



Dipartimento di  
Fisica Tecnica  
Università di Padova



SIMEA: Sistema Integrato/distribuito di Monitoraggio Energetico ed Ambientale

**SIMEA WORKSHOP**

**29 Novembre 2010**

# Teoria del comfort e monitoraggio ambientale

*Giacomo Villi*

*Dipartimento di Fisica Tecnica*

*Università di Padova*

e-mail: [giacomo.villi@unipd.it](mailto:giacomo.villi@unipd.it)

# Introduzione

- Per ambiente termico si intende l'insieme delle variabili ambientali che determinano la sensazione termo-igrometrica dell'uomo;
- Il benessere termico corrisponde ad una condizione di mentale di soddisfazione relativa all'ambiente termico.

# Introduzione

- Si definiscono ambienti termici severi tutti i luoghi di lavoro nei quali esistono specifiche esigenze produttive che, vincolando uno o più dei parametri microclimatici (ad es. la temperatura o l'umidità), impediscono di fatto che l'obiettivo del comfort sia realisticamente perseguibile;
- Gli ambienti termici moderati rappresentano gli spazi per i quali l'obiettivo della progettazione termica consiste nel raggiungimento di condizioni di benessere.

## La classificazione degli ambienti termici

- Gli ambienti termici severi sono caratterizzati da:
  - Elevata variabilità temporale e spaziale dei parametri microclimatici;
  - Attività fisica di intensità differenziata;
  - Disuniformità del vestiario indossato (ad es. D.P.I.).
- Il problema della valutazione microclimatica degli ambienti di lavoro è molto sentito negli ambienti severi, caldi e freddi, laddove l'obiettivo della progettazione diventa quello di evitare l'insorgere di patologie (quali stress termici, colpi di calore, ecc.) nelle persone esposte.

# La classificazione degli ambienti termici

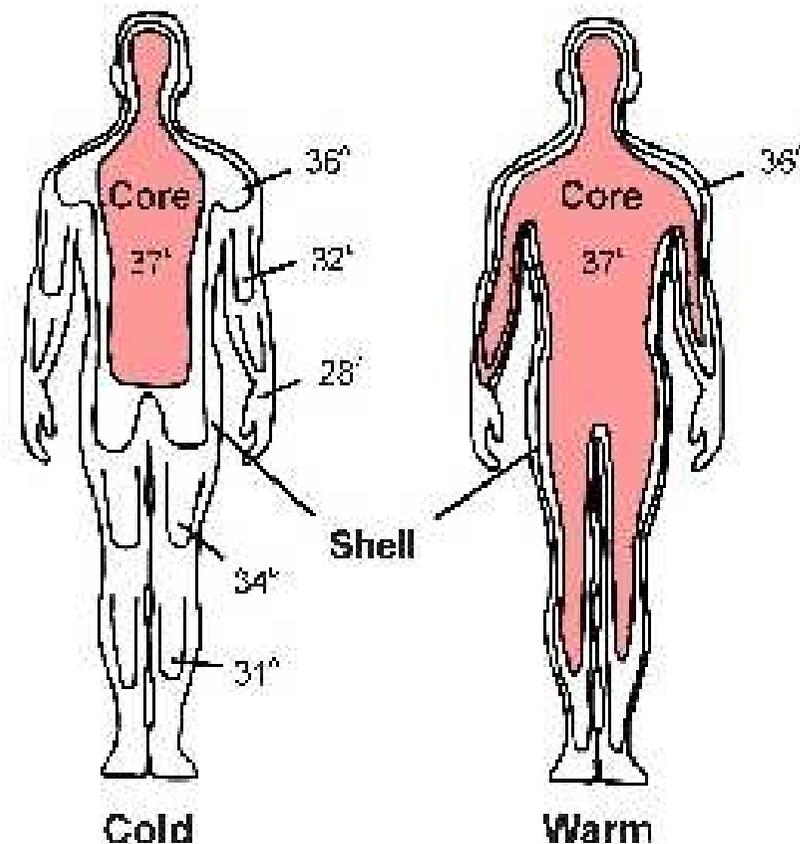
- Gli ambienti termici moderati sono caratterizzati da:
  - Ridotta variabilità temporale e spaziale delle condizioni ambientali;
  - Attività fisica moderata e sostanzialmente analoga per i diversi soggetti presenti;
  - Uniformità del vestiario indossato dai soggetti presenti.
- Laddove le condizioni ambientali proprie di un ambiente termico moderato non rappresentano una minaccia per la salute, la valutazione delle condizioni microclimatiche rientra nell'ambito della necessità generale di assicurare ai lavoratori un certo benessere termico.

## Gli indici microclimatici

- La relazione tra organismo umano e ambiente termico è determinata da una serie di parametri (ad es. temperatura e velocità dell'aria, umidità, attività svolta..) che vanno ad influenzare la sensazione termica in maniera combinata;
- Nessun parametro ambientale, se preso singolarmente, è un indicatore sufficiente a definire un ambiente termico;
- Gli indici microclimatici esprimono l'azione combinata dei diversi parametri ambientali attraverso il valore assunto da un opportuno indice rispetto a dei valori di riferimento.

# La termoregolazione del corpo umano

- La funzione di mantenere quasi isoterma il nucleo del corpo è delegata al sistema di termoregolazione:
  - termoregolazione vasomotoria → capillari periferici dotati di valvole, che aprendosi o chiudendosi, permettono o limitano l'afflusso di sangue;
  - termoregolazione comportamentale.



# Bilancio energetico del corpo umano

- $S = M - (W + E_{\text{res}} + C_{\text{res}} + C + R + E + K)$

dove:

- $S$  = accumulo di energia nel corpo;
- $M$  = metabolismo energetico;
- $W$  = potenza meccanica ceduta all'ambiente;
- $E_{\text{res}}$  = potenza termica ceduta nella respirazione come calore latente;
- $C_{\text{res}}$  = potenza termica ceduta nella respirazione come calore sensibile;
- $C$  = potenza termica ceduta per convezione;
- $R$  = potenza termica ceduta per irraggiamento;
- $E$  = potenza termica ceduta per evaporazione dalla pelle;
- $K$  = potenza termica ceduta per conduzione.

# Bilancio energetico del corpo umano

- Quando il termine di accumulo è pari a zero, la quantità di energia prodotta all'interno del corpo con il metabolismo è pari a quella ceduta dal corpo all'ambiente;
- Quando l'equilibrio termico è mantenuto attraverso un minimo sforzo da parte dei sistemi di termoregolazione, le corrispondenti condizioni microclimatiche possono essere definite di benessere;
- Se invece l'equilibrio è mantenuto solo con sforzo da parte dei meccanismi di termoregolazione (ad es. tramite una abbondante sudorazione) le corrispondenti condizioni microclimatiche saranno di equilibrio ma non di benessere.

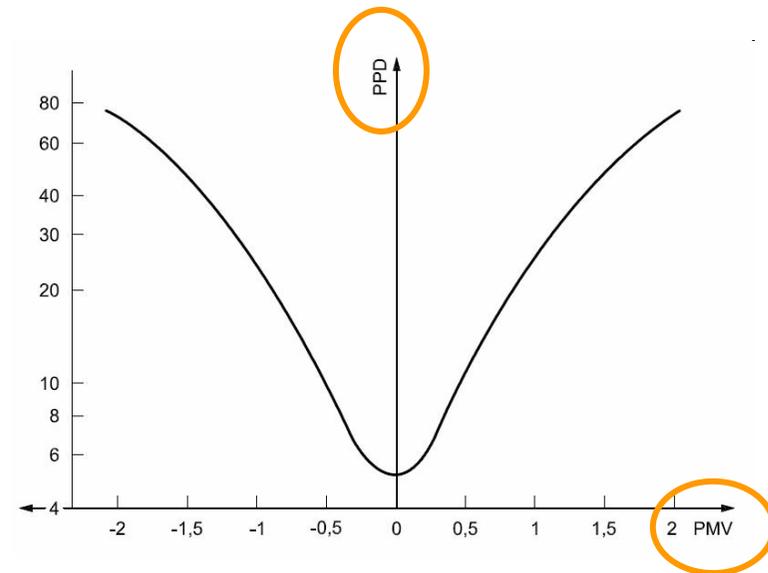
## Gli indici PMV e PPD

- L'indice PMV (*Predicted Mean Vote*) è stato definito da Fanger (1970) ed è ripreso dalle norme UNI EN ISO 7730 e UNI EN 15251;
- Il PMV deriva dall'equazione del bilancio termico, il cui risultato viene rapportato ad una scala di benessere psicofisico;
- Il PMV esprime il parere medio circa la propria sensazione termica di un campione di soggetti posto in determinate condizioni sperimentali.

# Gli indici PMV e PPD

- Il PMV è definito su una scala bipolare a 7 punti secondo la quale a “+3” corrisponde la sensazione di caldo insopportabile, mentre a “-3” fa fronte la condizione di freddo insopportabile;
- Dall’indice PMV è possibile derivare un secondo indice che prende il nome di PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) che quantifica in percentuale i soggetti insoddisfatti in rapporto a determinate condizioni ambientali.

+ 3	Hot
+ 2	Warm
+ 1	Slightly warm
0	Neutral
- 1	Slightly cool
- 2	Cool
- 3	Cold

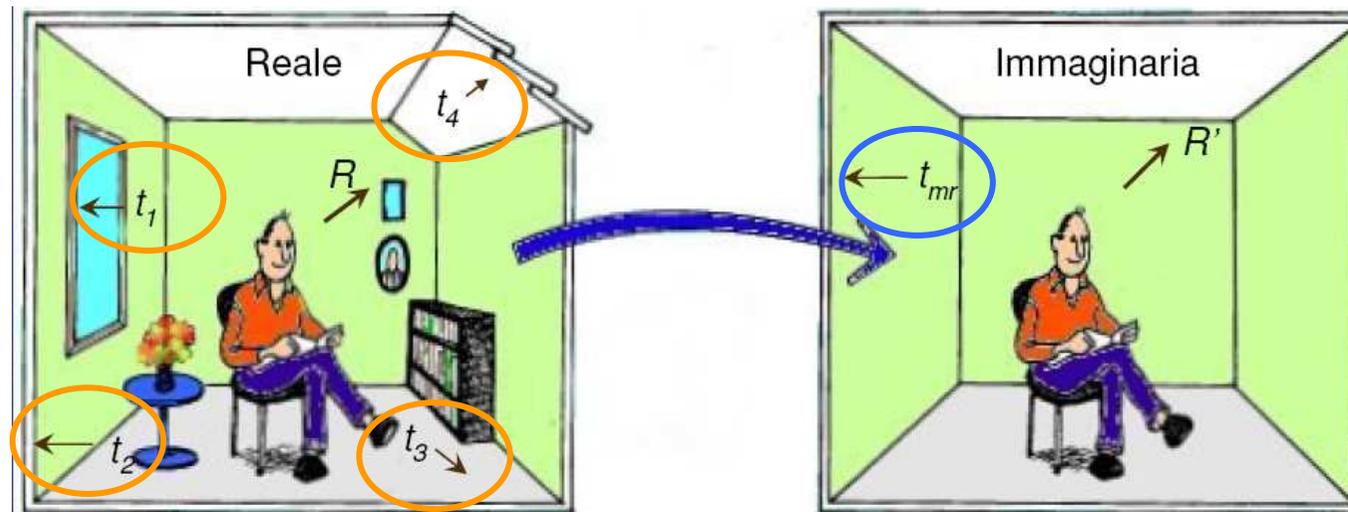


## Gli indici PMV e PPD

- Alla determinazione dell'indice PMV contribuiscono quattro parametri fisici ambientali:
  - temperatura dell'aria ( $t_a$ );
  - velocità dell'aria ( $v_a$ );
  - temperatura media radiante ( $t_{mr}$ );
  - umidità relativa (UR).
- E due grandezze relative al soggetto:
  - attività svolta, cioè il metabolismo energetico (M);
  - resistenza termica dell'abbigliamento ( $I_{cl}$ ).

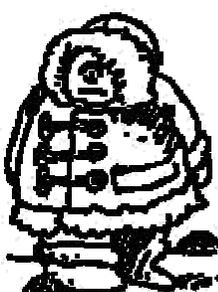
# Temperatura media radiante

- Temperatura “immaginaria” di una cavità, nera ed isoterma, in cui un individuo scambierebbe la medesima potenza termica per radiazione che scambia nell’ambiente reale (non uniforme).

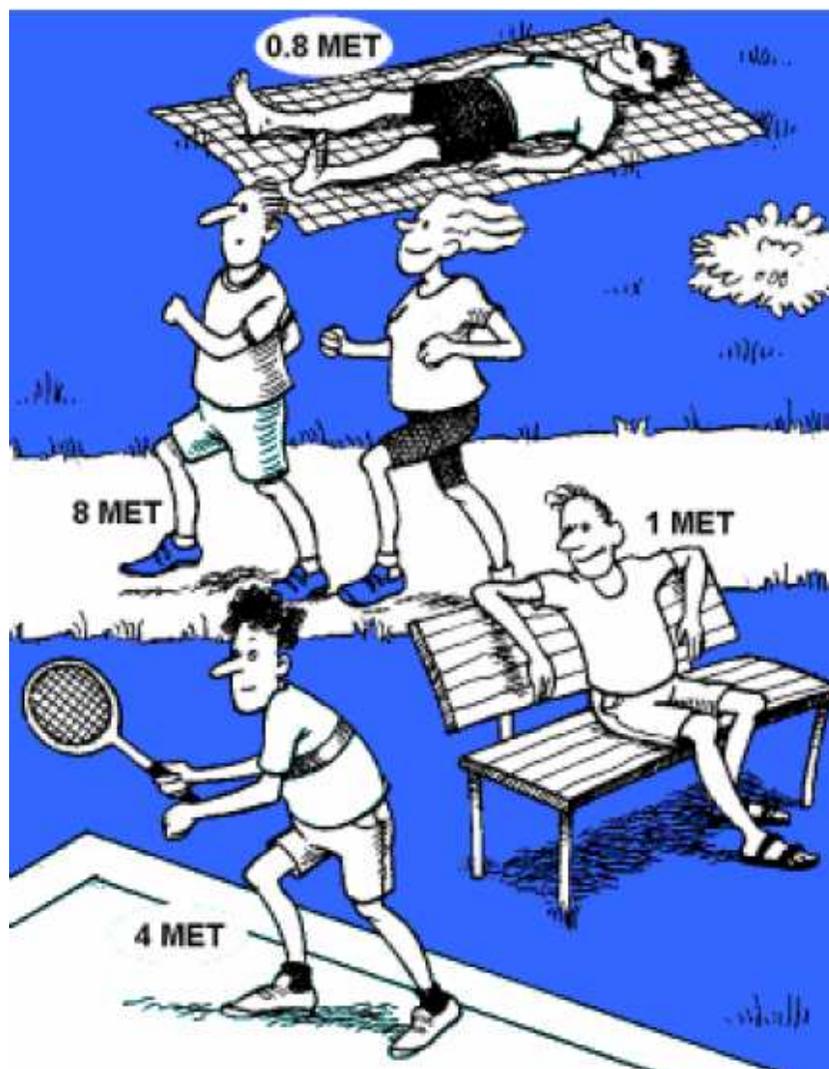


Eguale potenza termica scambiata per radiazione:  $R = R'$

# La resistenza dovuta al vestiario

	<p>0 clo</p> <p>Nudo</p>		<p>0,5 clo</p> <p>Biancheria corta Pantaloni leggeri di cotone Camicia a maniche corte con collo slacciato</p>
	<p>1,0 clo</p> <p>Biancheria corta Abito normale con pantaloni</p>		<p>1,5 clo</p> <p>Biancheria lunga Abito pesante con pantaloni Calze di lana</p>
	<p>2,0 clo</p> <p>Biancheria corta Abito pesante con pantaloni Calze di lana Scarpe pesanti Soprabito pesante di lana Cappello e Guanti</p>		<p>4,0 clo</p> <p>Abito polare</p>

# L'attività metabolica



## La temperatura operativa

- Risulta utile trattare gli scambi termici per convezione e radiazione mediante un unico parametro chiamato temperatura operativa definito dalla combinazione tra temperatura dell'aria e temperatura media radiante:

$$t_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c}$$

$$t_o = \frac{\bar{t}_r + t_a}{2}$$

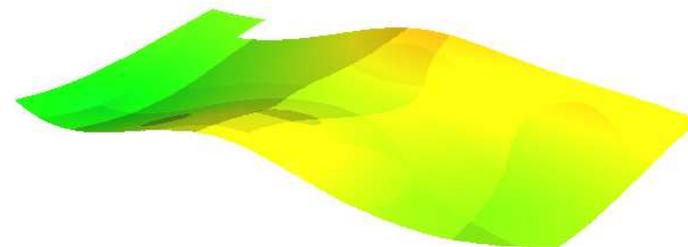
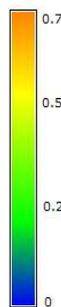
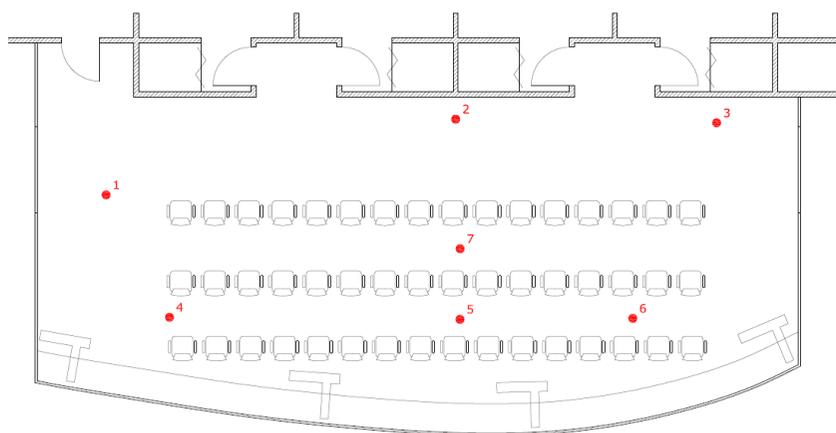
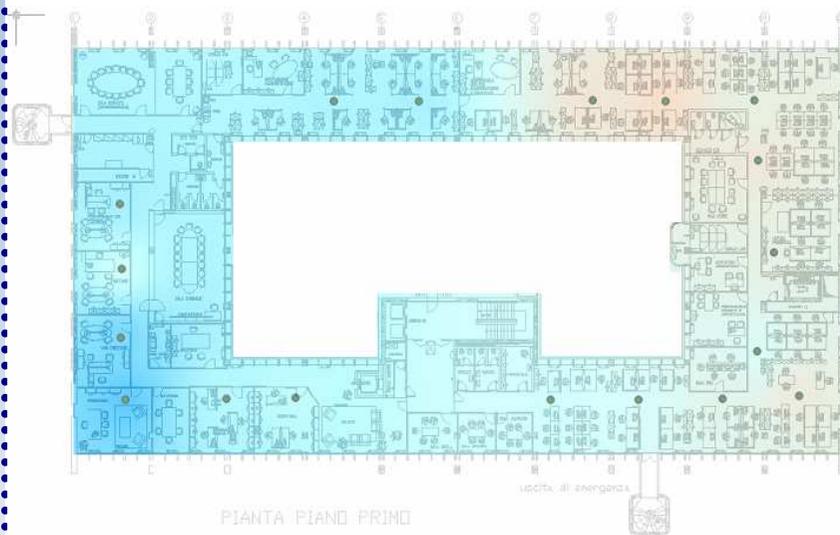
# La determinazione degli indici PMV e PPD



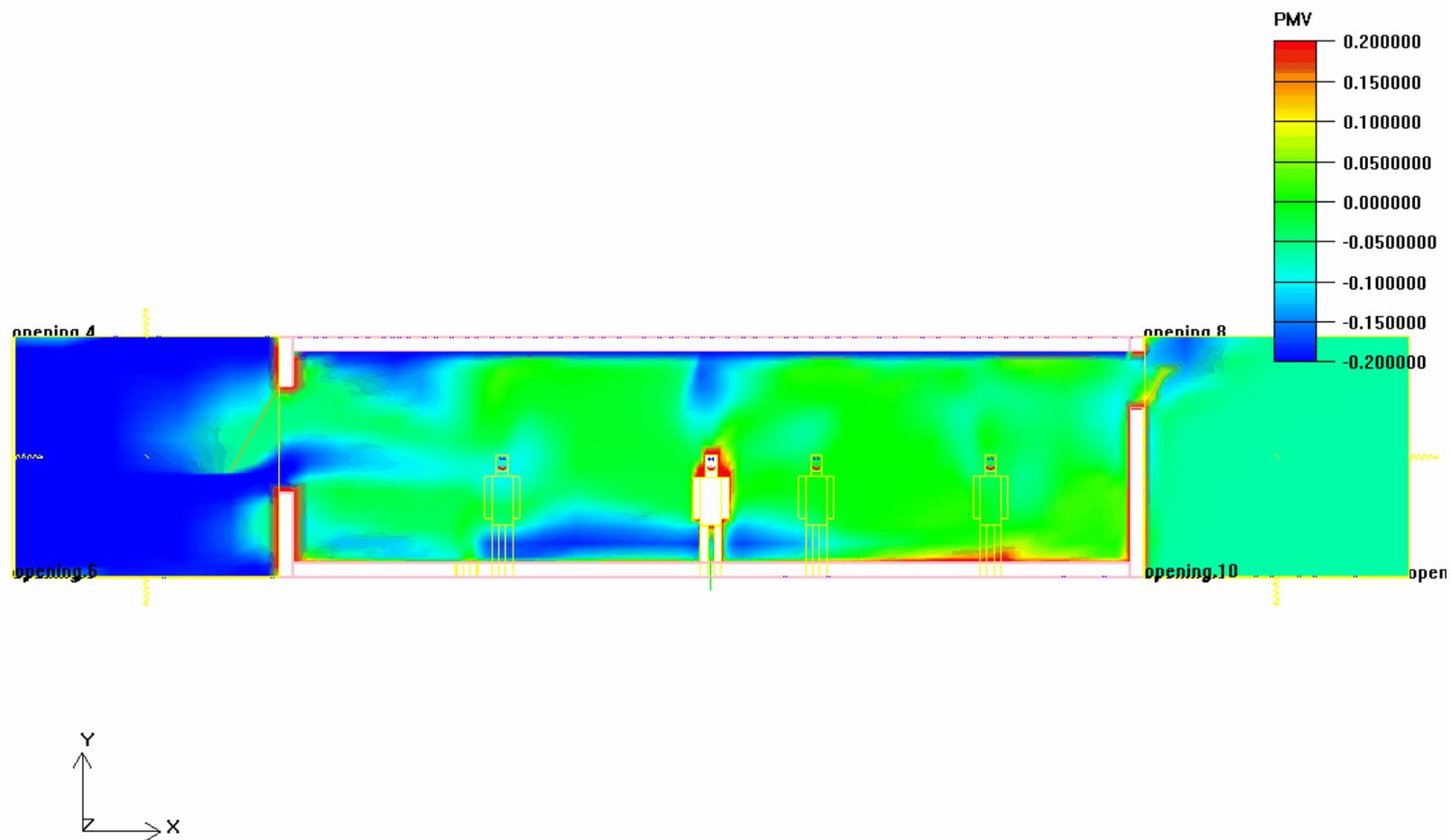
# La determinazione degli indici PMV e PPD



# La determinazione degli indici PMV e PPD



# La determinazione degli indici PMV e PPD



# La determinazione degli indici PMV e PPD

Class List

- [.....] Table:MultiVariableLookup
- Fluid Properties
  - [.....] FluidProperties:Names
  - [.....] FluidProperties:GlycolConcentrations
  - [.....] FluidProperties:Temperatures
  - [.....] FluidProperties:Saturated
  - [.....] FluidProperties:Superheated
  - [.....] FluidProperties:Concentration
- Economics
  - [.....] CurrencyType
  - [.....] ComponentCost:Adjustments
  - [.....] ComponentCost:Reference
  - [.....] ComponentCost:LineItem
  - [.....] UtilityCost:Tariff
  - [.....] UtilityCost:Quality
  - [.....] UtilityCost:Charge:Simple
  - [.....] UtilityCost:Charge:Block
  - [.....] UtilityCost:Ratchet
  - [.....] UtilityCost:Variable
  - [.....] UtilityCost:Computation
  - [.....] LifeCycleCost:Parameters
  - [.....] LifeCycleCost:RecurringCosts
  - [.....] LifeCycleCost:NonrecurringCost
  - [.....] LifeCycleCost:UsePriceEscalation
  - [.....] LifeCycleCost:UseAdjustment

Comments number

Explanation of Keyword

each Output:Variable command picks variables to be put onto the standard output file (.eso) some variables may not be reported for every simulation. a list of variables that can be reported are available after a run on the report dictionary file (.rdd) if the Output:VariableDictionary has been requested.

ID: A2  
Select from list of objects

Field	Units	Obj23	Obj24	Obj25	Obj26	Obj27
Key Value		*	*	*	*	*
Variable Name		Zone Air Balance 0	Zone Air Balance S	Zone Air Balance Ai	FangerPMV	FangerPPD
Reporting Frequency		timestep	timestep	timestep	Hourly	Hourly
Schedule Name		ReportSch	ReportSch	ReportSch		

Output Data

userdefined  
 default

Thermal Zones

thermal zones

No.	ThermalZone
	TEST

Possible Thermal Zones

NTypes

zone outputs  
 group of zone outputs  
 surface outputs  
 balances

No.	NType	Key	Additional Data
24	TMSURF		weighted mean surface temperature of zone
25	TOP		operative zone temperature
26	QVAPW		threat of vapour adsorption in walls of zone
27	QUA		static UA-transmission losses of zone (UA*gT using the u-va
28			values of all schedules
29	ABSHUM		absolute humidity of zone
30	QHEAT		sensible heating demand of zone (positive values)
31	QCDDL		sensible cooling demand of zone (positive values)
56	QSEC		secondary heat flux of all windows of zone
62	PMV		predicted mean vote (PMV) value of zone
63	PPD		predicted percentage of dissatisfied persons (PPD) of zone
69	QTSGL		total solar absorption on all panes of all windows of zone

Possible Outputs (NTYPES)

OK Cancel

## Riferimenti legislativi e normativi

- D.Lgs. 81/2008 Allegato IV – Requisiti dei luoghi di lavoro – 1.9 Microclima;
- UNI EN ISO 7730: 2006. Ambienti termici moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico;
- UNI EN ISO 7726: 2002. Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche.

## Riferimenti legislativi e normativi

- UNI EN 15251: 2008. Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica;
- UNI EN 27243: 1996. Ambienti caldi. Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globotermometro).

## Riferimenti legislativi e normativi

- UNI EN ISO 7933: 2005. Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile;
- UNI EN ISO 11079: 2008. Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l'utilizzo dell'isolamento termico dell'abbigliamento richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale.

GRAZIE PER LA VOSTRA  
ATTENZIONE