

## 93 - Modelo adaptativo de temperatura operativa neutra para avaliação de espaços semi-confinados

### ***Adaptive Model of Neutral Operative Temperature for the Evaluation of Transitional Spaces***

**MONTEIRO, Leonardo Marques (1); ALUCCI, Márcia Peinado (2)**

(1) Doutorando da FAUUSP, leo4mm@gmail.com

(2) Prof. Dra. do Depto. de Tecnologia da FAUUSP, marcialu@usp.br

Rua do Lago, 876 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil – Tel +55 11 3091-4538 r.208

#### **Resumo**

Este artigo apresenta uma verificação empírica comparativa de diferentes modelos de conforto térmico para avaliação de espaços 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 do ar, umidade relativa, velocidade do ar, temperatura radiante média), individuais (taxa metabólica e isolamento térmico da roupa) e subjetivas (percepção e preferência de sensação térmica). Os modelos preditivos de conforto térmico foram processados computacionalmente. Para a verificação empírica, dois estudos de caso foram considerados, em dois espaços semi-confinados, com características predominantemente comparáveis a de um ambiente interno e a de um ambiente externo. Realizou-se a aplicação de 886 questionários em um total de 24 situações microclimáticas distintas. Os resultados da simulação computacional foram comparados com os dos levantamentos empíricos. Considerando os resultados finais encontrados, o modelo que se mostrou mais apropriado foi o modelo adaptativo de Temperatura Operativa Neutra. Utilizando os dados empíricos coletados, esse modelo foi calibrado por meio de proposição de uma nova equação que proporciona resultados ainda mais significativos para a predição de conforto térmico em espaços semi-confinados na cidade de São Paulo.

**Palavras-chave:** Modelos de Conforto Térmico; Temperatura Operativa Neutra; Espaços Semi-confinados

#### **Abstract**

*This paper presents an empirical verification of different thermal comfort models for assessment of transitional spaces in the city of São Paulo, Brazil. The method adopted is deductive, performing simulations of predictive models, and experimental inductive, considering field research of micro-climatic (air temperature, humidity and speed, and mean radiant temperature), individual (metabolic rate and clothing thermal insulation) and subjective (perception and preference of thermal sensation) variables. The thermal comfort predictive models considered were computationally processed. For the empirical verification, two case studies (one, semi outdoor; the other, semi indoor) were considered, with the application of 886 questionnaires in a total of 24 different micro-climatic conditions. The results of the computational simulations were compared to the ones of the empirical field research. Considering the results found, the most appropriated model showed to be the Neutral Operative Temperature. Using the empirical data gathered, this index was calibrated through the proposal of a new equation for even better predictions of thermal comfort in transitional spaces in São Paulo, Brazil.*

**Key words:** *Thermal Comfort Models; Neutral Operative Temperature; Transitional Spaces.*

## **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. Esses espaços são aqui focados considerando-se que não são tipicamente internos nem externos. Portanto, dois estudos de caso são apresentados: o primeiro, com características que o aproximam da exterioridade, mas com bloqueio total da radiação solar incidente; e o segundo, com características que o aproximam da interioridade, mas que apresenta grande área com aberturas zenitais, recebendo grande parte da radiação solar incidente.

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**

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).

### **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 (2001).

$$TE^* = t_o + w \cdot I_m \cdot LR \cdot (p_a - 0.5 \cdot psTE^*) \quad \text{Equação 01}$$

$$t_o = h_r \cdot t_{rm} + h_c \cdot t_{bs} / (h_r + h_c) \quad \text{Equação 02}$$

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;  $psTE^*$  = pressão de saturação da temperatura efetiva, em kPa;  $t_{rm}$  = temperatura radiante média, em °C;  $t_{bs}$  = temperatura de bulbo seco, em °C;  $h_r$  = coeficiente de troca radiante, em  $W/m^2°C$ ;  $h_c$  = coeficiente de troca convectiva, em  $W/m^2°C$ .

### 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).

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

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

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

onde:  $M$  = taxa metabólica, em  $W/m^2$ ;  $W$  = trabalho externo, em  $W/m^2$ ;  $t_a$  = 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  $m^2°C/W$ ;  $f_{cl}$  = razão entre área de pele vestida e nua;  $h_c$  = coeficiente de troca convectiva, em  $W/m^2°C$ .

### 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:

$$\text{se } S \leq 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } Esk \geq -50 \text{ W/m}^2 \quad HL = [(S + 360) / 360] [2 - 1/(1+Rc)] \quad \text{Equação 06}$$

$$\text{se } S > 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } Esk \geq -50 \text{ W/m}^2 \quad HL = [(S + 360) / 360] [2 + 1/(1+Rc)] \quad \text{Equação 07}$$

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

$$\text{se } S \leq 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } Esk < -50 \text{ W/m}^2 \quad HL = (E/-50) [(S + 360) / 360] [2 - 1/(1+Rc)] \quad \text{Equação 09}$$

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

### **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 sudação 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=210W: -2 °C; trabalho moderado M=300W: -4,5 °C; trabalho pesado M=400W: -7 °C.

$$Tne = 3,6 + 0,31 tmm + \{100 + 0,1 Rdn [1 - 0,52 (v 0,2 - 0,88)]\} / 11,6 v 0,3 \quad \text{Equação 10}$$

onde: Tne = Temperatura Neutra Exterior, em °C; tmm = temperatura média mensal, em °C; Rdn = radiação solar direta normal, em W/m<sup>2</sup>; 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 ±2,5 °C representa satisfação de 90% dos usuários, enquanto ± 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.

$$OTn = 17,8 + 0,32 tmm \quad \text{Equação 11}$$

onde: OTn= Temperatura Operativa Neutra; tmm = temperatura média mensal do ar externo; em °C.

### **Levantamentos Empíricos**

Os levantamentos empíricos consideraram duas tipologias distintas de espaços semi-confinados: um espaço caracteristicamente externo, coberto por membrana têxtil tensionada, conforme pode ser visto na Figura 1 (Monteiro, 2005); um espaço caracteristicamente interno, 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 2 (Cavalcanti & Sanches 2005). 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.



Figura 1 - Imagens do primeiro estudo de caso: vista externa, cobertura e ocupação.



Figura 2 - Imagens do segundo estudo de caso: vista externa, cobertura e ocupação.

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, tendo sido coletados apenas nos períodos 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 verão e de 17,8 °C para o mês inverno.

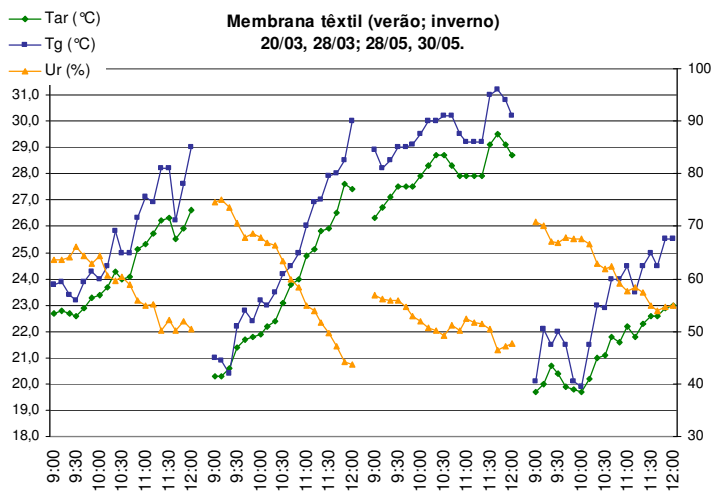


Figura 3 - Dados microclimáticos sob a membrana tensionada (verão e inverno)

Para o segundo estudo de caso, os dados que foram obtidos em quatro dias consecutivos de verão e 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. A Tabela 1 consiste nos dados microclimáticos, individuais e subjetivos coletados, especificamente nos períodos em que os questionários foram aplicados.

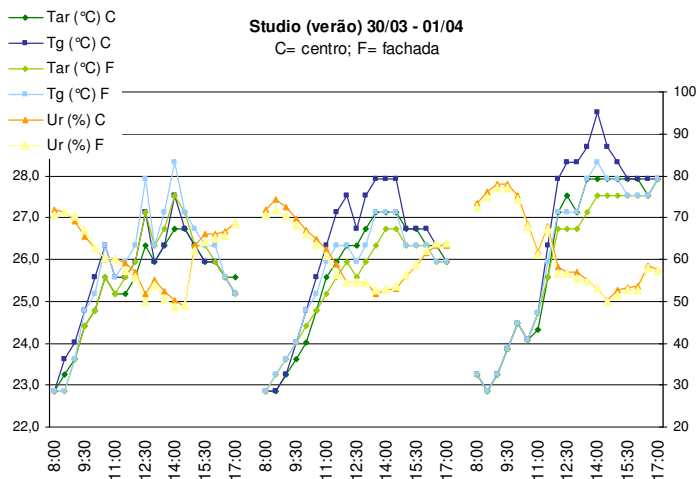


Figura 4 - Dados microclimáticos no estúdio com aberturas zenitais (verão)

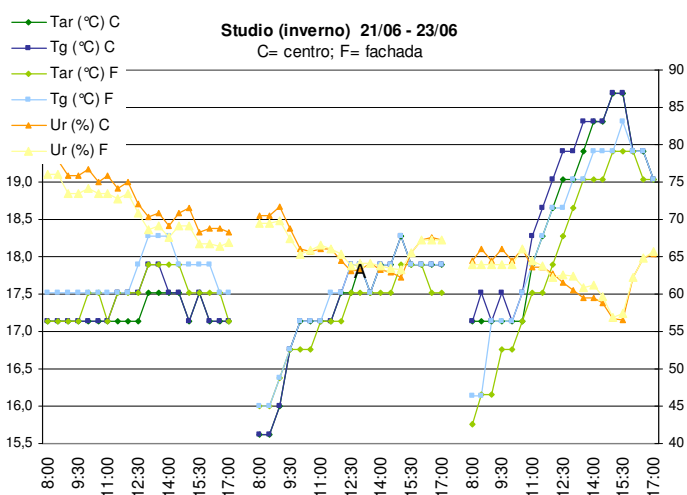


Figura 5 - Dados microclimáticos no estúdio com aberturas zenitais 5 (inverno)

**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 <sup>2</sup>	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/m<sup>2</sup>; I<sub>cl</sub> = 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,  $t_g$ ,  $t_{rm}$ , M e I<sub>cl</sub>, 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%
<b>R</b>	<b>0,80</b>		<b>0,79</b>		<b>0,83</b>		<b>0,75</b>		<b>0,85</b>	



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) será objeto de publicação futura.

## Discussão

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. Consequentemente, no próximo tópico, será apresentada a calibração do referido índice, utilizando-se os dados empíricos coletados, visando fornecer predições ainda mais significativas.

## Calibração

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 calibração proposta, considerando os dados empíricos levantados.

$$OTn^* = 20,6 + 0,15 tmm$$

Equação 12

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.

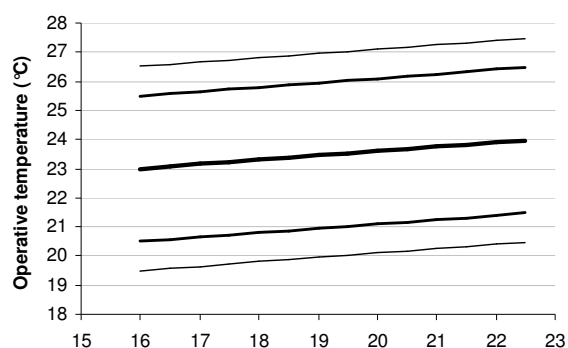
**Tabela 3 - Resultados da equação de Temperatura Operativa Neutra original (OTn) e da equação proposta (OTn\*) para avaliação de espaços semi-confinados em São Paulo.**

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

## Conclusões

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. Consequentemente, 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.

80%

90%

OTn\*

90%

80%

no (°C)

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. Portanto, os resultados apresentados estão extrapolados em  $\pm 1^\circ\text{C}$  visando representar todas as faixas de valores de temperatura média mensal do ar externo comumente encontradas na cidade em estudo. Pesquisas futuras devem ser realizadas, não apenas para verificar a extrapolação realizada, como também para verificar os resultados encontrados, objetivando avaliações ainda mais significativas das condições de conforto térmico em espaços semi-confinados da cidade São Paulo.

## Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro; aos professores Denise Duarte, José Cremonesi e Joana Gonçalves por permitir que seus alunos colaborassem nesta pesquisa; à professora Anésia Frota pelos equipamentos e orientação; a todos os pesquisadores do LABAUT que ajudaram nos levantamentos do primeiro estudo de caso; e especialmente a Rodrigo Cavalcanti e Patricia Sanches que realizaram a pesquisa de campo do segundo estudo de caso, sob orientação da Professora Joana Gonçalves.

## Referências Bibliográficas

- AROZTEGUI, J.M. (1995). Cuantificación del impacto de las sombras de los edificios. III Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 1995, Gramado. Anais... Porto Alegre: ANTAC.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. (2004). Standard 55-2004, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta: ASHRAE.
- \_\_\_\_\_. (2001). Handbook of fundamentals. Atlanta: ASHRAE.
- \_\_\_\_\_. (1992). Standard 55-1992, Thermal Conditions for Human Occupancy, Atlanta: ASHRAE.

- BLAZEJCZYK, K. (2001). Assessment of recreational potential of bioclimate. In: International Workshop on Climate 1, 2001, Halkidiki, Greece. Proceedings... Halkidiki, Int. Soc. Biom., p. 133-152, 2001.
- CAVALCANTI, R.; SANCHES, P. (2005). Avaliação do Conforto Térmico no Edifício da FAUUSP. Relatório Final (FAPESP/CNPq). São Paulo: FAUUSP.
- DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. (1997). Developing an adaptative model of thermal comfort and preference. Sydney: ASHRAE. (Report Rp-884).
- FANGER, P. (1970). Thermal comfort: analysis and application in engineering. New York: McGraw Hill.
- GIVONI, B. (1969). Man, climate and architecture. New York: John Wiley & Sons.
- GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. (1998). Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para catorze cidades brasileiras. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC,
- HOUGHTEN, F.C.; YAGLOU, C.P. (1923). Determining lines of equal comfort. ASHVE Transactions, 29.
- HUMPHREYS, M. (1975), Field studies of thermal comfort. BRE Current Paper, 75/76, Londres.
- ISO. (1994). ISO 7730. Moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for comfort. Genève: International Standardization Organization.
- MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M.P. (2005). Quantificação de Variáveis para Análise Termo-Fisiológica. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2005, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC.