



---

**Corso**  
**Impianti Termotecnici di bordo**  
**Benessere Termoigrometrico**

---



# Programma

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



# Benessere termoisgrometrico

- 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,  $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$

Attività	Metabolismo (met)
Dormire	0,6
Stare seduti	1
Stare in piedi	1,2
Attività leggera	1,6
Attività media	2
Attività pesante	3
ballare	5

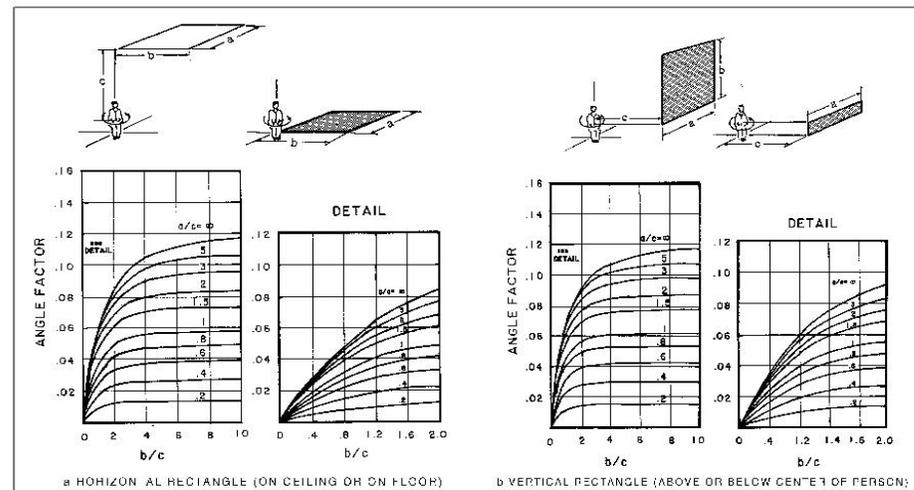
# Flusso ceduto per irraggiamento

- Flusso termico ceduto per irraggiamento

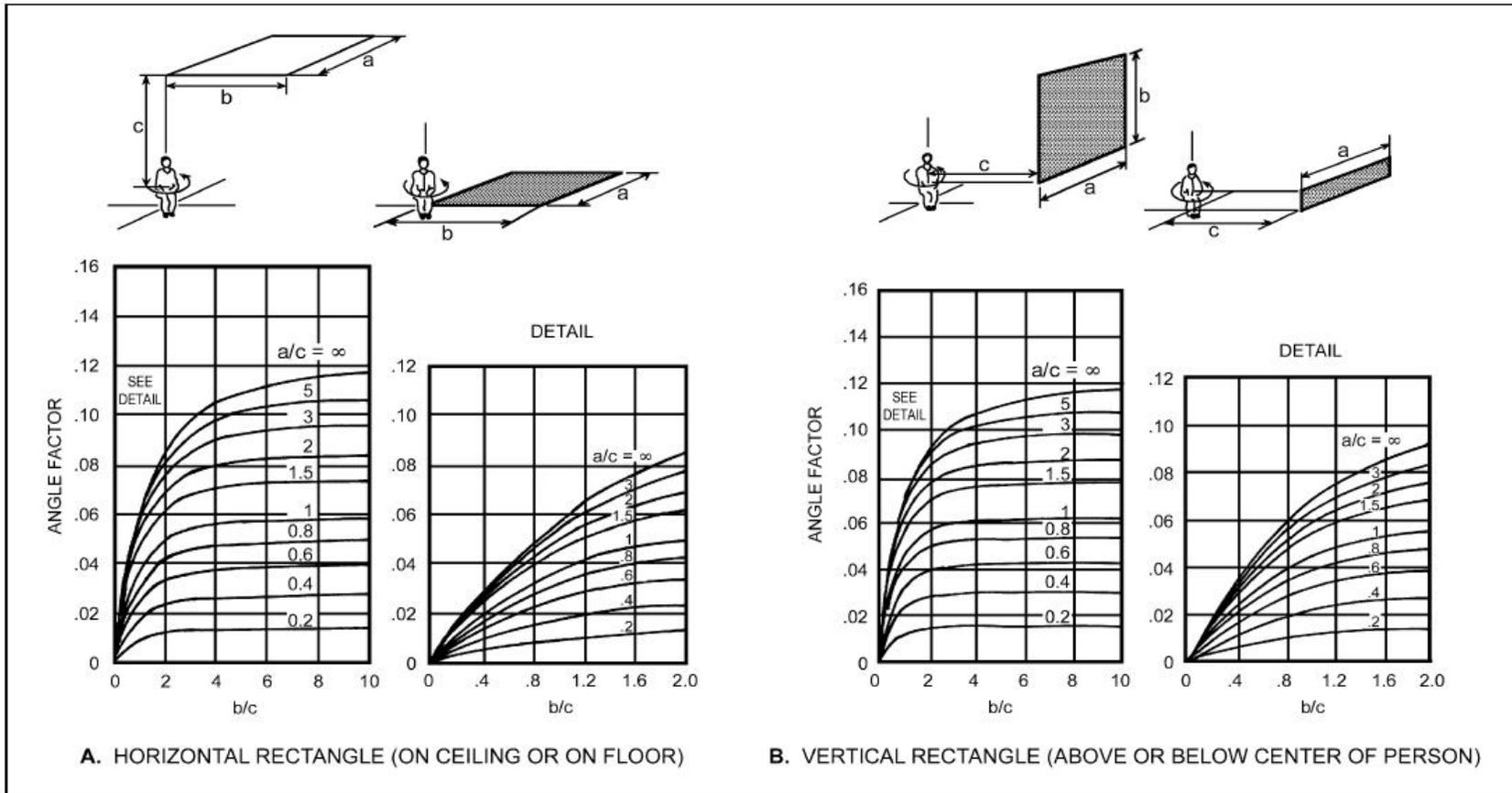
$$q_{12} = A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

- 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 si ricava da

$$(t_{MR} + 273)^4 = \sum_i (t_i + 273)^4 F_{p-i}$$



# Fattori di vista





# Flusso termico sensibile ceduto

- 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
- I flussi ceduti per convezione e irraggiamento , si possono esprimere come

$$C = f_{cl} h_c A_b (t_{cl} - t_a)$$

$$R = f_{cl} h_r A_b (t_{cl} - t_{mr})$$

- $f_{cl}$  coefficiente d'area di abbigliamento,  $f_{cl} = A_{cl}/A_b$
- $t_{cl}$  temperatura esterna abbigliamento
- $A_b$  area del corpo umano

- l'area del corpo si può esprimere con la formula di DuBois

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

# Temperatura operativa e flusso

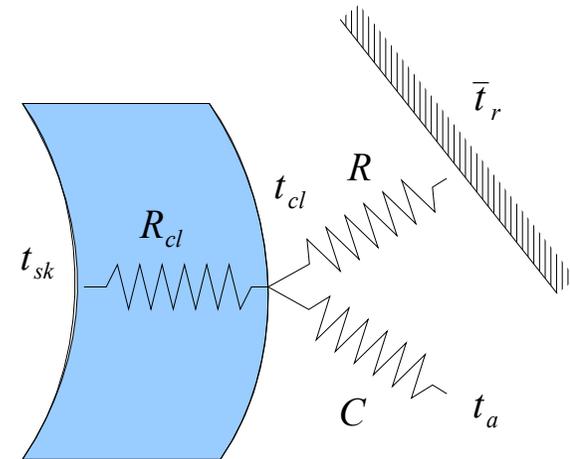
- Il flusso scambiato si esprime come:

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

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

$$h = h_r + h_c$$

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





# 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  $I_{\text{clo}}$
- La resistenza del vestiario al passaggio del vapore può essere espressa come  $R_{\text{cl}}^v = 0,90 R_{\text{cl}}/i_{\text{cl}}$  ( $\text{s m}^2$ )/ $\text{kg}_a$  dove  $i_{\text{cl}}$  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
Invernale (donna)	0,7
Invernale pesante	1,5



# Abbigliamento tipico

Abbigliamento da lavoro	$I_d$		Abbigliamento giornaliero	$I_d$	
	clo	m <sup>2</sup> . KW		clo	m <sup>2</sup> . KW
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



# Comfort termico

- Si può definire il comfort termico come quella situazione in cui si esprime soddisfazione nei riguardi del microclima
- comfort termico globale, si studia tutto il corpo
- comfort locale, si studia il comportamento di una parte del corpo
- entrambe le esigenze devono essere soddisfatte.
- Affinché ci sia situazione di comfort l'equazione di bilancio del corpo umano deve essere soddisfatta, questo si traduce in un'equazione della forma

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

- la temperatura della pelle e flusso termico ceduto per evaporazione possono essere espresse in funzione degli altri parametri, restano quindi sei parametri liberi



# Indici di comfort

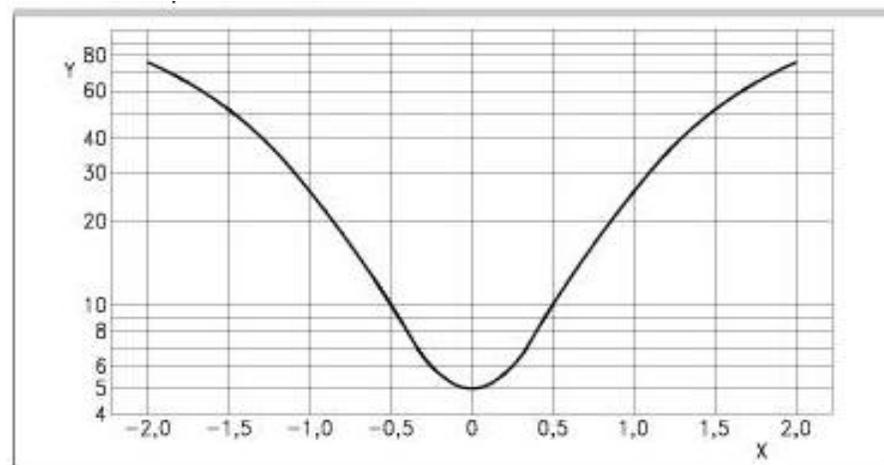
- Sono stati introdotti vari indici per evidenziare uno scostamento dalla situazione di comfort, la norma italiana UNI-EN-ISO 7730 considera l'indice di sensazione *PMV* ( predicted Mean Vote)
- il PMV è un indice di sensazione su una scala di voti funzione dei parametri ambientali e caratteristici del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





# 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.

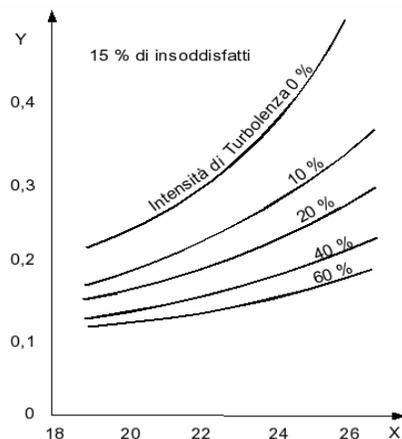
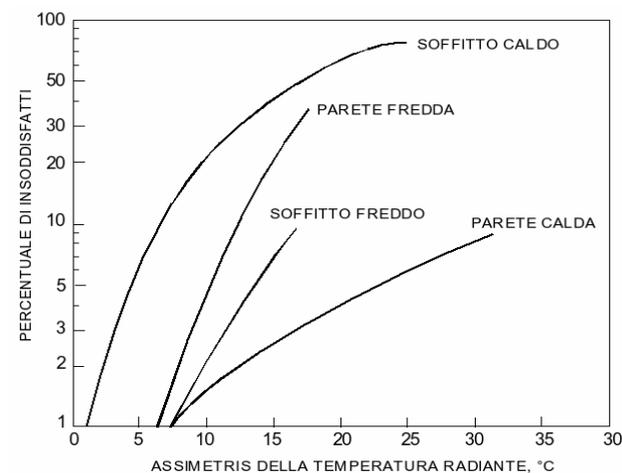


Figura valida per attività leggera, principalmente sedentaria ( $70 \text{ W/m}^2 = 1,2 \text{ met}$ )



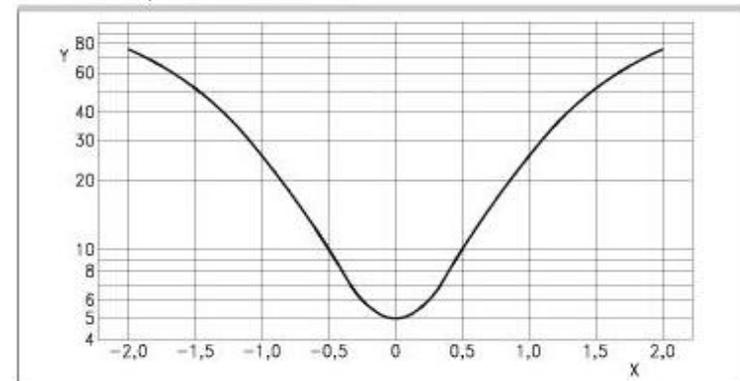
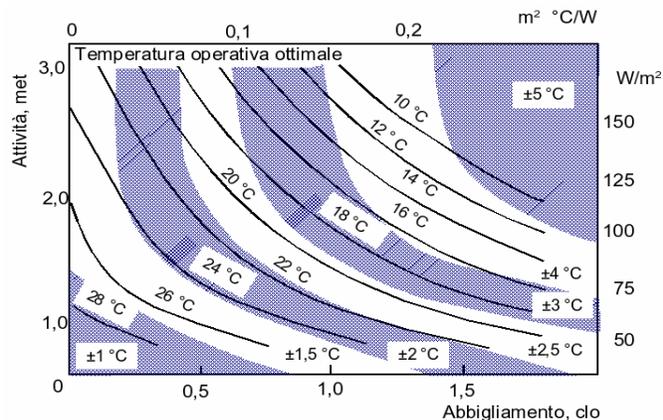


# UNI 7730 - Categoria Edifici

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

# Accettabilità di un Ambiente

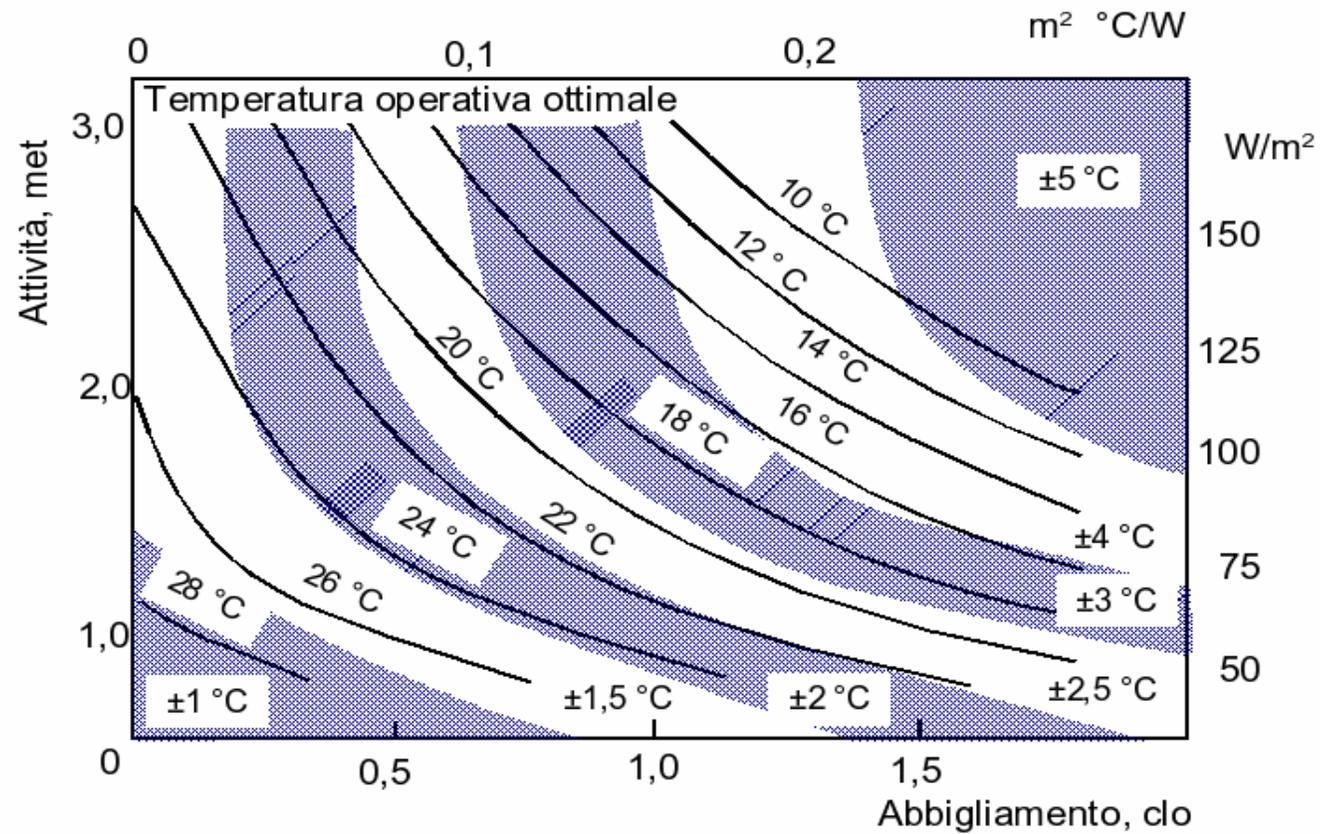
- L'accettabilità di un ambiente può essere definita come quella serie di valori dei parametri ambientali caratterizzati da un PPD inferiore o uguale a una certa soglia.
- Un valore limite comunemente accettato è un PPD inferiore o uguale a 10%, a cui corrisponde un PMV compreso tra -0,50 e +0,50



Le aree ombreggiate indicano l'intervallo di benessere  $\Delta t$  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



# Centralina benessere termico

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



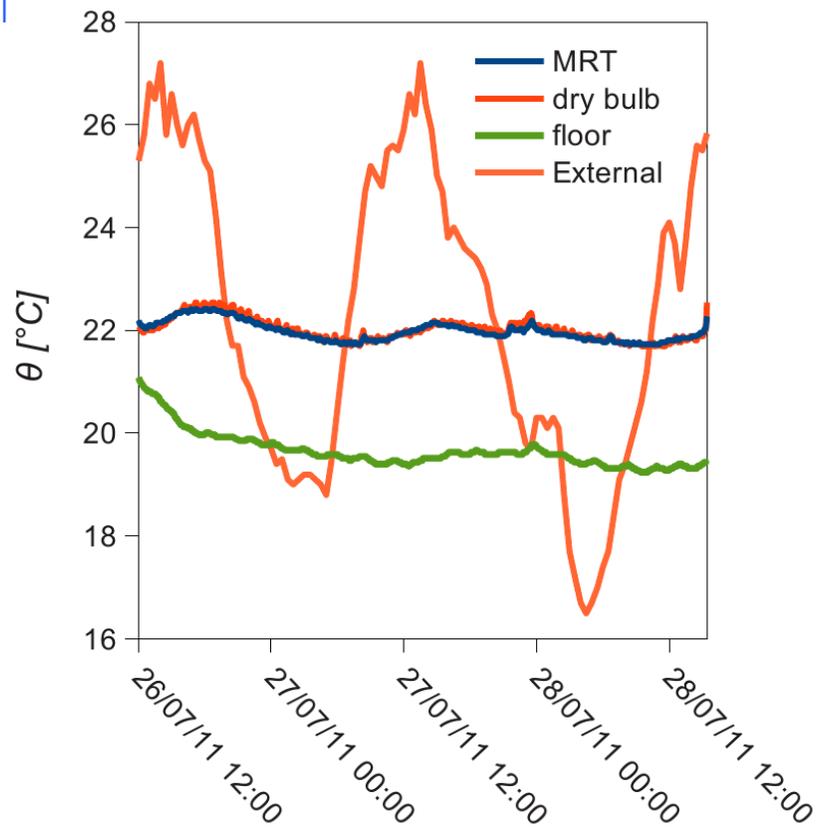


# Sistema Babuc

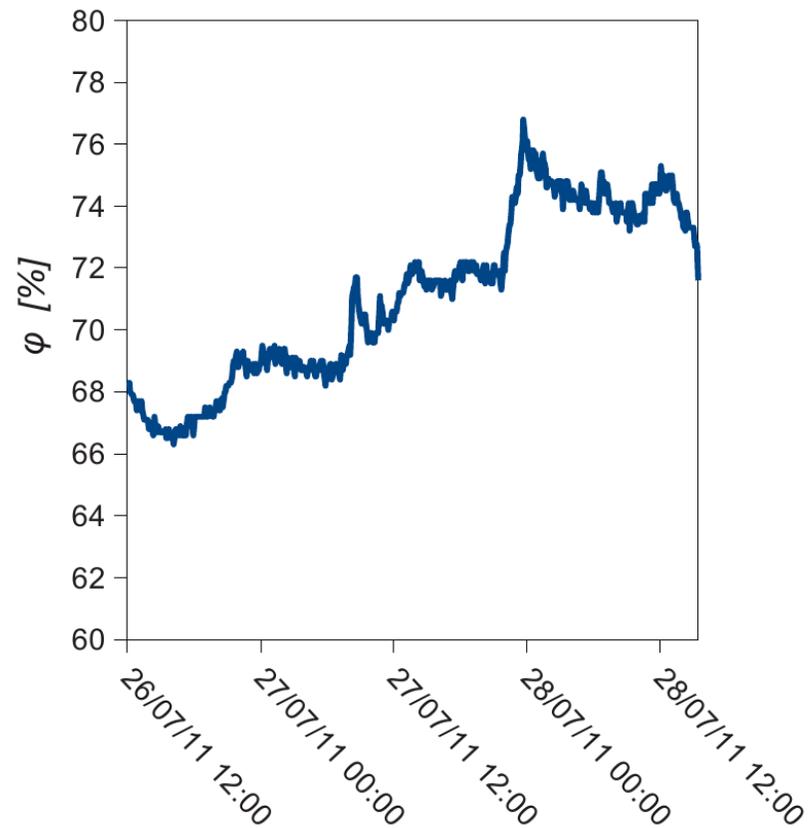




# Misure estive



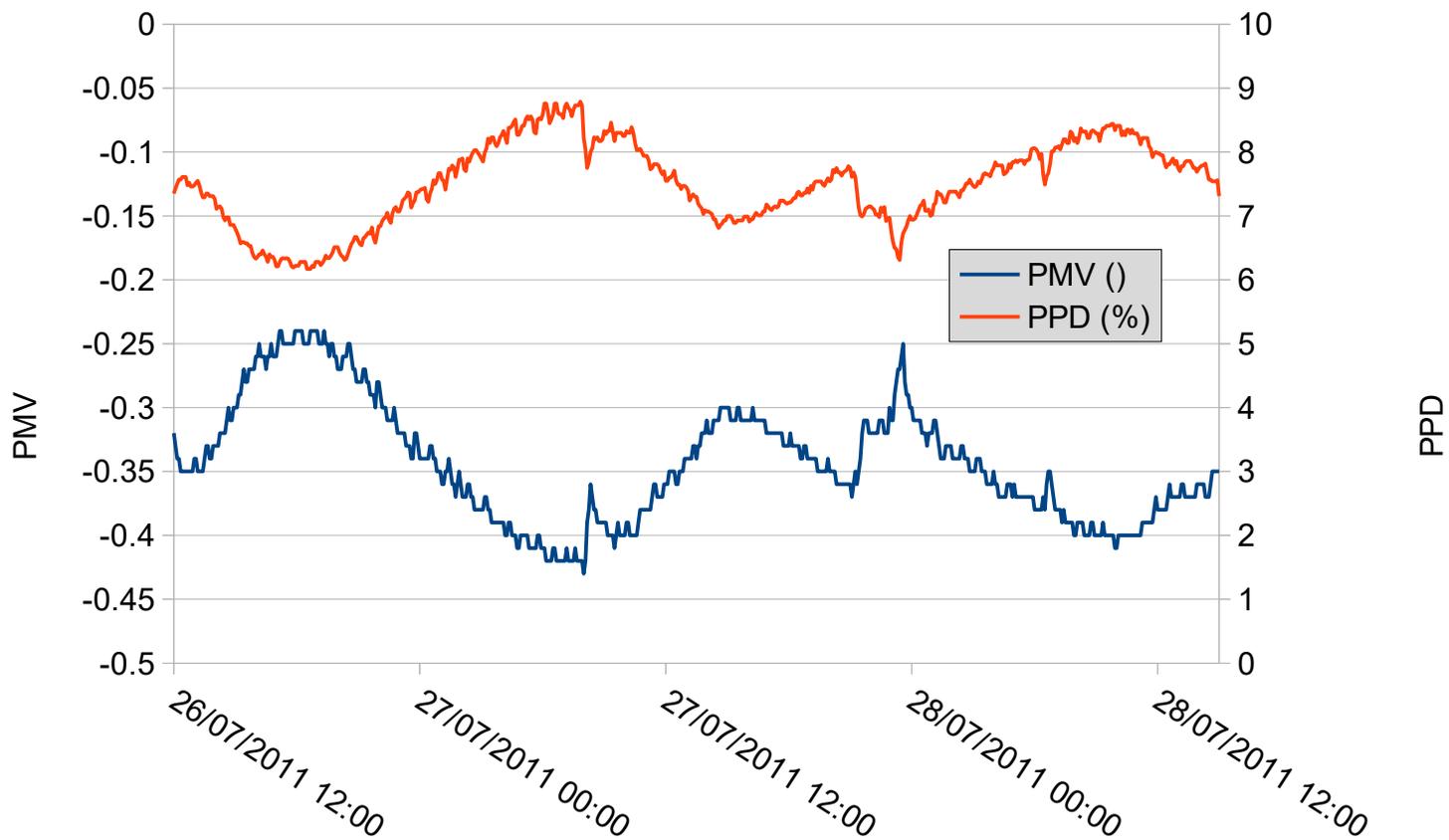
Temperatura



Umidità relativa

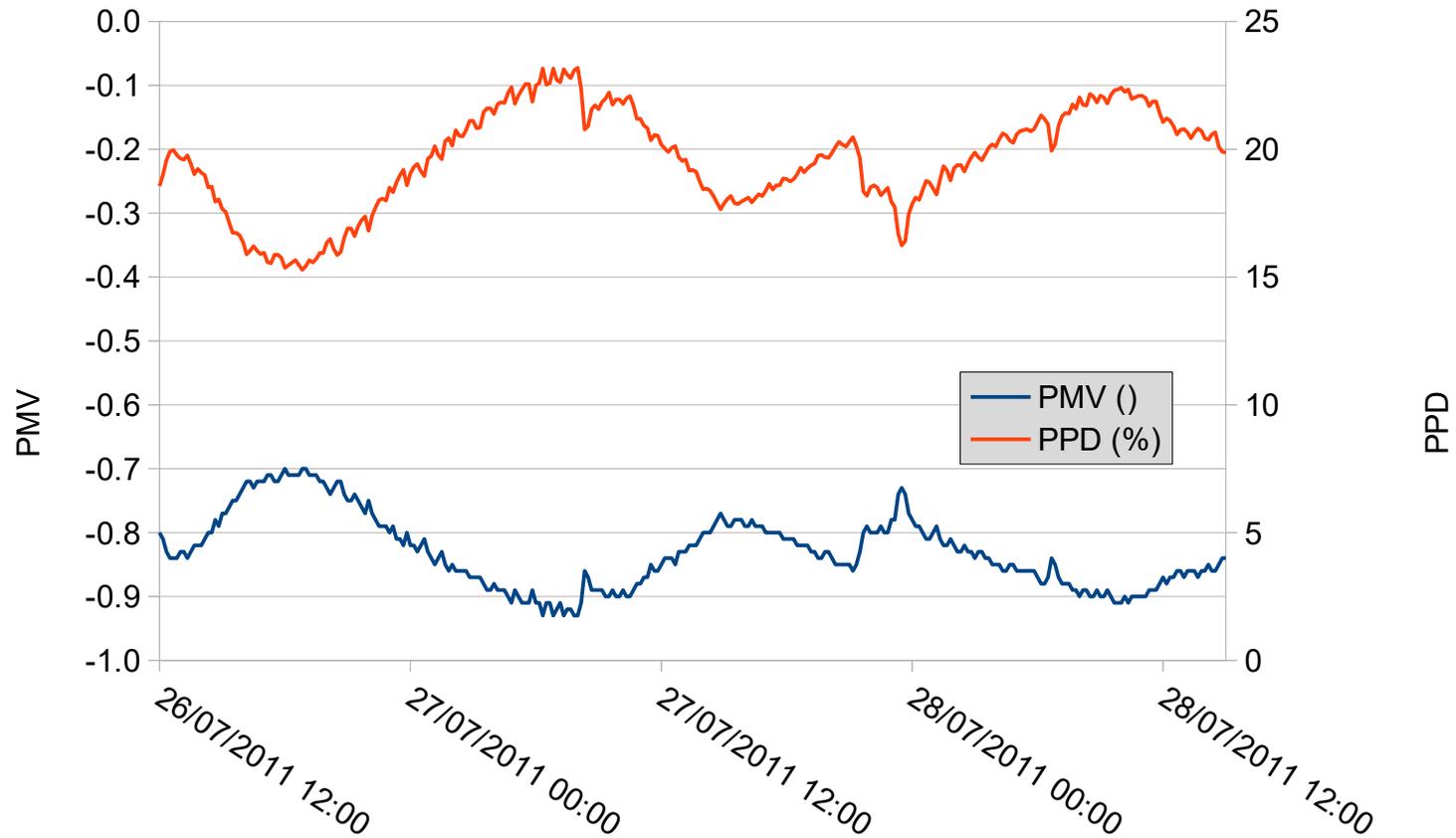


# PMV e PPD clo 0,6





# PMV e PPD clo 0,5





# Rischio condensa

