

Universidade de São Paulo  
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo  
Departamento de Tecnologia

# Conforto térmico em espaços abertos

Prof. Dr. Leonardo M. Monteiro  
LABAUT/FAUUSP

# Fundamentos

# Conforto térmico

“that *state of mind* which expresses satisfaction with the thermal environment”  
(ASHRAE 55)

conforto térmico ~ mínimo esforço fisiológico



aspectos subjetivos x termo-fisiológicos



foco no ocupante ao invés dos aspectos técnicos

# Organismo Humano

Homeotermo:  $32^{\circ}\text{C} < T_i < 42^{\circ}\text{C}$  ( $\sim 36,1 - 37,2^{\circ}\text{C}$ )

O corpo humano é uma máquina térmica

a energia é produzida pelo organismo por meio de reações químicas  
 $\text{C} \rightarrow \text{alimentação} + \text{O}_2 \rightarrow \text{respiração: Metabolismo}$

O organismo por meio do metabolismo produz e adquire energia:

20%  $\rightarrow$  transformada em trabalho  $\rightarrow$  baixo rendimento;

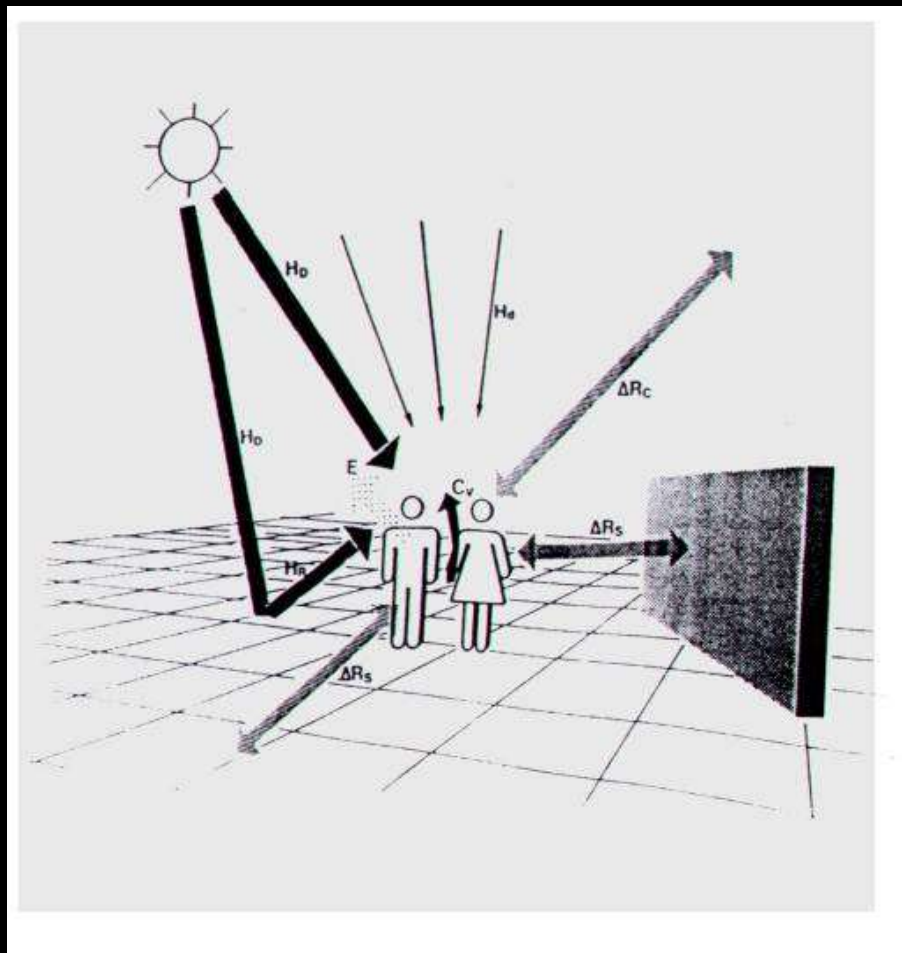
80%  $\rightarrow$  calor que deve ser dissipado para manter temperatura corporal

Mecanismos de trocas térmicas entre corpo e ambiente:

trocadas secas (condução, convecção e radiação) - calor sensível

trocadas úmidas (evaporação) - calor latente

# Balanço térmico do corpo humano



## Termogênese

Metabolismo (produção de calor)

## Termólise

Condução (desprezível)

Convecção  $C_v$  troca por convecção

## Radiação

$H_D$  ganho por radiação direta

$H_d$  ganho por radiação difusa

$H_r$  ganho por radiação refletida

$\Delta R_c$  troca por radiação céu

$\Delta R_s$  troca por radiação entorno

## Evaporação

Respiração (sensível + latente)

# Aclimatação e Adaptação



**Expectativas quanto às condições ambientais variam com:**

- clima
- época do ano
- características do ambiente interno ou externo
  - função a ser desempenhada
  - padrões de comportamento
  - experiência prévia





# Qualificação x Quantificação

Questões para a avaliação de desempenho de edifícios e espaços abertos

O que se quantifica?

Qual é a exatidão da quantificação?

Como transformar a quantificação em dado de projeto?



# Variáveis do conforto

1. Metabolismo (MET)

2. Vestimenta (CLO)

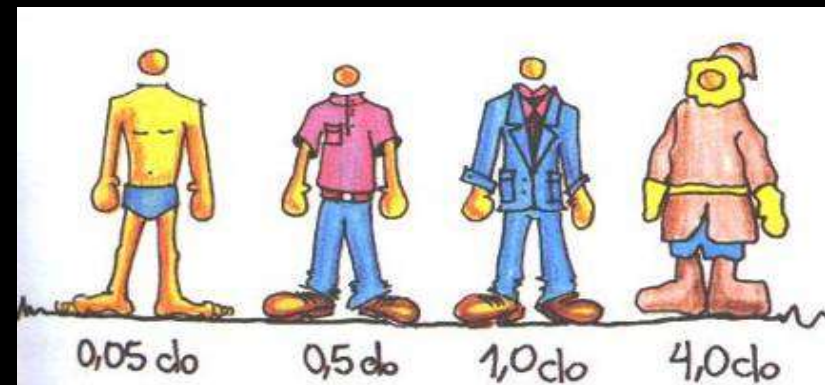
3. Parâmetros que descrevem termicamente o ambiente

Temperatura do ar

Temperatura radiante média

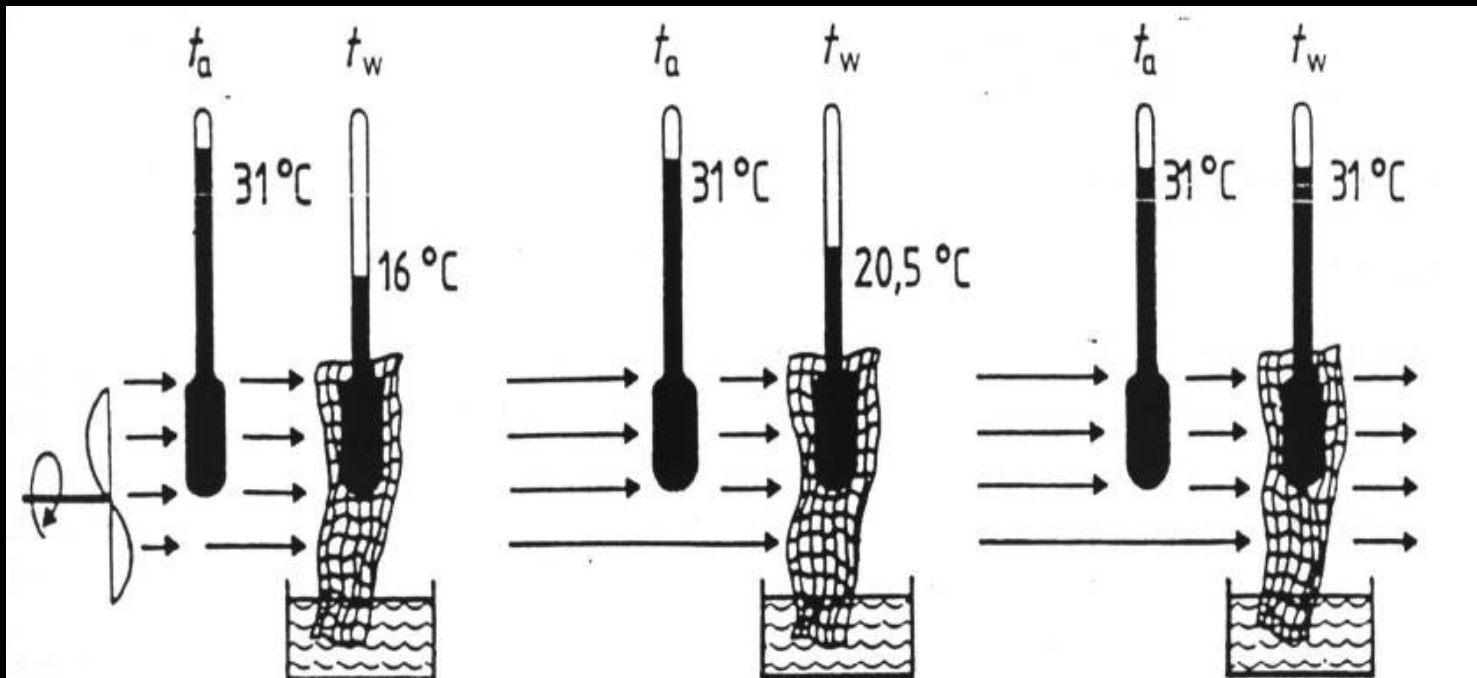
Velocidade do ar

Umidade do ar



Fonte: LAMBERTS. Roberto, et al. *Eficiência Energética na Arquitetura*

# Temperatura de Bulbo Seco Temperatura de Bulbo Úmido



**$p_v = 0,8 \text{ kPa}$**

Baixa umidade

**$p_v = 1,7 \text{ kPa}$**

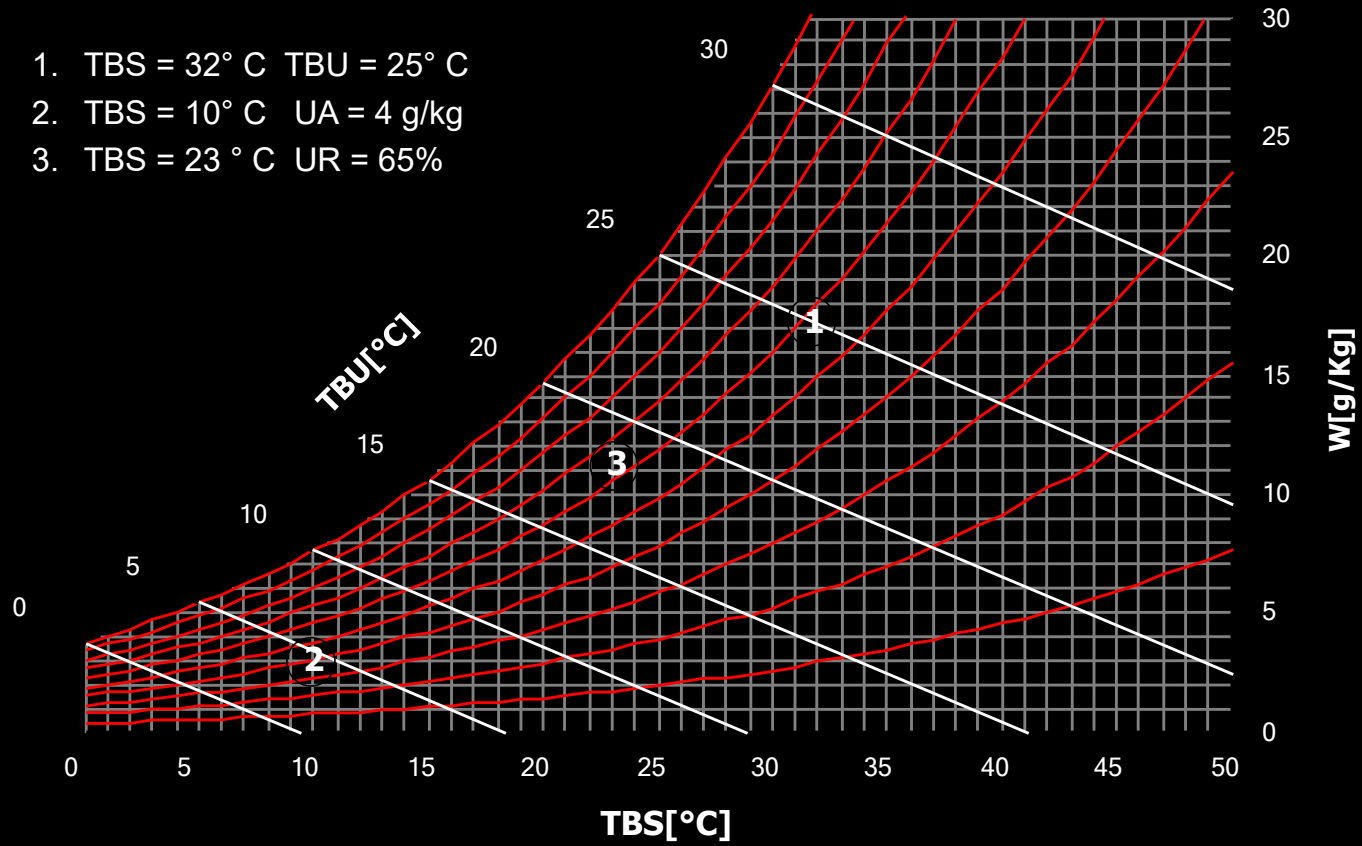
Umidade normal

**$p_v = 4,5 \text{ kPa}$**

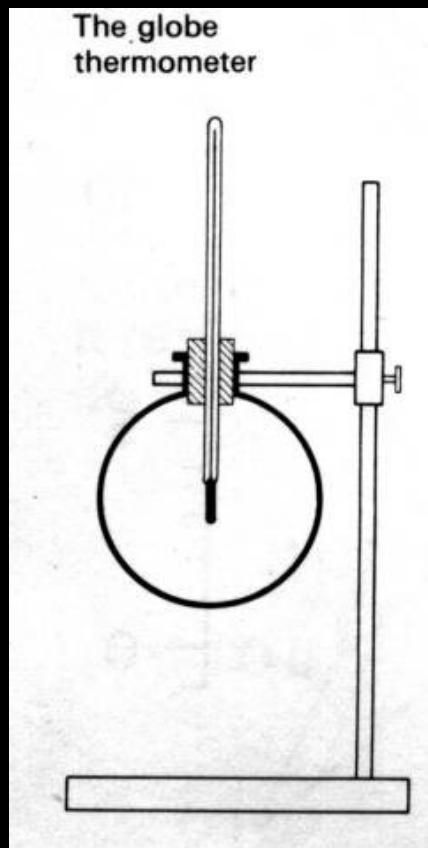
Ar saturado

# Carta Psicrométrica

1. TBS = 32° C TBU = 25° C
2. TBS = 10° C UA = 4 g/kg
3. TBS = 23° C UR = 65%



# Temperatura radiante média (Trm) Termômetro de globo (Tg)



## Cálculo de TRM a partir de Tg

$$trm = \{(tg + 273)^4 + [(0,25 \cdot 10^8)/Eg] \cdot (|tg - tar| / D)^{1/4} \cdot (tg - tar)\}^{1/4} - 273$$

$$trm = \{(tg + 273)^4 - [(1,1 \cdot 10^8 \cdot var \ 0,6) / (Eg \cdot D^{0,4})] \cdot (tg - tar)\}^{1/4} - 273$$

trm = temperatura radiante média, em °C

tg = temperatura de globo, em °C

Eg = emissividade do globo, adimensional

D = diâmetro do globo, em m

var = velocidade do ar, em m/s

# Velocidade do ar

## Magnitude e direção

O aumento da velocidade do ar aumenta a troca de calor entre o corpo e o ar

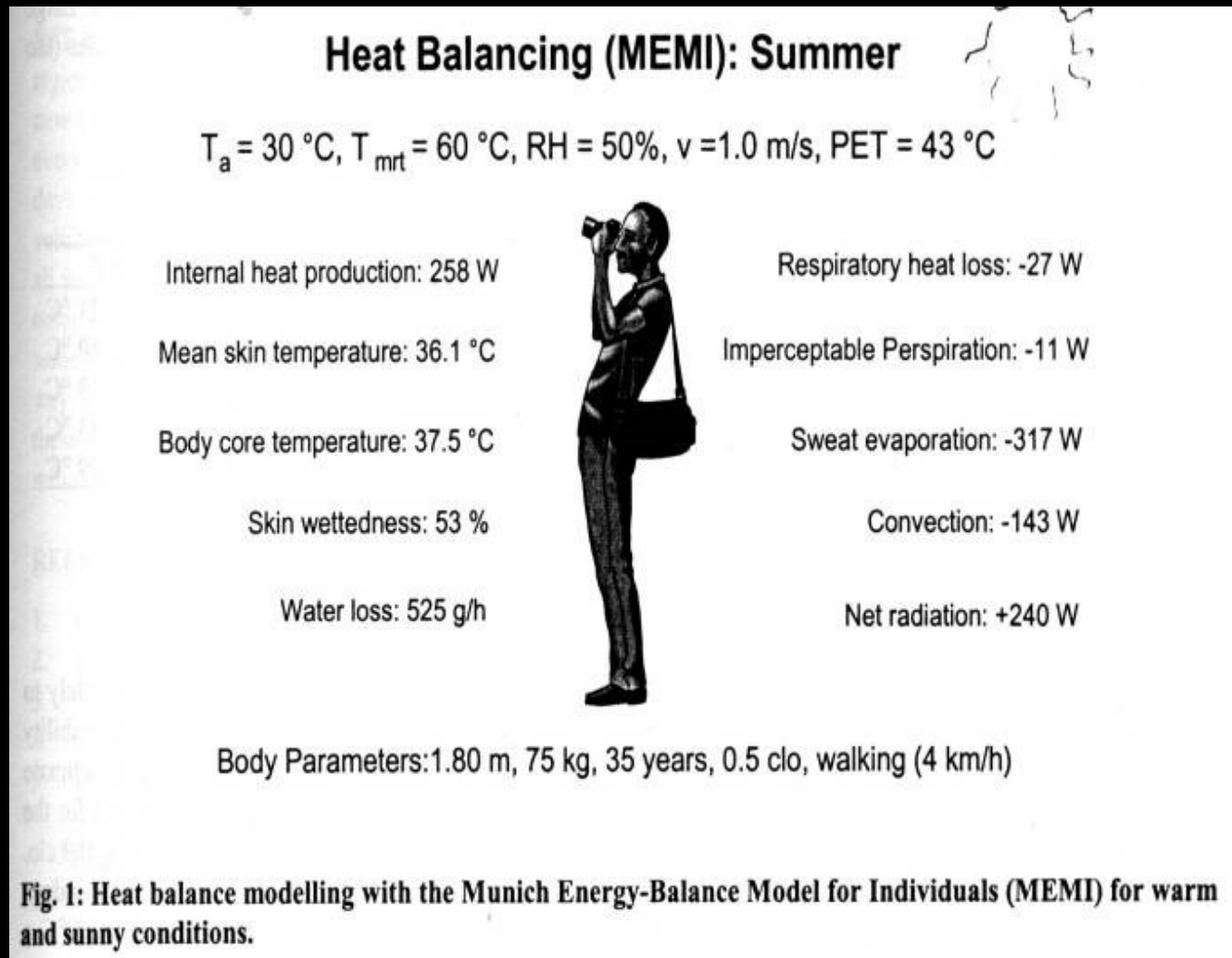
Se o ar está mais frio do que superfície do corpo ( $\pm 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a sensação será de resfriamento

Se o ar está mais quente do que superfície do corpo a sensação será de aquecimento

# Conforto em espaços abertos

# PET: Physiological Equivalent Temperature

Hoppe (1999)





# PET: Physiological Equivalent Temperature

Hoppe (1999)

Table 1: Examples of PET-values for different climate scenarios ( $T_a$  = air temperature,  $T_{mrt}$  = mean radiant temperature,  $v$  = air velocity,  $VP$  = water vapour pressure).

	$T_a$	$T_{mrt}$	$v$	$VP$	$PET$
Typical room	21 °C	21 °C	0.1 m/s	12 hPa	21 °C
Winter, sunny	-5 °C	40 °C	0.5 m/s	2 hPa	10 °C
Winter, shade	-5 °C	-5 °C	5.0 m/s	2 hPa	-13 °C
Summer, sunny	30 °C	60 °C	1.0 m/s	21 hPa	43 °C
Summer, shade	30 °C	30 °C	1.0 m/s	21 hPa	29 °C

# UTCI - Índice termo-climático universal

Universal Thermal Climate Index (UTCI)  
Commission 6 of International Society of Biometeorology (ISB)

Válido para todos os climas, estações e escalas, da micro à macro

Modelo termofisiológico, derivado como uma temperatura equivalente em °C  
Modelo de múltiplos nós

Ambiente de referência

$t_{mrt} = t_a$

relative humidity = 50%

still air with relative air velocity of 1.1 m/s

metabolism = 135 W/m<sup>2</sup>

clothing resistance  $I_{clo} = 0.5 \sim 2.0$  clo

# Novos índices empíricos

## **TS: Thermal Sensation**

Givoni & Noguchi (2000)

$$TS = 1,7 + 0,118 \cdot tar + 0,0019 \cdot IH - 0,322 \cdot v - 0,0073 \cdot ur + 0,0054 \cdot ts,ent$$

## **NWCT: New Wind Chill Temperature**

Bluestein & Osczevski (2002)

$$NWCT = 13,12 + 0,6215 \cdot tar - 11,37 \cdot v^{10 \cdot 0.16} + 0.3965 \cdot tar \cdot v^{10 \cdot 0.16}$$

para  $tar \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $v^{10} \geq 4,8 \text{ km/h}$

## **ASV: Actual Sensation Vote**

Nikolopoulou (2004)

$$ASV = 0,049 \cdot tar + 0,001 \cdot H + 0,051 \cdot var + 0,014 \cdot ur$$

## **TEP: Temperature of Equivalent Perception**

Monteiro & Alucci (2008)

$$TEP = -3,777 + 0,4828 \cdot tar + 0,5172 \cdot trm + 0,0802 \cdot ur - 2,322 \cdot var$$

# TEP: Temperature of Equivalent Perception

Monteiro (2018)

$$\text{TEP} = -29,877 + 0,4828 \cdot \text{tar} + 0,5172 \cdot \text{trm} + 0,0802 \cdot \text{ur} - 2,322 \cdot \text{var} - 0,1742 \cdot \text{tm} + 5,118 \cdot \text{M} + 38,023 \cdot \text{Icl}$$

<b>sensação</b>	<b>TEP</b>
<b>muito calor</b>	> 42,4
<b>calor</b>	34,9 ~ 42,4
<b>pouco calor</b>	27,3 ~ 34,8
<b>neutralidade</b>	19,6 ~ 27,2
<b>pouco frio</b>	12,0 ~ 19,5
<b>frio</b>	4,4 ~ 11,9
<b>muito frio</b>	< 4,4