

Conforto térmico em ambientes semi-confinados: proposição de modelo adaptativo

Thermal comfort in semi-confined environments: adaptive model proposition

LEONARDO MARQUES MONTEIRO

MARCIA PEINADO ALUCCI

1. Graduado pela Faculdade de Arquitetura e Urbanismos da Universidade de São Paulo (FAUUSP), Doutor em Tecnologia da Arquitetura pela FAUUSP, Pós-doutorando pela FAUUSP, bolsista FAPESP.
2. Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), Doutora em Estruturas Ambientais pela FAUUSP, Professora Livre Docente do Departamento de Tecnologia da FAUUSP.

leo4mm@gmail.com

marcialu@usp.br

Resumo

Este artigo apresenta uma verificação empírica de modelos de conforto térmico para avaliação de ambientes térmicos semi-confinados na cidade de São Paulo. O método adotado é dedutivo, por meio de simulações de modelos preditivos, e experimental indutivo, realizando-se levantamentos de campo de variáveis microclimáticas (temperatura, umidade e velocidade do ar e temperatura radiante média), individuais (metabolismo e isolamento da roupa) e subjetivas (sensação térmica). Os modelos de conforto térmico foram processados computacionalmente. Empiricamente, 886 questionários foram aplicados em 24 situações microclimáticas. Os resultados da simulação foram comparados com os dos levantamentos empíricos. Com base nos resultados, o modelo adaptativo de temperatura operativa neutra mostrou-se o mais apropriado. Esse modelo foi reconsiderado por meio de proposição de nova equação que proporciona resultados mais significativos para espaços semi-confinados em São Paulo.

Palavras-chave: conforto térmico; ambientes semi-confinados; modelo adaptativo

Abstract

This paper presents an empirical verification of thermal comfort models for assessment of semi-confined spaces in São Paulo. The method is deductive (predictive simulations), and experimental inductive, with field research of micro-climatic (air temperature, humidity and speed, mean radiant temperature), individual (metabolism, clothing insulation) and subjective (thermal sensation) variables. The thermal comfort models were computationally processed, whilst 886 questionnaires were applied in 24 micro-climatic conditions. Considering the results found, the most appropriated model showed to be the Neutral Operative Temperature. This index was reconsiderated through the proposal of a new equation for even better predictions for semi-confined spaces in São Paulo.

Keywords: thermal comfort; semi-confined environments; adaptive model



Conforto térmico em ambientes semi-confinados: proposição de modelo adaptativo

Introdução

A avaliação térmica de espaços semi-confinados requer a consideração de fatores adicionais que comumente não estão presentes em uma situação típica interna, como a possibilidade de radiação solar e ventos, e ainda diferentes atividades e expectativas, que trazem maior complexidade para a avaliação. Espaços semi-confinados se distinguem devido a maior heterogeneidade ambiental, apresentando diferentes características arquitetônicas. O comportamento típico dos usuários é também bastante diferenciado, se comparado ao sedentarismo comumente encontrado em situações típicas de escritórios. As expectativas das pessoas são também outras, uma vez que não estão restritas a uma estação de trabalho, podendo optar pelo local que melhor lhes aprouver.

Considerando as diferenças ambientais e de comportamento, esta pesquisa foca nas respostas subjetivas em face às condições térmicas de espaços semi-confinados. Esse tipo de espaço, nesta pesquisa, é entendido como aquelas áreas que são diretamente influenciadas pelas condições externas climáticas, mas que ao mesmo tempo são de alguma forma claramente definidas por elementos arquitetônicos, como apresentado por Chun et al. (2004).

Esses autores consideram três tipos de espaços semi-confinados: o Tipo 1 é um espaço contido em uma edificação onde as condições são constantemente mutáveis; o Tipo 2 é categorizado como um anexo, um espaço coberto conectado à edificação; o Tipo 3 é um espaço não conectado à edificação e é essencialmente um ambiente externo, inteiramente influenciado pelo clima externo.

Considerando essa classificação, têm-se nesta pesquisa dois estudos de caso: o primeiro, um laboratório experimental, que é mais similar a um espaço aberto, mas possui uma grande cobertura têxtil tensionada (Tipo 3 na classificação de Chun et al., 2004); o segundo, um grande estúdio, que é na verdade um grande espaço interno, mas que sofre grande influência do clima externo, uma vez que a sua cobertura possui grande porcentagem de elementos translúcidos e não há vedações laterais em grande parte no pavimento térreo (Tipo 1 na classificação de Chun et al., 2004).

Considerando pesquisas específicas em ambientes térmicos com características de semi-confinamento, verifica-se a existência de poucos trabalhos na área. Jitkhajornwanicha & Pitts (2002) usaram a escala da ASHRAE (1992) para avaliar espaços em Bangkok, correlacionando os resultados com os de Temperatura Neutra de Humphreys (1975). Aroztegui (1995) revisou a Temperatura Neutra, considerando a radiação solar e a ação dos ventos propondo a Temperatura Neutra Exterior, que foi utilizada pelo autor para avaliar espaços abertos e semi-confinados. Spagnolo & De Dear (2003) avaliaram ambientes semi-confinados em Sidney, usando, entre outros, o Voto Médio Estimado, de Fanger (1970) e a Nova Temperatura Efetiva, da ASHRAE (1992). Chun & Tamura (2005) realizaram estudos de campo em shopping-centres subterrâneos no Japão, utilizando a escala de sete pontos da ASHRAE. Cavalcanti & Sanches (2005) usaram a Temperatura Operativa Neutra, da ASHRAE (2004), para avaliar espaços semi-confinados na Cidade Universitária. Monteiro & Alucci (2006) avaliaram espaços semi-confinados em São Paulo, realizando estudos de campo e aplicando o índice de Carga Térmica de Blazejczyk (2001).

Considerando essas referências, foram selecionados, para as simulações computacionais, os modelos preditivos já utilizados nas pesquisas mencionadas: Nova Temperatura efetiva (TE^*), Voto Médio Estimado (PMV), Índice de Carga Térmica Heat (HL), Temperatura Neutra Exterior (T_{ne}) e Temperatura Operativa Neutra (OT_n).

O objetivo desta pesquisa é verificar qual modelo preditivo apresenta os melhores resultados para avaliação do conforto térmico em espaços semi-confinados na cidade de São Paulo, calibrando então seu índice para possibilitar predições ainda mais significativas.

Simulações computacionais

As simulações computacionais consideraram cinco modelos preditivos distintos. Primeiramente, a Temperatura Efetiva (ET^*), índice empírico originalmente proposto por Houghten et al. (1923) e que foi utilizado pelas normas da ASHRAE entre 1963 e 1992. Em seguida, tem-se o Voto Médio Estimado (PMV), desenvolvido por Fanger (1970), baseado em modelo que foi adotado pela norma ISO (1994). Na seqüência, considera-se o modelo termo-fisiológico Menex, proposto por Blazejczyk (1994), que foca em espaços externos, considerando variáveis como radiação solar, maiores velocidades do vento e taxas de suor mais significativas. Finalmente, modelos adaptativos são considerados: a Temperatura Neutra Externa de Aroztegui (1995), baseada em Humphreys (1975) e em Givoni (1969), e a

Temperatura Operativa Neutra, novo índice da ASHRAE (2004), baseado em De Dear et al (1997).

Nova Temperatura Efetiva (ET)*

Houghten et al. (1923), a partir de estudos em laboratório da ASHVE, propõem a Temperatura Efetiva (Effective Temperature - ET), determinada através da combinação da temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido e da velocidade do vento. Estudos de Glickman, 1950; Smith, 1958 e Givoni, 1963 (citados por Givoni, 1969) demonstram que a Temperatura Efetiva superestima o efeito da umidade. Vernon & Warner (1932) propõem a Nova Temperatura Efetiva (New Effective Temperature - ET*) através da substituição da temperatura de bulbo seco pela temperatura de globo, para consideração dos efeitos da radiação. O ambiente de referência passou então a ser considerado com uma umidade relativa de 50% e não mais de 100%. Esse índice foi adotado pela ASHRAE, em 1963, tendo sido continuamente empregado, com algumas modificações, até a norma de 1992. As equações abaixo podem ser encontradas respectivamente em ASHRAE (1992) e ASHRAE (2005).

$$TE^* = t_o + w \cdot I_m \cdot LR \cdot (p_a - 0.5 \cdot p_{sTE^*}) \quad \text{Eq. 01}$$

$$t_o = \frac{h_r \cdot t_m + h_c \cdot t_{bs}}{h_r + h_c} \quad \text{Eq. 02}$$

onde: t_o = temperatura operativa, em °C; w = umidade da pele; I_m = índice de permeabilidade da roupa; LR = relação de Lewis; p_a = pressão de vapor, em kPa; p_{sTE^*} = pressão de saturação da temperatura efetiva, em kPa; t_m = temperatura radiante média, em °C; t_{bs} = temperatura de bulbo seco, em °C; h_r = coeficiente de troca radiante, em W/m²°C; h_c = coeficiente de troca convectiva, em W/m²°C.

Voto Médio Estimado (PMV)

Fanger (1970) assumiu que o conforto térmico é definido em termos da condição física do organismo e não em função do ambiente, sugerindo equações baseadas em modelo de regime permanente. O autor também desenvolveu o voto médio estimado (Predicted Mean Vote - PMV), baseado na escala da ASHRAE (muito quente, quente, pouco quente, neutro, pouco frio, frio, muito frio). O PMV pode ser determinado pelas equações 3, 4 e 5, conforme apresentado pela norma internacional ISO 7730 (1994).

$$PMV = (0,303 e^{-0,036M} + 0,028) \{ (M-W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99 (M-W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M-W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0,0014 M (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad \text{Eq. 03}$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 (M-W) - I_{cl} \{ 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad \text{Eq. 04}$$

$$h_c = 2.4 (T_{cl} - T_a)^{0,25} \text{ ou } h_c = 12.1 v^{1/2} \text{ (o maior valor)} \quad \text{Eq. 05}$$

onde: M = taxa metabólica, em W/m²; W = trabalho externo, em W/m²; t_a = temperatura do ar, em °C; t_{rm} = temperatura média radiante, em °C; v = velocidade relativa do ar, em m/s; p_a = pressão de vapor, em Pa; t_{cl} = temperatura superficial da roupa, em °C; I_{cl} = isolamento térmico da roupa, em m²°C/W; f_{cl} = razão entre área de pele vestida e nua; h_c = coeficiente de troca convectiva, em W/m²°C.

Índice de Carga Térmica (HL)

Blazejczyk (1994; citado por Blazejczyk, 2001) propõe o modelo MENEX (Man-ENvironment heat EXchange model). O modelo utiliza o balanço térmico do corpo humano, considerando a produção de calor metabólico e as trocas com o meio. As peculiaridades do modelo são: o cálculo das perdas evaporativas pela pele considerando-se um coeficiente de ponderação por sexo (1,0 para homens e 0,8 para mulheres), o cálculo das perdas por radiação de onda longa pela pele considerando-se uma ponderação devida à nebulosidade, e ainda o cálculo de radiação solar através de modelos específicos, que podem ser encontrados em Blazejczyk (2001). Para avaliação dos resultados, o autor propõe cinco critérios. O critério de carga térmica (Heat Load – HL) foi aqui adotado pois, segundo o autor, apresenta melhores resultados para situações gerais. As equações para sua determinação são:

$$\text{se } S \leq 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} \geq -50 \text{ W/m}^2 \quad HL = [(S + 360) / 360] [2 - 1/(1+Rc)] \quad \text{Eq. 05}$$

$$\text{se } S > 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} \geq -50 \text{ W/m}^2 \quad HL = [(S + 360) / 360] [2 + 1/(1+Rc)] \quad \text{Eq. 06}$$

$$\text{se } S > 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} < -50 \text{ W/m}^2 \quad HL = (E/50) [(S + 360) / 360] [2 + 1/(1+Rc)] \quad \text{Eq. 07}$$



$$\text{se } S \leq 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } Esk < -50 \text{ W/m}^2 \quad HL = (E/-50) [(S + 360) / 360] [2 - 1/(1+Rc)] \quad \text{Eq. 08}$$

onde: S = calor acumulado; RC = radiação onda curta; Esk = perdas evaporativas pela pele; em W/m^2 .

Temperatura Neutra Externa (Tne)

Aroztegui (1995) propõe a Temperatura Neutra Exterior (Tne), a partir do trabalho de Humphreys (1975). Este propõe a Temperatura Neutra (Tn), definida como a temperatura ambiente considerada termicamente neutra pela população. O autor apresenta uma relação linear, válida para ambientes interiores, verificada entre a temperatura média mensal e a Temperatura Neutra, em situações em que a velocidade do ar é baixa e a temperatura radiante média é próxima à temperatura do ar. Aroztegui propõe a Tne, definida com base nas mesmas variáveis que compõem a Tn, incorporando variáveis relativas à radiação solar e à velocidade do vento, baseando-se em Givoni (1969). Para taxa de sudorese em atividade sedentária e condições médias para as características do indivíduo (roupas 0,8 clo) e do entorno (umidade entre 35% e 65%), foi determinada a equação da temperatura neutra exterior. A equação é válida para valores entre 18,5 °C e 28,5 °C. Para outras atividades, tem-se: trabalho leve $M=210\text{W}$: -2 °C; trabalho moderado $M=300\text{W}$: -4,5 °C; trabalho pesado $M=400\text{W}$: -7 °C.

$$Tne = 3,6 + 0,31 tmm + \{100 + 0,1 Rdn [1 - 0,52 (v 0,2 - 0,88)]\} / 11,6 v 0,3 \quad \text{Eq. 09}$$

onde: Tne = Temperatura Neutra Exterior, em °C; tmm = temperatura média mensal, em °C; Rdn = radiação solar direta normal, em W/m^2 ; v = velocidade do ar, em m/s.

Temperatura Operativa Neutra (OTn)

ASHRAE 55 (2004) adota um novo índice para avaliação térmica de ambientes condicionados naturalmente: a Temperatura Operativa Neutra, baseada em De Dear et al (1997). O conceito do modelo adaptativo, segundo esses autores, é que o corpo humano não apenas mantém seu equilíbrio térmico com o ambiente através de termoregulação fisiológica como também através de um conjunto de respostas adaptativas que permitem às pessoas se adaptar as condições ambientais internas e externas através de mudanças comportamentais

e psicológicas. Um total de 22.000 dados empíricos são encontrados em De Dear et al. (1997). Baseada na temperatura operativa aceitável para espaços condicionados naturalmente (ASHRAE, 2004), a equação 10 é apresentada. Uma faixa de tolerância de $\pm 2,5$ °C representa satisfação de 90% dos usuários, enquanto $\pm 3,5$ °C, 80%. O modelo considera que as pessoas utilizam determinados tipos de vestimentas de acordo com as condições climáticas externas, assim, não é necessário estimar o isolamento da roupa. Não é preciso também levar em conta a umidade do ar ou limites de velocidade do ar, devido aos processos de adaptação mencionados.

$$OT_n = 17,8 + 0,32 t_{mm} \quad \text{Eq.10}$$

onde: OT_n = Temperatura Operativa Neutra; t_{mm} = temperatura média mensal do ar externo; em °C.

Levantamentos empíricos

Os levantamentos empíricos consideraram duas tipologias distintas de espaços semi-confinados: um espaço caracteristicamente condicionado pela exterioridade coberto por membrana têxtil tensionada, conforme pode ser visto na Figura 1a, 2a e 3a (Monteiro, 2005); um espaço caracteristicamente condicionado não só pela exterioridade, mas também pela interioridade, conforme argumentado na introdução deste artigo, constituído por um estúdio com pé direito de oito metros e 33% da cobertura com aberturas zenitais para iluminação, conforme pode ser visto na Figura 2a, 2b e 2c (Cavalcanti & Sanches 2005).



FIGURA 1a e 1b: Vista geral do primeiro e segundo estudo de caso



FIGURA 2a e 2b: Cobertura do primeiro e segundo estudo de caso



FIGURA 3a e 3b: Ocupação do primeiro e segundo estudo de caso

No total, 24 cenários microclimáticos foram considerados (doze em cada estudo de caso), e 886 questionários foram aplicados em diferentes horários de dias de verão e inverno. Em cada caso, variáveis microclimáticas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar e temperatura radiante média) foram medidas ao longo de uma série de dias consecutivos durante verão e inverno.

O questionário abrangeu características pessoais (sexo, idade), de aclimatização (local e tempo de moradia) e respostas subjetivas (percepção e preferência de sensação térmica, conforto e tolerância). Registros fotográficos foram realizados para identificação de roupa e atividade.

O equipamento utilizado sob a membrana têxtil foi estação meteorológica ELE modelo EMS e data logger modelo MM900 EE475-016. No estúdio utilizou-se estação Innova 7301 e data logger modelo 1221. Em ambos os casos, temperatura de globo foi aferida através de

globos cinzas com sensores semicondutores, armazenando os dados em data loggers Hobo. As medições foram realizadas em intervalos de 1 segundo e os valores armazenados em intervalos de 1 minuto, considerando-se a média verificada.

Resultados empíricos

A Figura 3 apresenta os dados microclimáticos obtidos para o primeiro estudo de caso. Os dados foram obtidos em quatro dias, dois representativos de verão e dois de inverno. Ressalta-se que no gráfico da Figura 3, tem-se apenas as medições realizadas nos períodos da manhã, pois foram aqueles em que o ambiente estava sendo utilizado, permitindo-se assim a aplicação dos questionários. A temperatura média mensal do ar externo foi de 21,1°C para o mês representativo de verão e de 17,8°C para o mês representativo de inverno.

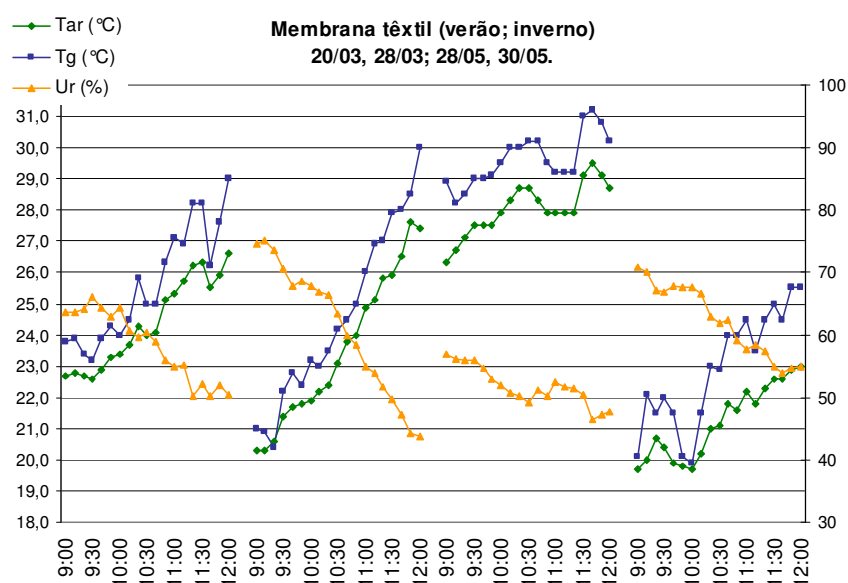


FIGURA 3: Dados microclimáticos (verão e inverno) sob a membrana tensionada

Para o segundo estudo de caso, os dados que foram obtidos em três dias consecutivos de verão e três dias consecutivos de inverno são apresentados respectivamente nas Figuras 4 e 5. A temperatura média mensal do ar externo foi de 21,1°C para o mês de verão e 17,1°C para o mês de inverno.

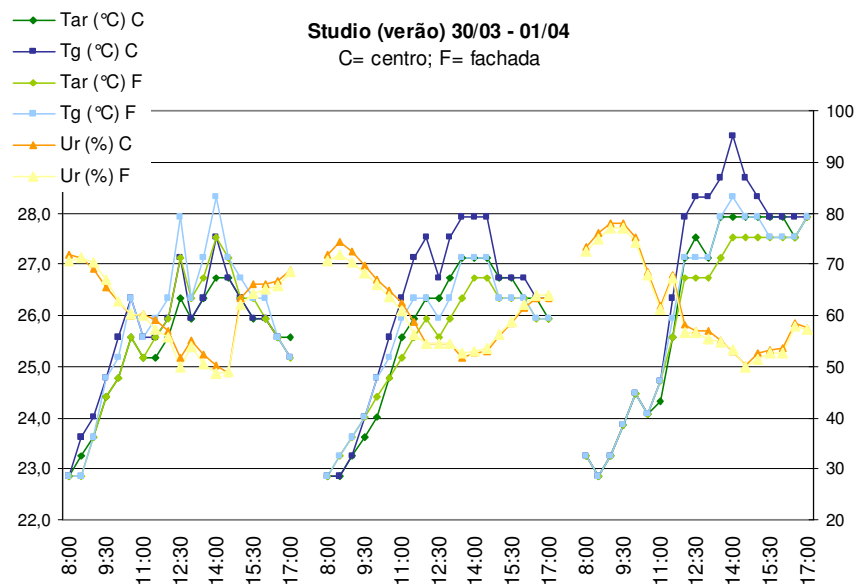


FIGURA 4: Dados microclimáticos (verão) no estúdio com aberturas zenitais

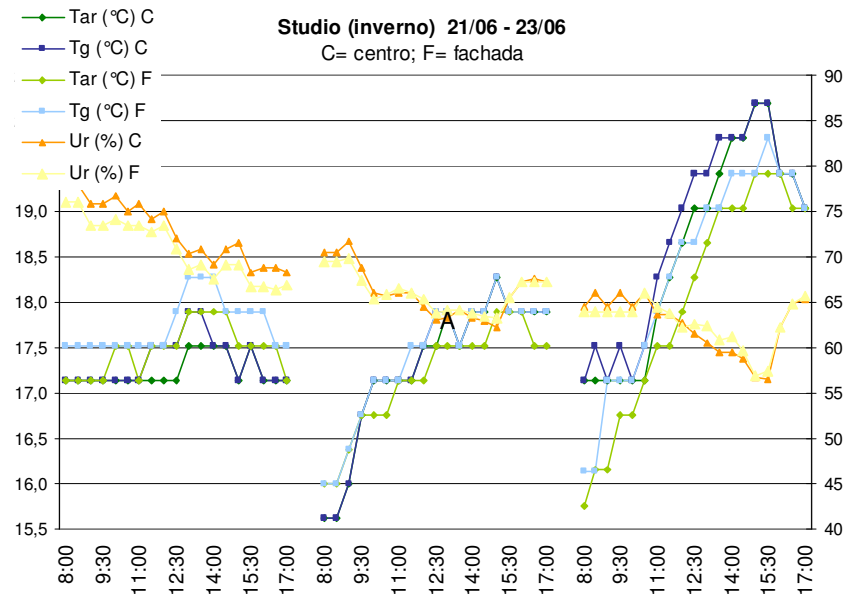


FIGURA 5: Dados microclimáticos (inverno) no estúdio com aberturas zenitais

A Tabela 1 apresenta os dados microclimáticos, individuais e subjetivos coletados, especificamente nos períodos em que os questionários foram aplicados.

TABELA 1: Dados coletados: microclimáticos, individuais e subjetivos.

	local	data	hora	ta °C	rh %	v m/s	tg °C	trm °C	N	M W/m ²	Icl clo	Sens	Conf	Pref	Tol
1	MT	28/3	09:20	22,7	64	0,38	23,4	24,1	30	76	0,56	0,08	0,32	-0,16	0,52
2	MT	28/3	09:40	22,9	65	0,45	23,9	24,9	25	76	0,51	0,04	0,21	-0,13	0,54
3	MT	28/3	10:00	23,4	64	0,37	24,0	24,5	24	76	0,59	-0,17	0,10	0,27	0,30
4	MT	28/3	11:00	25,3	55	0,19	27,1	28,2	26	76	0,55	0,69	0,50	-0,46	0,69
5	MT	28/3	11:20	26,2	50	0,51	28,2	30,3	24	76	0,52	0,38	0,29	-0,58	0,38
6	MT	28/3	11:40	25,5	50	0,68	26,2	27,1	27	76	0,53	0,15	0,11	-0,44	0,56
7	MT	30/5	09:20	20,6	74	0,97	20,4	20,3	23	76	0,66	-0,27	0,27	0,27	0,41
8	MT	30/5	09:40	21,7	68	0,62	22,8	23,6	22	76	0,73	-0,23	0,41	0,05	0,41
9	MT	30/5	10:00	21,9	68	0,61	23,2	24,2	22	76	0,66	0,17	0,39	-0,39	0,48
10	MT	30/5	11:00	24,9	55	0,50	26,0	26,7	22	76	0,64	0,41	0,45	-0,32	0,41
11	MT	30/5	11:20	25,8	52	0,41	27,0	27,5	24	76	0,56	0,30	0,26	-0,39	0,26
12	MT	30/5	11:40	26,5	47	0,82	28,0	28,7	23	76	0,60	0,67	0,42	-0,88	0,58
13	SC	30/3	15:00	26,7	49	0,12	26,7	26,7	43	70	0,47	1,51	1,16	1,42	1,36
14	SC	31/3	15:00	26,7	56	0,12	26,7	26,7	22	70	0,42	1,32	1,05	1,41	0,95
15	SC	01/4	15:00	27,9	53	0,12	28,3	28,4	47	70	0,47	2,02	1,74	1,89	1,84
16	SC	21/6	14:30	17,5	71	0,14	17,5	17,5	71	70	0,74	-1,42	0,96	-1,39	1,23
17	SC	22/6	14:30	17,9	63	0,14	17,9	17,9	65	70	0,75	-1,02	0,82	-0,98	1,09
18	SC	23/6	14:30	19,8	59	0,14	19,8	19,8	49	70	0,66	-0,22	0,41	-0,29	0,61
19	SF	30/3	15:00	27,1	49	0,10	27,1	27,1	43	70	0,47	1,51	1,16	1,42	1,36
20	SF	31/3	15:00	26,3	56	0,10	26,3	26,3	22	70	0,42	1,32	1,05	1,41	0,95
21	SF	01/4	15:00	27,5	51	0,10	27,9	28,0	47	70	0,47	2,02	1,74	1,89	1,84
22	SF	21/6	14:30	17,9	69	0,12	17,9	17,9	71	70	0,74	-1,42	0,96	-1,39	1,23
23	SF	22/6	14:30	17,5	63	0,12	17,9	18,0	65	70	0,75	-1,02	0,82	-0,98	1,09
24	SF	23/6	14:30	19,0	60	0,12	19,4	19,6	49	70	0,66	-0,22	0,41	-0,29	0,61

Na Tabela 1 tem-se: MT = área sob a membrana tensionada; SC = área central do estúdio; SF = área próxima a fachada do estúdio; t_a = temperatura do ar, em °C; ur = umidade relativa, em %; v = velocidade relativa do ar, em m/s; t_g = temperatura de globo, em °C; t_{rm} = temperatura radiante média, em °C; N = número de questionários aplicados; M = taxa metabólica (estimada pelo tipo de atividade), em W/m²; Icl = isolamento da roupa (estimado

por registros fotográficos), em clo; Sens = percepção de sensação térmica (-3 a 3, de frio para calor); Conf = conforto térmico (0 a 3, de totalmente confortável a muito desconfortável); Pref = preferência de sensação térmica (-3 a 3, de frio para calor); Tol = tolerância ao ambiente térmico (0 a 3, de perfeitamente tolerável a completamente intolerável)

Verificação empírica dos resultados simulados

Considerando os seguintes dados da Tabela 1: t_a , rh , v , t_g , t_m , M e I_{cl} , simulações foram realizadas por meio dos cinco modelos preditivos apresentados anteriormente. Pode-se observar que nem todas as variáveis se aplicam a todos os modelos. Os resultados das simulações são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2: Resultados da simulação dos diferentes modelos.

	ET* °C	Sensação	PMV -	Sensação	HL -	Sensação	dTne °C	Satisfeitos %	dOTn °C	Satisfeitos %
1	23,9	pouco quente	-0,14	neutro	0,97	pouco frio	2,2	> 90%	0,08	> 90%
2	24,5	pouco quente	-0,23	neutro	0,95	pouco frio	2,9	> 80%	0,04	> 90%
3	24,6	pouco quente	0,10	neutro	1,00	neutro	3,2	> 80%	-0,17	> 90%
4	27,4	quente	0,82	pouco quente	1,05	pouco quente	9,1	<< 80%	0,69	> 90%
5	29,1	quente	0,73	pouco quente	1,10	pouco quente	11,4	<< 80%	0,38	> 80%
6	27,1	quente	0,28	neutro	1,05	pouco quente	6,1	<< 80%	0,15	> 90%
7	20,9	pouco frio	-0,85	pouco frio	0,88	pouco frio	-3,9	< 80%	-0,27	< 80%
8	23,4	pouco quente	-0,17	neutro	1,03	pouco quente	-1,5	> 90%	-0,23	> 90%
9	23,9	pouco quente	-0,26	neutro	1,01	neutro	-1,3	> 90%	0,17	> 90%
10	26,3	pouco quente	0,46	neutro	1,08	pouco quente	2,5	> 80%	0,41	> 90%
11	27,1	quente	0,60	pouco quente	1,07	pouco quente	4,1	< 80%	0,30	> 80%
12	27,8	quente	0,64	pouco quente	1,07	pouco quente	2,7	> 80%	0,67	> 80%
13	26,7	pouco quente	0,78	pouco quente	1,00	neutro	6,6	<< 80%	1,51	> 90%
14	27,1	quente	0,76	pouco quente	0,96	pouco frio	6,7	<< 80%	1,32	> 90%
15	28,5	quente	1,17	pouco quente	1,05	pouco quente	7,8	<< 80%	2,02	> 80%
16	17,7	pouco frio	-0,79	pouco frio	0,86	pouco frio	-2,5	> 80%	-1,42	<< 80%
17	18,1	pouco frio	-0,72	pouco frio	0,87	pouco frio	-2,0	> 90%	-1,02	<< 80%
18	20,0	pouco frio	-0,52	pouco frio	0,88	pouco frio	-0,4	> 90%	-0,22	< 80%
19	27,1	quente	0,93	pouco quente	1,01	neutro	11,3	<< 80%	1,51	> 90%
20	26,7	pouco quente	0,71	pouco quente	0,94	pouco frio	10,6	<< 80%	1,32	> 90%
21	28,8	quente	1,10	pouco quente	1,03	pouco quente	11,0	<< 80%	2,02	> 80%
22	18,1	pouco frio	-0,65	pouco frio	0,87	pouco frio	3,0	> 80%	-1,42	<< 80%
23	18,1	pouco frio	-0,70	pouco frio	0,87	pouco frio	3,2	> 80%	-1,02	<< 80%
24	19,6	pouco frio	-0,58	pouco frio	0,87	pouco frio	5,0	<< 80%	-0,22	<< 80%
r	0,80		0,79		0,83		0,75		0,85	

A Tabela 2 mostra ainda o coeficiente linear da correlação de Pearson (r) entre os resultados das simulações e os resultados do levantamento empírico (Sens) que podem ser encontrados na Tabela 1. A consideração dos resultados de outras respostas subjetivas (Conf, Pref e Tol), constantes na Tabela 1, será objeto de publicação futura.

Discussão dos resultados

Considerando os resultados presentes na Tabela 2, pode-se afirmar que, entre os índices verificados, A Temperatura Operativa Neutra (OTn) apresentou a melhor correlação com os dados empíricos levantados (0,85). O índice de Carga Térmica (HL) apresentou uma correlação próxima (0,83) à da OTn. Apresentou ainda correlação significativamente superior ao do Voto Médio Estimado (PMV), que também é baseado em modelo termoregulatório, provavelmente por ter sido desenvolvido especificamente para espaços externos, considerando assim radiação solar, maiores velocidades do vento e taxas de suor mais significativas, que não são devidamente consideradas no modelo proposto por Fanger (1970), uma vez que este é tipicamente aplicável a ambientes internos com condições térmicas próximas às de conforto.

Por outro lado, deve-se reconhecer que a modelagem matemática do Menex (modelo utilizado para cálculo do HL) é bastante mais complexa que a da OTn, que é basicamente baseada em equações simples. Portanto, ainda que os dois modelos apresentem resultados próximos, recomenda-se aqui a utilização da OTn, principalmente pela facilidade de sua aplicação, mas também por ter apresentado resultados ligeiramente superiores.

Os outros índices apresentaram correlações menos significativas. Apesar da Temperatura Efetiva (ET*) ser um índice empírico antigo, que foi recém abandonado pela norma ASHRAE (2004), ele apresentou uma correlação considerável de 0,80. O Voto Médio Estimado apresentou resultados menos significativos do que a Temperatura Efetiva para prever a adequação térmica de espaços semi-confinados, com uma correlação de apenas 0,79.

Por fim, a Temperatura Neutra Externa (Tne) apresentou os resultados menos significativos, com correlação de apenas 0,75. Esse modelo adaptativo foi desenvolvido baseando-se nos trabalhos empíricos de Humphreys (1975), mas a consideração da radiação solar e ventos foi feita apenas de maneira teórica, considerando os estudos de Givoni (1969).

Essas assunções parecem não ser satisfatórias no caso de espaços semi-confinados em São Paulo.

O PMV, desenvolvido por Fanger e usado em várias normas, como a ISO (1994) e agora pela ASHRAE (2004), parece não ser também adequado para a avaliação de espaços semi-confinados. Essa é provavelmente a razão pela qual a norma ASHRAE (2004) propõe um método opcional para determinar a aceitabilidade das condições térmicas em espaços naturalmente condicionados. Nesses espaços, tem-se muito mais influência do clima externo do que em espaços que o ar é condicionado mecanicamente.

O novo índice proposto pela norma, baseado na Temperatura Operativa Neutra, apresentou, conforme visto, os resultados mais satisfatórios para avaliar espaços semi-confinados na cidade de São Paulo. Conseqüentemente, no próximo tópico, será apresentada a calibração do referido índice, utilizando-se os dados empíricos coletados, visando fornecer predições ainda mais significativas.

Calibração do modelo

O processo de calibração foi realizado para maximizar a correlação entre a Temperatura Operativa Neutra e as respostas subjetivas apresentada na Tabela 1, em específico relacionadas a percepção de sensação térmica e satisfação com o ambiente térmico.

A Equação 11 apresenta a reconsideração realizada para o modelo, levando-se em conta a maximização da correlação com base nos dados empíricos levantados nesta pesquisa.

$$OTn^* = 20,6 + 0,15 tmm \quad \text{Eq. 11}$$

A equação proposta apresenta resultados com correlação ($r = 0,87$ ($p < 0,01$), contra 0,85 da equação original.

A Tabela 3 traz os resultados da equação original (OTn) e da equação proposta (OTn^*) para avaliação de conforto térmico em espaços semi-confinados na cidade de São Paulo.

TABELA 3: Resultados da equação de Temperatura Operativa Neutra original (OTn) e da equação proposta (OTn*) para avaliação de espaços semi-confinados em São Paulo.

	t_{mm}	t_o	OTn	d	%	OTn*	d^*	%
1	21,1	23,4	24,6	-1,2	> 90	23,8	-0,4	> 90
2	21,1	23,9	24,6	-0,7	> 90	23,8	0,1	> 90
3	21,1	24,0	24,6	-0,6	> 90	23,8	0,2	> 90
4	21,1	26,8	24,6	2,2	> 90	23,8	3,0	> 80
5	21,1	28,3	24,6	3,7	< 80	23,8	4,5	< 80
6	21,1	26,3	24,6	1,7	> 90	23,8	2,5	> 80
7	17,8	20,5	23,5	-3,0	> 80	23,3	-2,8	> 80
8	17,8	22,7	23,5	-0,8	> 90	23,3	-0,6	> 90
9	17,8	23,1	23,5	-0,4	> 90	23,3	-0,2	> 90
10	17,8	25,8	23,5	2,3	> 90	23,3	2,5	> 80
11	17,8	26,7	23,5	3,2	> 80	23,3	3,4	> 80
12	17,8	27,6	23,5	4,1	< 80	23,3	4,3	< 80
13	21,1	26,7	24,6	2,2	> 90	23,8	3,0	> 80
14	21,1	26,7	24,6	2,2	> 90	23,8	3,0	> 80
15	21,1	28,2	24,6	3,6	< 80	23,8	4,4	< 80
16	17,1	17,5	23,3	-5,8	<<80	23,2	-5,6	<<80
17	17,1	17,9	23,3	-5,4	<<80	23,2	-5,3	<<80
18	17,1	19,8	23,3	-3,5	> 80	23,2	-3,4	> 80
19	21,1	27,1	24,6	2,6	> 80	23,8	3,4	> 80
20	21,1	26,3	24,6	1,8	> 90	23,8	2,6	> 80
21	21,1	27,8	24,6	3,2	> 80	23,8	4,0	< 80
22	17,1	17,9	23,3	-5,4	<<80	23,2	-5,3	<<80
23	17,1	17,8	23,3	-5,5	<<80	23,2	-5,4	<<80
24	17,1	19,3	23,3	-4,0	< 80	23,2	-3,9	< 80

Representatividade do modelo

Considerando De Dear et al. (1997) e ASHRAE (2004), pode-se observar que o índice original de Temperatura Operativa Neutra (OTn) foi desenvolvido para avaliação das condições térmicas de ambientes naturalmente condicionados, sendo que sua base empírica constitui-se basicamente de dados levantados em edifícios de escritórios. Nesses locais, ainda que haja grande influência das condições climáticas externas, tipicamente não há muita influência da radiação solar direta.

Com relação aos dois estudos de caso realizados, no estúdio tem-se radiação solar direta e sob a membrana têm-se elevadas temperaturas superficiais, devido à exposição à

radiação solar. Conseqüentemente, é possível verificar diferenças consideráveis nos resultados finais: a OTn original varia entre 23,3°C e 24,6°C, enquanto a proposta (OTn*) varia entre 23,2°C e 23,8°C.

Como pode ser observado, a influência da temperatura média mensal do ar externo é menor nos resultados verificados nos dois estudos de caso (o coeficiente original é 0,32; o novo é 0,15). É interessante observar que, por um lado, a temperatura Operativa Neutra de inverno é praticamente a mesma, mas, por outro lado, a de verão é muito mais baixa (0,8°C) quando se considera a equação resultante dos dados empíricos levantados nos dois estudos de caso.

Considerando os dados do ano típico de referência (TRY) para São Paulo, apresentados por Goulart et al (1998), a Temperatura Operativa Neutra para espaços semi-confinados em São Paulo varia entre 23,0°C e 23,9°C. A Figura 6 apresenta esses resultados.

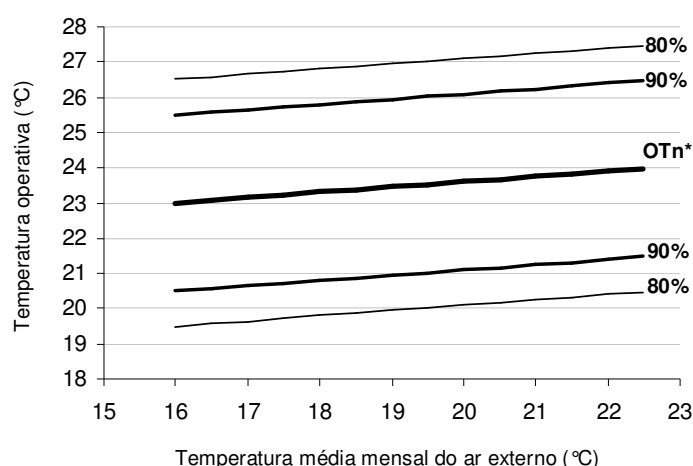


FIGURA 6: Proposição de valores de temperatura operativa aceitáveis para espaços semi-confinados em São Paulo.

O ano típico de referência para São Paulo indica que a maior temperatura média mensal do ar externo é 22,1°C (fevereiro) e a menor é 16,0°C (julho). Considerando que a presente pesquisa trabalhou com temperatura média mensal do ar externo entre 17,1°C e 21,1°C, pode-se afirmar que pesquisas futuras devem aumentar a abrangência dos levantamentos em pelo menos 1°C para verão e inverno.



Conclusões

Considerando as pesquisas específicas em ambientes térmicos com características de semi-confinamento, apresentadas na introdução deste trabalho (Chun et al., 2004; Jitkhajornwanicha & Pitts, 2002; Spagnolo & De Dear, 2003; Chun & Tamura, 2005; Cavalcanti & Sanches, 2005; Monteiro & Alucci, 2006), foram selecionados, para as simulações computacionais, os modelos preditivos utilizados nas já referidas pesquisas: Nova Temperatura Efetiva (TE*) de ASHRAE (1992), Voto Médio Estimado (PMV) de Fanger (1970), Índice de Carga Térmica Heat (HL) de Blazejczyk (2001), Temperatura Neutra Exterior (Tne) de Aroztegui (1995) e Temperatura Operativa Neutra (OTn) de ASHRAE (2004).

Assim, o objetivo desta pesquisa foi verificar qual desses modelos preditivos apresentava os melhores resultados para avaliação do conforto térmico em espaços semi-confinados na cidade de São Paulo. Com base nos resultados encontrados, para verão e inverno, em dois estudos de casos com características acentuadamente distintas, o modelo que proporcionou os melhores resultados preditivos foi o de Temperatura Operativa Neutra (OTn).

Esse modelo foi então calibrado, possibilitando que seu índice proporcione predições ainda mais significativas. Chegou-se, por esse meio, a proposição da equação de Temperatura Operativa neutra corrigida para espaços semi-confinados (OTn*). Por fim, verificou-se a representatividade do novo modelo, por meio dos dados do arquivo TRY (Goulart et al, 1998) para a cidade de São Paulo. Observa-se que os resultados finais apresentados foram extrapolados em ± 1 °C visando representar todas as faixas de valores de temperatura média mensal do ar externo encontradas na cidade em estudo. Desta forma, pesquisas futuras devem verificar a extrapolação realizada, assim como os próprios resultados finais, visando avaliações ainda mais significativas da ambiência térmica de espaços em condições de semi-confinamento na cidade São Paulo.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.



Referências

- ARZTEGUI, J.M. Cuantificación del impacto de las sombras de los edificios. III Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 1995, Gramado. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 1995.
- ASHRAE. **Handbook of fundamentals**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2005.
- _____. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2004**, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2004.
- _____. **ANSI/ASHRAE Standard 55-1992**, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc, 1992.
- BLAZEJCZYK, K. Assessment of recreational potential of bioclimate based on the human heat balance. In: International Workshop on Climate 1, 2001, Halkidiki, Greece. **Proceedings...** Halkidiki, Int. Soc. Biom, 2001, p. 133-152,
- CAVALCANTI, R.; SANCHES, P. **Avaliação do Conforto Térmico no Edifício da FAUUSP**. Relatório Final (FAPESP/CNPq). São Paulo: FAUUSP, 2005.
- CHUN, C.; KWOK, A.; TAMURA, A. Thermal comfort in transitional spaces—basic concepts: literature review and trial measurement. **Building and Environment**, 39, 2004, p. 1187–1192,
- CHUN, C.; TAMURA, A. Thermal comfort in urban transitional spaces. **Building and Environment**, 40, 2005, p. 633–639.
- DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. 1997. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. Sydney: ASHRAE. (Report Rp-884).
- FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and application in environment engineering**. New York: McGraw Hill, 1970.
- GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para catorze cidades brasileiras**. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.

- HOUGHTEN, F.C.; YAGLOU, C.P. 1923. **Determining lines of equal comfort**. ASHVE Transactions, 29.
- HUMPHREYS, M. Field studies of thermal comfort compared and applied. **BRE Current Paper**, 75/76, Londres, 1975.
- ISO. **ISO 7730**. Moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Genève: International Standardization Organization, 1994.
- JITKHAJORNWANICHA, K.; PITTS, A. Interpretation of thermal responses of four subject groups in transitional spaces of buildings in Bangkok. **Building and Environment**, 37, 2002, p. 1193–1204.
- MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M.P. Modelagem termo-fisiológica para avaliação de espaços sombreados por membranas têxteis. Núcleo de Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: FUPAM, 2005.
- SPAGNOLO, J. ; DE DEAR, R.. A field study of thermal comfort in semi-outdoor environments in subtropical, Sydney, Australia. **Building and Environment**, 38, 2003, p. 721–738.