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

Conforto Térmico em Espaços Abertos

Profa. Dra. Denise Helena Silva Duarte
FAUUSP/LABAUT

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

⬇

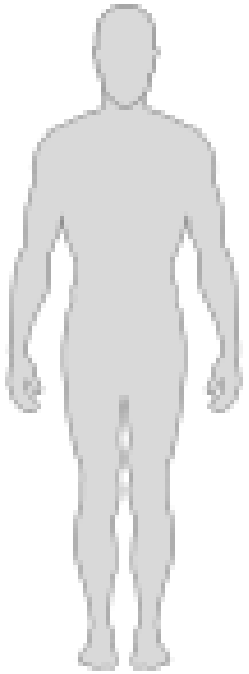
foco no ocupante ao invés dos aspectos técnicos

ESTÍMULOS E SENSAÇÕES

(Objetivos, quantificáveis)

ESTÍMULOS

Temperatura do ar
Umidade do ar
Velocidade do ar
Temperatura radiante



(Subjetivas, não quantificáveis)

SENSAÇÕES

Depende da experiência anterior

O grau de perturbação ou conforto depende de estímulos e sensações

O estímulo é objetivo | A sensação é subjetiva

Balanço Termofisiológico

$$S = (M-W) - (C_r+E_r) - (C + R_L) + R_c - E_{sk}$$

S= calor perdido por evaporação do suor (W)

Mecanismo de produção de calor

- Energia Metabólica = M
- Parte realiza trabalho = W
- Restante (M-W) = geração interna de calor que deve ser eliminada para manter temperatura interna do corpo constante

Mecanismos de troca

- Respiração
  - Perdas sensíveis (C_r) e latentes (E_r)

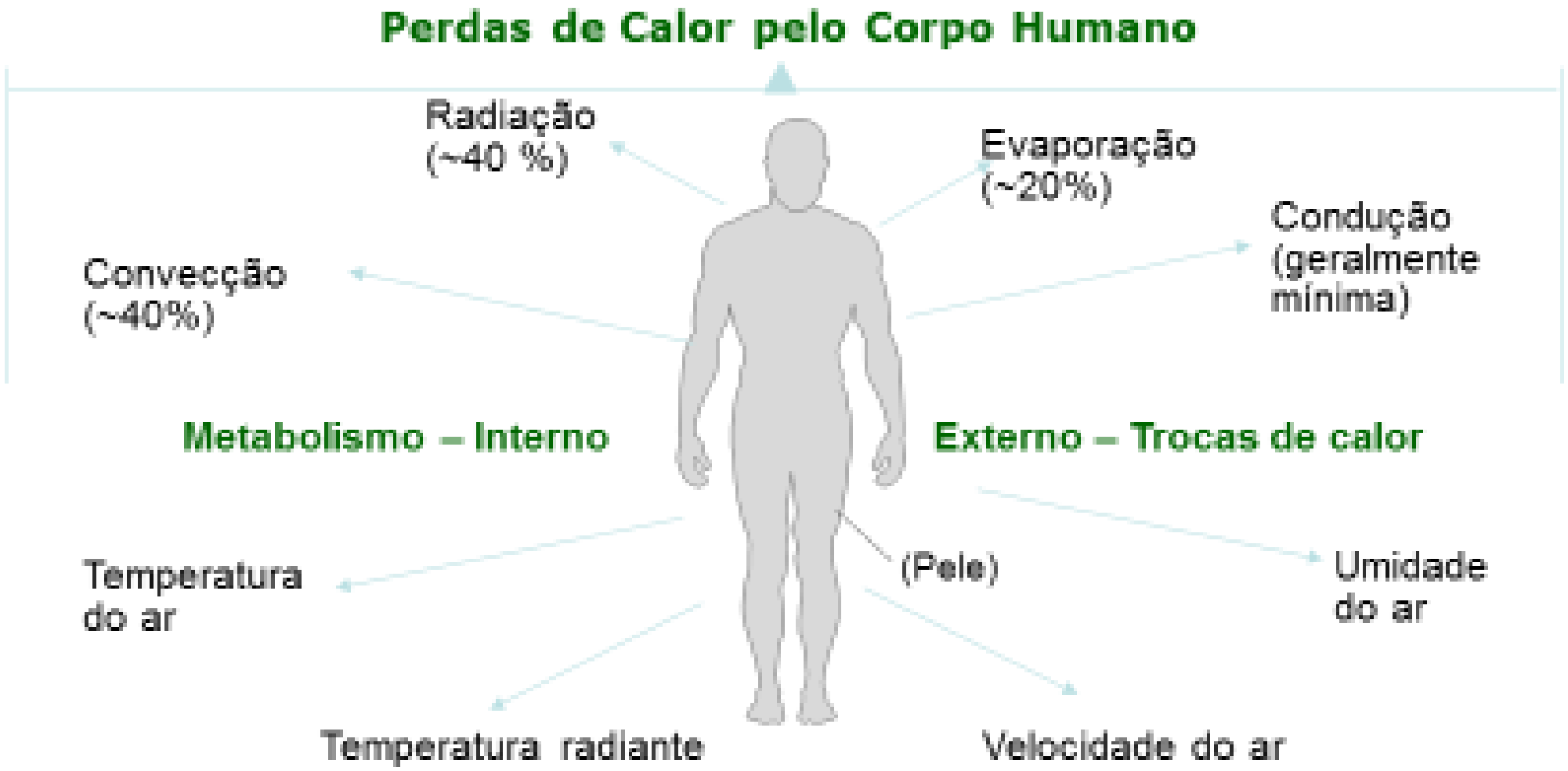
- Pele
  - Convecção (C)
  - Troca por radiação/ ondas longas (Temp das superfícies) (R_L)
  - Ganho devido à radiação solar (onda curta) (Rc)
  - Fluxo de calor latente devido à evaporação da água na pele (Esk).

    sendo **Esk = Edif + Ersw**

    Edif Evaporação por difusão (umidade natural da pele)

    Ersw Evaporação do suor gerado como mecanismo de auto-regulação

Adaptação do corpo humano ao meio



A adaptação climática

O pressuposto fundamental da zona de conforto do modelo adaptativo é que os ocupantes do edifício tem o potencial de se ajustar e encontrar condições de conforto por meio de mudanças individuais de roupas, atividades, posturas, localização, entre outros

Além disso, os ajustes podem ser feitos por meio de controles, tais como a abertura de janelas, persianas, portas e meios alternativos de aquecimento ou resfriamento

Maiores níveis de satisfação do usuário

Maior economia de energia

Conforto em espaços abertos

Conforto em espaços abertos

Diferenças em relação às condições de conforto em recintos fechados: maior complexidade do ambiente externo, variabilidade temporal e espacial

Conceito de adaptação

Tne: Temperatura Neutra Exterior

Aroztegui (1995)

$$Tne = 3,6+0,31*Tmm+\{(100+0,1*R(1-0,52(V^{0,2}-0,88)))/(11,6*V^{0,3})\}$$

Tmm = temp media mensal (ºC)

R= radiação solar direta normal (W/m^2)

V = velocidade do ar (m/s)

Ausência de suor

Atividade sedentária

Roupas 0,8 clo

UR entre 35 e 65%

PET - Physiological Equivalent Temperature

Hoppe (1999)

Temperatura equivalente fisiológica de uma dada situação como a temperatura equivalente à do ar na qual, em uma situação típica interna, o balanço do corpo térmico é mantido, com temperaturas do centro do corpo e da pele iguais à da situação em questão.

Ex: verão, sob radiação solar direta – PET = tar + 20K
inverno, com vento - PET = tar - 20K

Modelo de dois nós (MEMI: Modelo de Trocas Térmicas de Munique), considera separadamente centro do corpo e pele

Ambiente de referência

- Tar=TRM
- Var=0,1 m/s
- Pvar=12 kPa (UR de 50% e Tar=20°C)
- 0,9 clo e atividade sedentária

PET: Physiological Equivalent Temperature

Hoppe (1999)

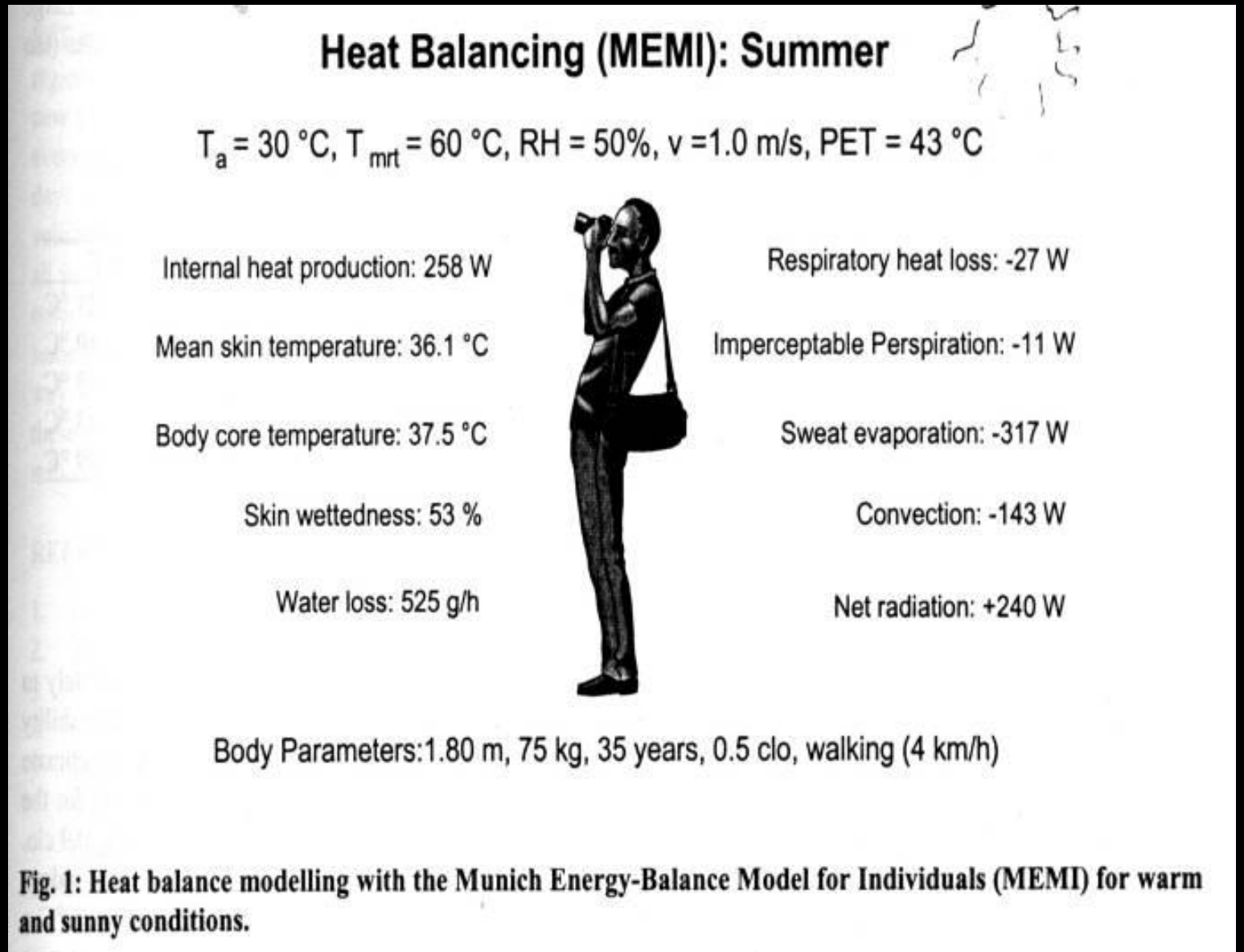


Fig. 1: Heat balance modelling with the Munich Energy-Balance Model for Individuals (MEMI) for warm and sunny conditions.

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 ºC
Modelo de múltiplos nós

Ambiente de referência

- tmrt = ta
- relativy humidity = 50%
- still air with relative air velocity of 1.1 m/s
- metabolism = 135 W/m²
- clothing resistance Iclo = 0.5 ~ 2.0 clo

Novos índices empíricos

TS: Thermal Sensation
Givoni & Noguchi (2000)
TS = 1,7 + 0,118 tar+ 0,0019 IH - 0,322 *v* - 0,0073 ur + 0,0054 ts,ent

NWCT: New Wind Chill Temperature
Bluestein & Osczevski (2002)
NWCT = 13,12 + 0,6215 · tar - 11,37 · v10 0.16 + 0.3965 · tar · v10 0.16
para tar ≤10 ºC e v10 ≥ 4,8 km/h

ASV: Actual Sensation Vote
Nikolopoulou (2004)
ASV = 0,049·tar + 0,001·H + 0,051·var + 0,014·ur

TEP: Temperature of Equivalent Perception
Monteiro & Alucci (2008)
TEP = TEP = -29,877 + 0,4828 · tar + 0,5172 · trm + 0,0802 · ur - 2,322 · var - 0,1742 · tm + 5,118 · M + 38,023 · Icl

Estudo empírico

Dados Primários

- **Levantamento:**
  local: Cidade Universitária (facilidade de acesso e execução)

- **Variáveis coletadas:**
  - ***Micro-climáticas*:**
    - (i) temperatura do ar,
    - (ii) umidade do ar,
    - (iii) velocidade do ar,
    - (iv) temperatura radiante média.
  - ***Individuais*:**
    - (1) taxa metabólica (sexo, faixa etária e atividade),
    - (2) isolamento da roupa (tipos de vestimentas).
  - ***Subjetivas*:** percepção e preferência de sensação térmica.

- **Modo de coleta:**
  - ***Dados micro-climáticos*:** ISO 7726:1998
  - ***Dados individuais:*** ISO 8996:1990 e ISO 9920:1995
  - ***Respostas subjetivas*:** ISO 10551:1995.



1. base descoberta

2. base sob cobertura têxtil

3. base sob árvores

Levantamentos

- Verão e inverno
- Cada dia:

  150 pessoas: 2 grupos de 75 em períodos distintos

  Cada grupo de 75: 3 subgrupos de 25 pessoas
- Cada grupo de 25 pessoas: bases A, B, C alternadamente

- Total:

  72 situações ambientais distintas

  1750 questionários aplicados



1. base descoberta



2. base sob cobertura têxtil



3. base área sob árvores

Variáveis ambientais

Base céu aberto

Estação meteorológica marca ELE modelo EMS

Set analógico
- termohigrômetro
- termômetros de globo
- anemômetros de hélice



Estação meteorológica marca ELE modelo EMS
- termo-higômetro
- anemômetro de copo e pá
- piranômetro.

Data logger ELE modelo MM900 EE 475-016.



Base sob cobertura têxtil

Estação Innova 7301

Set analógico
- termohigrômetro
- termômetros de globo
- anemômetros de hélice



Estação Innova 7301
- termômetro e higrômetro
- termômetro de globo
- anemômetro ominidirecional

Data logger Innova modelo 1221.



Base sob árvores

Estação Huger Eletronics modelo GmbH WM918

Set analógico

- termohigrômetro
- termômetros de globo
- anemômetros de hélice



Estação Huger Eletronics modelo GmbH WM918

- termohigrômetro
- anemômetro de copo e pá

Dados armazenados em computador portátil



Base de referência (10m)

Estação Huger Eletronics modelo GmbH WM921



Estação Huger Eletronics modelo GmbH WM921

- termohigrômetro
- anemômetro de copo e pá

Dados armazenados em computador portátil



Variáveis individuais e subjetivas

Isolamento térmico da roupa







Isolamento térmico da roupa

I_{cl} para peças de vestuários (adaptação de ISO 9920, 1995; ASHRAE, 1997).

Roupas íntimas	**Icl**	**Vestidos, saias**	**Icl**	**Calções, calças, macacão**	**Icl**
Cuecas	0,04	Saia fina	0,14	Calção curto	0,06
Calcinhas	0,03	Saia grossa	0,23	Calção para caminhada	0,08
Sutiã	0,01	Vestido manga longa fino	0,33	Calças de tecido fino	0,15
Camiseta	0,08	Vestido manga longa grosso	0,47	Calças de tecido grosso	0,24
Combinação	0,16	Vestido de manga curta fino	0,29	Calças de lã	0,28
Anágua	0,14	Pulover fino	0,23	Macacão	0,30
Camiseta de manga longa	0,20	Pulover grosso	0,27		
Ceroula	0,15			**Pijamas, roupões, robes**	
		Suéteres, blusas de lã		Pijama fino de manga curta	0,42
Meias		Suéter fino sem mangas	0,13	Pijama grosso manga longa	0,57
Meias esportivas curtas	0,02	Suéter grosso sem mangas	0,22	Roupão fino curto	0,18
Meias finas até a coxa	0,03	Suéter fino manga longa	0,25	Roupão fino longo	0,20
Meias grossas até o joelho	0,06	Suéter grosso manga longa	0,36	Roupão hospitalar de mangas curtas	0,31
Meia calça	0,02			Roupão grosso longo	0,46
		Coletes, paletós, jaquetas		Robe fino curto de manga curta	0,34
Camisas ou blusas femininas		Colete fino	0,10	Robe fino trespassado de manga	0,48
Camisa colarinho s/mangas	0,12	Colete grosso	0,17	Robe grosso trespassado de manga	0,69
Camisa de manga curta	0,19	Paletó fino	0,36		
Camisa de manga longa	0,25	Paletó grosso	0,44	**Calçados**	
Camisa de flanela manga longa	0,34	Jaquetão fino	0,42	Sandálias de couro ou borracha	0,02
Camisa de tricô manga curta	0,17	Jaquetão grosso	0,48	Chinelos de tecido	0,03
Camisa de lã manga longa	0,34	Sobretudo	0,49	Botas	0,10

AUT 258 - Questionário inicial para Exercício Experimental de Sensação Térmica

Objetivo: verificação da aclimatação dos entrevistados

Nome: _____ Código: _____

Idade: _____ Sexo: _____ Altura: _____ Peso: _____

Local de nascimento

Cidade : _____

Estado: _____

Morou na cidade de nascimento quanto tempo? _____

Se você ainda mora e sempre morou na mesma cidade em que nasceu,
não responda às próximas questões.

Local atual de residência

Cidade : _____

Estado: _____

Mora na atual cidade de residência há quanto tempo? _____

Se você morou em outras cidades, além das de nascimento e de residência atual,
especificar quais e por quanto tempo (preencha da mais recente para mais antiga):

Outros locais de residência

Cidade : _____

Estado: _____

Morou nesta cidade quanto tempo? _____

Cidade : _____

Estado: _____

Morou nesta cidade quanto tempo? _____

Cidade : _____

Estado: _____

Morou nesta cidade quanto tempo? _____

AUT 258 - Questionário para Exercício Experimental de Sensação Térmica

Nome: _____ **Código**: _____

Local: ( ) área não coberta ( ) área coberta com árvores ( ) área coberta com tensionado

Horário: _____

Se você alterou alguma peça de roupa (inclusive boné ou gorro) com relação ao momento da fotografia, especifique:

- retirei a(s) seguinte(s) peça(s) de roupa: _____
- coloquei a(s) seguinte(s) peça(s) de roupa: _____

1. Neste exato momento, **eu estou sentindo**:

( ) muito frio ( ) frio ( ) um pouco de frio ( ) nem frio nem calor ( ) um pouco de calor ( ) calor ( ) muito calor

2. Neste exato momento, com relação às condições climáticas, **eu estou**:

( ) confortável ( ) um pouco desconfortável ( ) desconfortável ( ) muito desconfortável

3. Neste exato momento, **eu preferiria estar sentindo**:

( ) muito mais frio ( ) mais frio ( ) um pouco mais de frio ( ) sem mudanças ( ) um pouco mais de calor ( ) mais calor ( ) muito mais calor

4. Neste exato momento, com relação às condições climáticas, na minha opinião **estar neste local é**:

( ) perfeitamente tolerável ( ) facilmente tolerável ( ) dificilmente tolerável ( ) intolerável

5. Com relação à **temperatura do ar**,

eu preferiria que esta estivesse: ( ) mais baixa ( ) como está ( ) mais alta ( ) não sei dizer

6. Com relação à **umidade do ar**,

eu preferiria que o ar estivesse: ( ) mais seco ( ) como está ( ) mais úmido ( ) não sei dizer

7. Com relação ao **vento**,

eu preferiria que este estivesse: ( ) mais fraco ( ) como está ( ) mais forte ( ) não sei dizer

8. Com relação à **radiação solar**,

eu preferiria que esta estivesse: ( ) mais branda ( ) como está ( ) mais intensa ( ) não sei dizer

Modelos, índices e variáveis

Referência	Modelo	Índice	Individuais				Micro-climáticas				Outras		Climáticas			
			M	W	I_{cl}	I_e	t_{ar}	p_v	v_{ar}	t_{rm}	t_g	t_{bu}	t	ur	v_{10}	R
Houghten, 1923; Szokolay, 2001	ET	ET*					x	x								
Vernom, 1932; Szokolay, 2001	ET	CET*					x	x			x					
ASHRAE, 1997	OT	OT					x		x	x						
ASHRAE, 1992, Szokolay, 2001	ET+OT	EOT*					x	x	x	x						
Siple & Passel, 1945	WCT	WCTI											x		x	
Belding Hatch,1955	HSI	HSI					x	x	x	x						
Yaglou, 1957; ISO 7243, 1989	WBGT	WBGT					x				x	x				
Gagge, 1967	Gagge	SET*	x	x	x	x	x	x	x	x						
Givoni, 1969	ITS	ITS					x	x	x	x						
Masterton, 1979	Humidex	HU					x	x								
Jendritzky, 1979	KMM	PMV	x	x	x	x	x	x	x	x						
		PPD	x	x	x	x	x	x	x	x						
ISO 7933, 1989	Vogt	Sw_{req}	x	x	x	x	x	x	x	x						
		w	x	x	x	x	x	x	x	x						
		S	x	x	x	x	x	x	x	x						
		$Sw_{g/h}$	x	x	x	x	x	x	x	x						

Modelos, índices e variáveis (continuação)

Referência	Modelo	Índice	Individuais				Micro-climáticas				Outras		Climáticas			
			M	W	I_{cl}	I_e	t_{ar}	p_v	v_{ar}	t_{rm}	t_g	t_{bu}	t	ur	v_{10}	R
Dominguez, 1992	Sevilla	Sw_{req}	x	x	x	x	x	x	x	x						x
Brown & Gillespie, 1995	Comfa	S’	x	x	x	x	x	x	x	x						
Aroztegui, 1995	Tne	Tne											x		x	x
Blazejczyk, 2002	Menex	HL	x	x	x	x	x	x	x	x						
		PhS	x	x	x	x	x	x	x	x						
		R’			x											x
		STI	x	x	x	x	x	x	x	x						
		SP	x	x	x	x	x	x	x	x						
		ECI					x									
De Freitas, 1997	DeFreitas	PSI	x	x	x	x	x	x	x	x						
		STE	x	x	x	x	x	x	x	x						
Höppe,1999	MEMI	PET	x	x	x	x	x	x	x	x						
Noguchi & Givoni, 2000	TS	TS					x	x	x	x						x
Bluestein & Osczevski, 2002	NWCT	NWCT											x		x	
		Ft											x		x	
Nikolopoulou, 2004	ASV	ASV											x	x	x	x

Resultados: sem calibração x com calibração

Modelo	Índices		Sem calibração		Com calibração	
		Correlação com o parâmetro do modelo	Correlação com as faixas interpretativas	Porcentagem de predições corretas	Correlação com as faixas interpretativas	Porcentagem de predições corretas
ET	ET*	0,73	0,59	44%	0,71	72%
ET	CET*	0,89	0,77	11%	0,85	81%
OT	OT	0,72	0,69	47%	0,72	75%
ET+OT	EOT*	0,70	0,66	42%	0,73	75%
WCT	WCTI	0,69	0,64	31%	0,74	78%
HSI	HSI	0,83	0,72	68%	0,89	81%
WBGT	WBGT	0,86	-	-	0,86	89%
Gagge	SET*	0,89	0,84	28%	0,86	86%
ITS	ITS	0,84	0,75	62%	0,89	86%
Humidex	HU	0,74	0,70	69%	0,78	81%
KMM	PMV	0,87	0,82	75%	0,83	86%
“	PPD	0,70	-	-	0,81	78%
ISO7933	Swreq	0,87	-	-	0,86	83%
“	W	0,86	-	-	0,86	83%
Sevilha	Swreq’	0,89	0,83	72%	0,89	86%
Comfa	S’	0,89	0,65	61%	0,87	83%
Tne	Tne	0,88	0,70	33%	0,89	86%
MENEX	HL	0,89	0,76	62%	0,89	86%
“	PhS	0,81	0,71	28%	0,89	86%
“	R’	0,86	0,76	69%	0,86	83%
“	STI	0,87	0,79	53%	0,82	78%
“	SP	0,89	0,82	78%	0,89	86%
“	ECI	0,78	0,72	42%	0,80	81%
DeFreitas	PSI	0,89	0,76	72%	0,88	83%
“	STE	0,79	0,71	58%	0,81	83%
MEMI	PET	0,89	0,78	31%	0,89	86%
TS	TS	0,87	0,84	78%	0,89	89%
NWCT	NWCTI	0,62	0,60	22%	0,71	72%

TEP - Temperatura Equivalente Percebida

Para pessoas em pé, paradas, com vestimentas escolhidas por elas próprias

$$TEP = -3{,}777 + 0{,}4828*ta + 0{,}5172*mrt + 0{,}0802*rh - 2{,}322*va$$

Ambiente de referência
trm = ta
UR = 50%
va = 0

Temp. de neutralidade para ambiente de referência = 23,4ºC

Limit values for microclimatic variables

variable	min max
ta (ºC)	15,1 - 33,1
mrt (ºC)	15,5 - 65,5
rh (%)	30,9 - 94,7
va (m/s)	0,1 - 3,6
TEP (ºC)	13,7 - 45,3

TEP [ºC]	Sensação
> 42,5	muito calor
34,9 ~ 42,4	calor
27,3 ~ 34,8	pouco calor
19,6 ~ 27,2	neutralidade
12,0 ~ 19,5	pouco frio
4,4 ~ 11,9	frio
< 4,3	muito frio

TEP_A - Temperatura Equivalente Percebida Adaptativa

Considerando a adaptação por meio de diferentes atividades, vestimentas e das condições climáticas prévias

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

Ambiente de referência
trm = ta
UR = 50%
va = 0 m/s

Temp de neutralidade para ambiente de referência = 23,4ºC

Limit values for microclimatic variables

variable	min max
ta (ºC)	15,1 - 33,1
mrt (ºC)	15,5 - 65,5
rh (%)	30,9 - 94,7
va (m/s)	0,1 - 3,6
TEP (ºC)	13,7 - 45,3

TEP [ºC]	Sensação
> 42,5	muito calor
34,9 ~ 42,4	calor
27,3 ~ 34,8	pouco calor
19,6 ~ 27,2	neutralidade
12,0 ~ 19,5	pouco frio
4,4 ~ 11,9	frio
< 4,3	muito frio

Considerações Finais

- As pessoas preferem a diversidade e não a uniformidade de condições
- A questão não é prover um ambiente térmico ótimo e constante, mas prover oportunidades adaptativas no projeto para criar diversidade de condições de exposição
- Interações: conforto térmico, acústico, luminoso (ofuscamento), qualidade do ar, odores, etc.
- Orquestrar sequência de transições no projeto dos espaços abertos