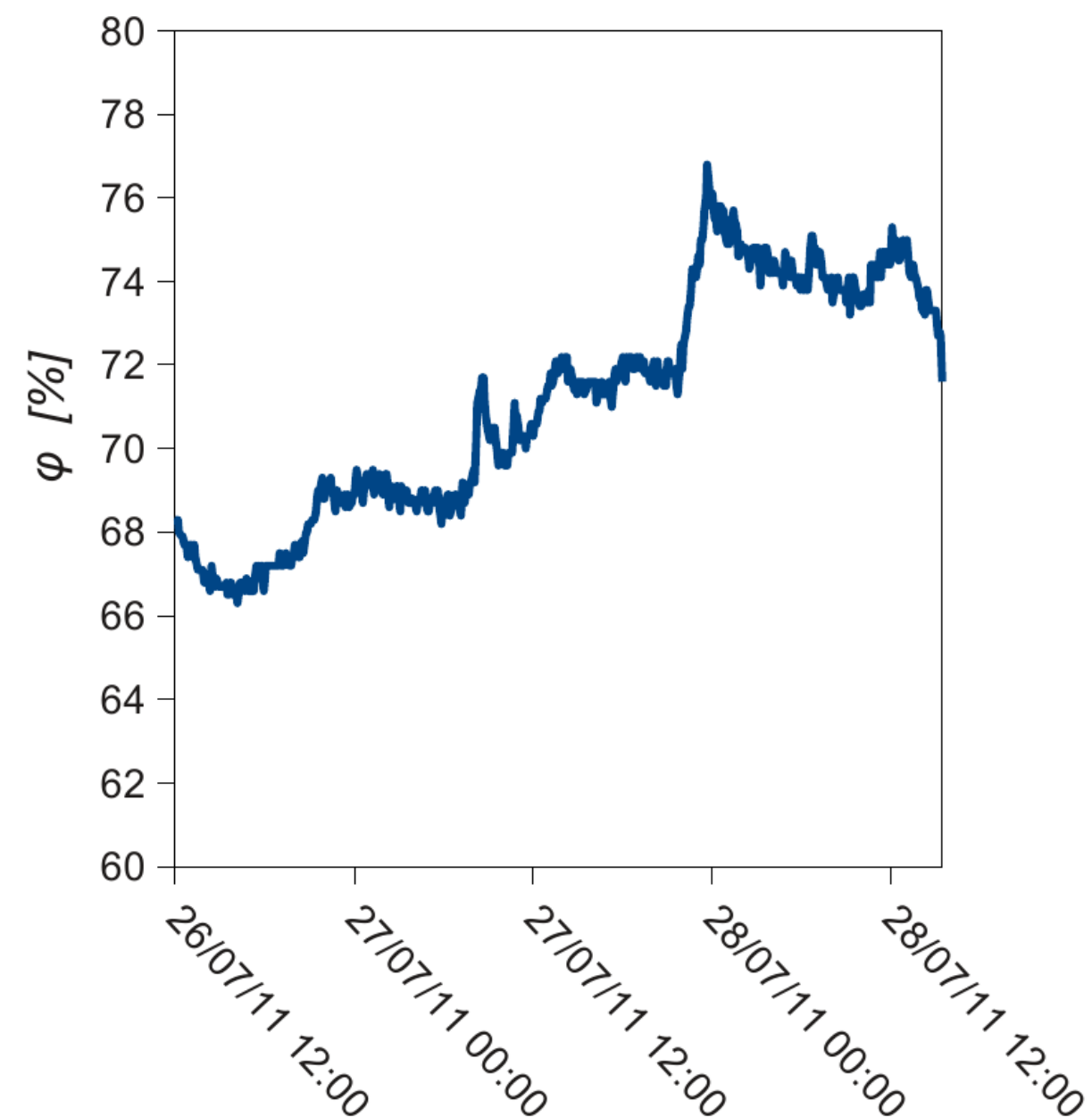




Misure estive



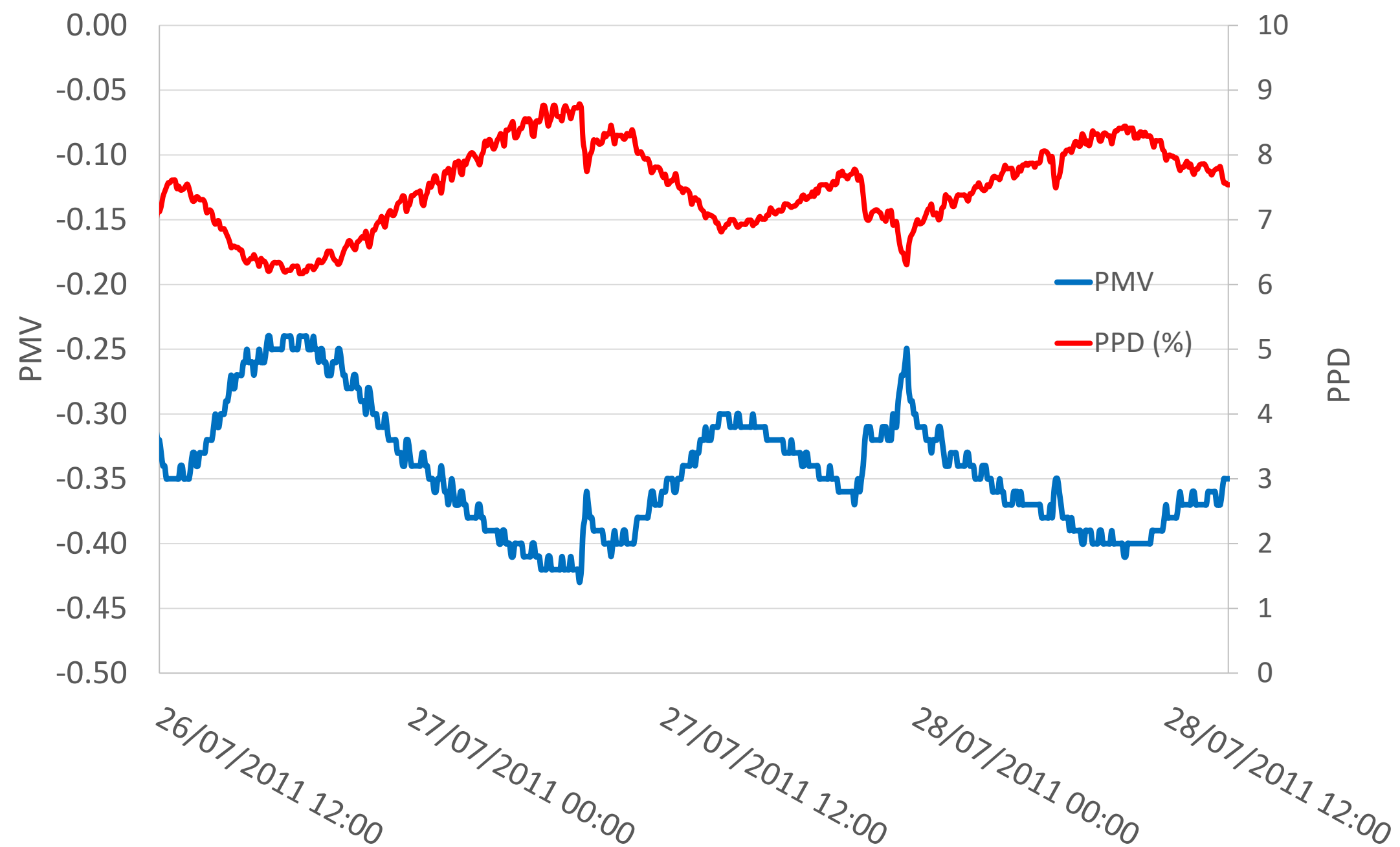
Temperatura



Umidità relativa



PMV e PPD clo 0,6





PMV e PPD clo 0,5

