

MODELO ADAPTATIVO DE CONFORTO TÉRMICO EM ESPAÇOS URBANOS ABERTOS

L. M. Monteiro e M. P. Alucci

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi propor um modelo adaptativo de predição de sensação térmica em espaços urbanos abertos, considerando fatores de aclimatação ao meio ambiente, além das tradicionais variáveis microclimáticas urbanas (temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação térmica), variáveis subjetivas (percepção de sensações térmicas) e variáveis individuais (vestimentas e atividade física). Os métodos utilizados foram: indutivo experimental (levantamentos em campo), estatístico (regressão numérica), analítico (balanço termo-fisiológico) e comparativo (temperatura equivalente). Como resultado final obteve-se um índice para avaliação do conforto térmico em espaços urbanos abertos na cidade de São Paulo.

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros registros de pesquisas de conforto térmico revelam seu foco em espaços fechados. Posteriormente, os trabalhos de pesquisa foram sendo utilizados em espaços abertos e, verificando-se sua inadequação, foram sendo adaptados e finalmente foram sendo desenvolvidas pesquisas específicas para espaços abertos. O parágrafo a seguir apresenta um panorama geral sucinto dessas pesquisas. Detalhes e discussão das referências citadas encontram-se em Monteiro e Alucci (2005).

Houghten et al. (1923), a partir de estudos em laboratório da ASHVE, propõem a Temperatura Efetiva (ET), determinada através da combinação da temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido e da velocidade do vento. Vernon & Warner (1932) propõem a Nova Temperatura Efetiva (ET*), através da substituição da temperatura de bulbo seco pela temperatura de globo, para consideração dos efeitos da radiação. Esse índice foi adotado pela ASHRAE (1967) tendo sido posteriormente adotada a temperatura operativa ao invés da temperatura de globo, com a nomenclatura de nova temperatura efetiva corrigida (CET*). Siple & Passel (1945), desenvolvem a temperatura resfriada pelo vento (WCT) a partir dos dados obtidos com experiências laboratoriais em espaços abertos na Antártida. Belding & Hatch (1955) propõem o índice de estresse térmico por calor (HSI) para espaços externos, através de modelo de balanço térmico. Yaglou (1957) propõe a temperatura de globo e de bulbo úmido (WBGT), considerando situações internas e externas, sem e com radiação solar direta. Gagge (1967) propõe uma nova determinação para a temperatura efetiva padrão (SET*), podendo ser definida como a temperatura equivalente à temperatura do ar na qual, em um ambiente de referência, o indivíduo apresenta a mesma temperatura da pele e a mesma fração de pele coberta por suor

regulatório que no ambiente em questão. Givoni (1969) propõe o índice de estresse térmico (ITS), baseado em balanço térmico e, para considerar as trocas por radiação de longa, o autor sugere a utilização da temperatura de globo ao invés da temperatura do ar no cálculo das trocas convectivas. Masterton & Richardson (1979) propõem o Humidex (HU), índice que fornece uma temperatura equivalente em função dos valores da temperatura e da umidade relativa do ar. Jendrizky et al. (1979) propõem o Modelo Climático de Michel, baseado em adaptação do modelo proposto por Fanger (1970), através de um modelo de radiação que computa os fluxos de radiação de onda longa e curta, considerando-os no valor de temperatura radiante média. Vogt et al (1981) propõe o índice de taxa de suor requerida (Swreq), a partir do HSI e do ITS, tornando-se parte da norma ISO7933 (1989). Domínguez et al. (1992) propõem critérios para a taxa de suor requerida com base no tipo de uso dos espaços. Brown & Gillespie (1995) propõem uma fórmula de conforto específica para ambientes externos. Aroztegui (1995) propõe a Temperatura Neutra Exterior, a partir do trabalho de Humphreys (1975), baseado em levantamentos de campo. Este propõe a Temperatura Neutra, definida como a temperatura ambiente considerada termicamente neutra pela população. Aroztegui (1995) incorpora variáveis relativas à radiação solar e à velocidade do vento, baseando-se no ITS. Blazejczyk (2002) propõe o modelo de balanço térmico Menex, considerando uma série de índices de caráter laboratorial: carga térmica (HL), estímulo devido à intensidade de radiação (R'), esforço fisiológico (PhS), temperatura subjetiva (STI), índice de suor aparente (SP). De Freitas (1997) apresenta o índice de capacidade de armazenamento (PSI) e a temperatura da pele que equilibra o balanço térmico (STE), também utilizando o modelo Menex. Höpfe (1999) propõe o Modelo de Munich, baseando também na equação de balanço térmico, mas considerando o modelo de dois nós de Gagge (1986), e definindo a temperatura equivalente fisiológica (PET) de uma dada situação como a temperatura equivalente à temperatura do ar na qual, em uma situação típica interna, o balanço térmico do corpo humano é mantido, com temperaturas do centro do corpo e da pele iguais às da situação em questão. Givoni & Noguchi (2000) relatam pesquisa experimental de conforto térmico em espaços abertos, envolvendo aquisição de respostas de sensação térmica (TS) e sensação global de conforto em caráter laboratorial, através de pesquisa desenvolvida em um parque da cidade de Yokohama, no Japão. Bluestein & Osczevski (2002) realizam trabalho de pesquisa empírica para reformulação das equações para determinação da nova temperatura resfriada pelo vento (NWCTI). Os ensaios para a determinação do novo índice basearam-se na modelagem física do rosto do indivíduo exposto ao vento. Nikolopoulou (2004) apresenta o voto real de sensação (ASV), em que para cada uma das cidades europeias onde foram realizados levantamentos de campo foi proposta uma equação linear simples para predição de conforto baseado em dados de estação meteorológica, propondo-se ainda equação única representativa do continente.

Este artigo apresenta pesquisa que propõe um modelo adaptativo de conforto térmico para avaliação preditiva específica de espaços urbanos abertos. Para tanto, quantificam-se as correlações entre variáveis microclimáticas urbanas (temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação térmica) e variáveis subjetivas (percepção de sensações térmicas), mediadas por variáveis individuais (vestimentas e atividade física), possibilitando a predição do grau de adequação térmica de espaços abertos para uma população adaptada às condições climáticas em que se encontra (no caso em específico, na cidade de São Paulo, Brasil). Apresentam-se os levantamentos empíricos das setenta e duas situações microclimáticas distintas e aplicação de mais de dois mil questionários, os procedimentos para correlações entre as variáveis temperatura, umidade e velocidade do ar e temperatura radiante média e a percepção de sensação térmica levantadas empiricamente e ainda a proposição de modelo

de regressão numérica culminando no índice de temperatura equivalente percebida. Os resultados indicam que a predição da sensação térmica em espaços abertos requer modelo com base empírica específica para dada população adaptada a determinadas condições climáticas, verificando-se ainda a adaptação frente às condições climáticas prévias, concluindo-se com a proposição de um modelo adaptativo baseado na temperatura equivalente percebida proposta. Ressalta-se aqui a contribuição e originalidade do trabalho de pesquisa na medida em que investigações específicas de quantificação dessas correlações para espaços urbanos abertos são recentes internacionalmente.

2 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Apresenta-se aqui um resumo dos procedimentos realizados para os levantamentos de campo das variáveis ambientais, individuais e subjetivas. Foram estabelecidas três bases para determinação das diversas variáveis: uma primeira a céu aberto, uma segunda sob copa de árvores e uma terceira sob cobertura têxtil tensionada. Uma base central, com sensores de velocidade e direção de vento a 10m de altura, foi estabelecida para referenciar as variáveis ambientais, situando-se espacialmente entre as três bases citadas. No total, em cada dia, foram entrevistadas cerca de cento e cinquenta pessoas, em cada uma das três bases, em seis horários diferentes. Esse procedimento foi realizado em dias representativos de verão e dias representativos de inverno, totalizando setenta e duas situações microclimáticas distintas com a aplicação de 2258 questionários, dos quais 1750 referiam-se a pessoas aclimatizadas.

A execução operacional dos levantamentos foi realizada da seguinte maneira. Estabeleceram-se dois grupos de setenta e cinco pessoas. Realizaram-se os procedimentos com o primeiro grupo nos três primeiros horários, repetindo-se os procedimentos com o segundo grupo nos três horários seguintes. Cada grupo foi subdividido em três, cada um de vinte e cinco integrantes. Cada subgrupo dirigiu-se a uma base. Na primeira base, todas as pessoas receberam etiquetas identificadoras (A01-A25, B01-B25, C01-C25), responderam um questionário para verificação de características gerais (sexo, idade, peso, altura) e aclimatação (locais onde já viveu e por quanto tempo) e foram fotografadas (em grupos de cinco) para posterior identificação da vestimenta. Após esses procedimentos iniciais, todos ficaram vinte minutos expostos às condições ambientes locais, para em seguida receberem um questionário de percepção e preferência de sensação térmica. Nesse questionário, perguntou-se também se alguma peça de roupa foi alterada desde o momento do registro fotográfico. Depois de respondidos, os questionários foram recolhidos e cada grupo se dirigiu à próxima base, onde permaneceram por mais trinta minutos, realizando-se o mesmo procedimento até terem passado pelas três bases. O segundo grupo de setenta e cinco pessoas passou então pelos mesmos procedimentos, mas a troca de bases foi realizada em sentido inverso ao do primeiro grupo.

Os equipamentos utilizados em cada base são aqui sucintamente descritos. Na base a céu aberto foi utilizada uma estação meteorológica marca ELE modelo EMS com sensores de temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento e piranômetro Eppley, registrando-se os dados em data logger marca ELE modelo MM900 EE 475-016. Na base sob cobertura arbórea utilizou-se estação meteorológica Huger Eletronics modelo GmbH WM918, com sensores de temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, armazenando-se os dados diretamente em microcomputador portátil. Na base sob cobertura têxtil tensionada foi utilizada estação Innova 7301, com módulo de conforto (sensores de temperatura, umidade e velocidade do ar) e de estresse térmico (do qual se utilizou o

termômetro de globo), registrando-se os dados em data logger da mesma marca, modelo 1221. Na base a 10m de altura utilizou-se estação meteorológica semelhante (modelo GmbH WM921) à da base sob copas de árvores, enviando-se os dados para microcomputador portátil por meio de ondas de rádio. Os registros realizados pelos equipamentos se deram em intervalos de um minuto. Em cada uma das três bases, foi montado um set com dois termômetros de globo. Os globos de latão utilizados apresentam diâmetro de 17 cm. Em cada set, pintou-se um globo de preto fosco e outro de cinza médio fosco. Os termômetros utilizados em cada globo são de mercúrio. A leitura e o registro dos dados deram-se a cada dez minutos. Dado o grande número de pessoas mobilizadas para o levantamento de campo em questão, decidiu-se pela realização de medições extras das variáveis ambientais caso houvesse algum problema com o registro eletrônico em curso. Assim montou-se um set com um termohigrômetro Homis modelo 229 e set com quatro anemômetros marca Homis modelo 209 em cada uma das bases. Os dados de temperatura e umidade do ar foram registrados a cada dez minutos. Os dados de velocidade do ar foram registrados de cinco em cinco segundos durante um minuto, a cada dez minutos.

Segundo a Norma ISO 7726 (1998), as especificações dos instrumentos para determinação de quantidades físicas do ambiente dividem-se em duas classes: tipo C (conforto), para ambientes moderados; e tipo S (estresse), para ambientes com estresse térmico. As especificações referentes à faixa de medição e precisão são apresentadas na Tabela 1. O tempo de resposta do sensor depende da massa, da área superficial, da presença de protetor e das características do ambiente (temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação térmica).

Tabela 1: Características requerida e desejável dos instrumentos (ISO 7726, 1998)

Variáveis	Faixa para conforto	Precisão para conforto	Faixa para estresse	Precisão para estresse
Temperatura do ar	10–40 °C	Requerida: $\pm 0,5$ °C Desejada: $\pm 0,2$ °C	-40–120 °C	Requerida: $\pm 0,5$ °C (0-50°C) Desejada: $\pm 0,25$ °C (0-50°C)
Temperatura radiante	10–40 °C	Requerida: ± 2 °C Desejada: $\pm 0,2$ °C	-40–150 °C	Requerida: ± 5 °C (0-50°C) Desejada: ± 5 °C (0-50°C)
Velocidade do ar	0,05–1 m/s	Requerida: $\pm[0,05 + 0,05V]$ Desejada: $\pm[0,02 + 0,07V]$	0,2–20 m/s	Requerida: $\pm[0,1 + 0,05V]$ Desejada: $\pm[0,05 + 0,05V]$
Umidade absoluta	0,5–3,0 kPa	$\pm 0,15$ kPa ($ t_{ar}-t_{rm} < 10^{\circ}C$)	0,5–6,0 kPa	$\pm 0,15$ kPa ($ t_{ar}-t_{rm} < 20^{\circ}C$)

Os métodos de medições devem levar em consideração a homogeneidade e a heterogeneidade das variáveis medidas. Deve-se também observar o caráter estacionário e variacional do tempo das grandezas medidas. Para o critério de conforto, diz-se que um ambiente é homogêneo se verificado um erro, para cada medição com relação à média de todas as medições, de no máximo 3 vezes o valor da precisão requerida para temperatura do ar e de no máximo 2 vezes para as demais variáveis. Para o critério de estresse, admitem-se no máximo 4 vezes para temperatura do ar, 3 vezes para temperatura radiante média e 2 vezes para as demais variáveis. A precisão requerida das medidas é em relação à média. O caráter estacionário e transiente é avaliado de maneira análoga. Quando o ambiente é muito heterogêneo, as quantidades físicas devem ser medidas em diversos pontos, levando-se em conta os resultados parciais obtidos para se determinar o valor médio das quantidades a serem consideradas na avaliação do conforto ou do estresse térmico. A Tabela 2 apresenta as posições a serem utilizadas na medição das quantidades físicas e os coeficientes de ponderação a serem usados no cálculo do valor médio dessas quantidades.

Tabela 2: Altura de medição para as variáveis do ambiente (ISO 7726, 1998).

Posição	Coeficiente de Ponderação				Altura recomendada	
	Ambiente Homogêneo		Ambiente Heterogêneo		Sentado	De pé
	Classe C	Classe S	Classe C	Classe S		
Cabeça			1	1	1,1 m	1,7 m
Abdômen	1	1	1	2	0,6 m	1,1 m
Calcanhar			1	1	0,1 m	0,1 m

Com base nos resultados do pré-teste realizado anteriormente ao levantamento, considerou-se que os ambientes eram homogêneos, ainda que para as variáveis temperatura radiante média e velocidade do ar tenham sido encontrados, nas medições realizadas a 0,1m, alguns desvios ligeiramente maiores do que o especificado pela norma. Assim, no levantamento propriamente dito, realizaram-se medições apenas a 1,1 m de altura (a aplicação dos questionários subjetivos deu-se sempre com as pessoas paradas e em pé). Nos levantamentos em questão, os sensores utilizados para determinação da temperatura do ar são do tipo semicondutor. A faixa de leitura é de -20 °C a +60 °C, com resolução de 0,1 °C, precisão de $\pm 0,4$ °C e tempo de resposta de 0,1 °C/s. Os sensores para determinação de umidade são de capacitância, obtendo-se a umidade relativa. A faixa de leitura é de 10% a 95%, com resolução de 0,1%, precisão de $\pm 3\%$ (a 25 °C, entre 30% e 95%) e $\pm 5\%$ (a 25 °C, entre 10% e 30%) e tempo de resposta de 3 minutos para mudança de 45% a 95% e de 5 minutos para o inverso.

Para cada um dos três *sets* de anemômetros empregados, utilizaram-se quatro sensores de hélice. Esses sensores apresentam faixa de leitura de 0,4 a 30,0m/s, com resolução de 0,1m/s, e precisão de $\pm 2\%+d$, onde d é o valor numérico do registro em m/s. As estações meteorológicas utilizadas possuem sensores de velocidade do ar compostos por copo (magnitude) e pá (direção/sentido), apresentando faixa de leitura de 0,3 a 30,0m/s, resolução de 0,1m/s e precisão de $\pm 2\%+d$. O registro dos dados das estações meteorológicas foi realizado a cada minuto, considerando-se a média das leituras realizadas a cada segundo, obtendo-se o valor médio da velocidade no minuto e o desvio padrão. O registro dos dados dos *sets* foi realizado de cinco em cinco segundos durante um minuto, a cada dez minutos. Para cálculo da temperatura radiante média utilizou-se procedimento baseado em termômetro de globo, que requer ainda a temperatura e a velocidade do ar. Utilizaram-se globos de 17 cm de diâmetro, com emissividade próxima a 0,95. Para a determinação da temperatura do ar no interior dos globos foram empregados termômetros de mercúrio. A norma ISO 7726 (1998) alerta para a utilização da cor cinza médio quando o globo for exposto ao sol, dada a sua absorção de radiação térmica de onda curta semelhante à das pessoas normalmente vestidas. Para o cálculo da temperatura radiante média, realiza-se o balanço das trocas térmicas entre o globo e o ambiente em questão. O tempo de resposta de um termômetro de globo é, segundo a norma referida, de aproximadamente 20 a 30 minutos, dependendo das características do globo e do ambiente em avaliação. Como resultado, têm-se as seguintes formulações respectivamente para convecção natural e convecção forçada.

$$t_{rm} = \{(t_g + 273)^4 + [(0,25 \cdot 10^8) / \epsilon_g] \cdot (|t_g - t_{ar}| / D)^{1/4} \cdot (t_g - t_{ar})\}^{1/4} - 273 \quad (1)$$

$$t_{rm} = \{(t_g + 273)^4 - [(1,1 \cdot 10^8 \cdot v_{ar}^{0,6}) / (\epsilon_g \cdot D^{0,4})] \cdot (t_g - t_{ar})\}^{1/4} - 273 \quad (2)$$

onde: t_g é a temperatura de globo, em °C;

ϵ_g é a emissividade do globo, adimensional;

D é o diâmetro do globo, em m.

3 MODELAGEM PREDITIVA

Apresentam-se aqui os estudos de correlação de múltiplas variáveis para a predição de sensação térmica sem necessariamente serem realizados levantamentos in loco. Possibilita-se, assim, a avaliação de projetos e ainda a avaliação de espaços existentes sem a necessidade obrigatória de realização de medições de campo. No caso de não haver medições in loco, é necessária a utilização de modelagem específica para predição das condições microclimáticas específicas do espaço em avaliação, considerando-se os efeitos da matéria e forma urbana nas condições climáticas que comumente são conhecidas por meio de dados registrados em estações meteorológicas. Ressalta-se que essa modelagem não é objeto de estudo desta pesquisa.

As regressões lineares realizadas para os valores médios alcançados para as setenta e duas situações levantadas são aqui consideradas. A primeira tentativa de estabelecimento de uma equação a partir de regressão linear foi realizada considerando-se as quatro variáveis independentes. Ainda que já se saiba previamente que há multicolinearidade entre as variáveis temperatura do ar e umidade relativa (pela segunda ser dependente da primeira), manteve-se aqui tal consideração apenas para se manter a estrutura de raciocínio. Assim, a equação seguinte foi obtida em função das quatro variáveis ambientais, para as setenta e duas situações levantadas.

$$\text{Sens} = -1,237 + 0,022 \cdot t_{\text{ar}} - 0,0120 \cdot \text{UR} - 0,257 \cdot v_{\text{ar}} + 0,0656 \cdot t_{\text{rm}} \quad (3)$$

com: $r = 0,936$; $r^2 = 0,875$; $r^2_{\text{aj}} = 0,868$; $ep = 0,315$; $p < 0,001$

Verifica-se alta correlação (0,94) entre os resultados da equação e os dados observados, sendo superior à correlação de todos os modelos estudados. Comparando-se a equação com os modelos realizados para o grupo de situações mais restrito, com apenas trinta e seis casos, constata-se que a equação apresenta coeficientes mais próximos do modelo final então alcançado. Ainda assim, verifica-se que, conforme pode ser observado na tabela seguinte, apesar do aumento da variação das condições de umidade, a variável umidade relativa apresenta colinearidade com a variável temperatura do ar, fato que se traduz, na prática, no coeficiente negativo para a constante da umidade relativa. Desta forma, no próximo tópico é realizada regressão linear suprimindo-se tal variável e, em seguida, são apresentados os mesmos procedimentos, anteriormente já realizados para o grupo mais restrito de trinta e seis situações microclimáticas, agora para o grupo mais abrangente de setenta e duas situações. A tabela seguinte apresenta um resumo dos resultados estatísticos para a constante da equação e cada variável considerada.

Tabela 4: Resumo estatístico da constante e das quatro variáveis independentes

	c	ep	t	p	VIF
Constante	-1,237	1,24	-0,998	0,322	
t_{ar}	0,022	0,0291	0,754	0,453	8,764
UR	-0,012	0,0094	-1,276	0,206	9,816
v_{ar}	-0,257	0,114	-2,244	0,028	1,271
t_{rm}	0,0656	0,0059	11,164	<0,001	2,334

De acordo com os resultados da Tabela , há multicolinearidade entre as variáveis independentes. A variável com maior valor de VIF é comumente descartada e nova regressão é realizada. No caso do conjunto mais restrito de dados, observou-se que a

temperatura do ar apresentava valor de VIF mais elevado, mas, ainda assim, optou-se pela remoção da variável umidade relativa, por entender-se que esta depende daquela, e não o contrário. No caso atual, considerando-se uma maior quantidade de dados, fica evidente que aquela decisão foi acertada, tanto que tal variável apresenta agora o maior de VIF, devendo ser descartada, independentemente de outras considerações externas. Desta forma, na seqüência, é considerado o estudo sem a variável umidade relativa. Nova regressão múltipla linear foi realizada observando-se os mesmos setenta e dois conjuntos de dados, que consideram os valores médios obtidos para as situações verificadas. A equação seguinte foi obtida em função de três variáveis ambientais.

$$\text{Sens} = -2,787 + 0,0544 \cdot t_{\text{ar}} + 0,0687 \cdot t_{\text{rm}} - 0,304 \cdot v_{\text{ar}} \quad (4)$$

com: $r = 0,934$; $r^2 = 0,872$; $r^2_{\text{aj}} = 0,867$; $ep = 0,317$; $p < 0,001$

Comparando-se os resultados com os encontrados para o conjunto de situações mais restrito, verifica-se que a correlação de 0,91 sobe para 0,93. Assim, observa-se que o aumento da abrangência da amostra contribui para uma correlação mais alta, mantendo-se a significância da mesma, com $p < 0,001$. A tabela a seguir apresenta um resumo dos resultados estatísticos para a constante da equação e cada variável considerada.

Tabela 2: Resumo estatístico da constante e das três variáveis independentes

	c	ep	t	p	VIF
Constante	-2,787	0,249	-11,17	<0,001	
t_{ar}	0,0544	0,0143	3,796	<0,001	2,1
t_{rm}	-0,304	0,011	-2,803	<0,001	1,135
v_{ar}	0,0687	0,0053	12,861	<0,001	1,915

Verifica-se que todas as variáveis independentes contribuem significativamente para a predição da variável dependente. A significância é bastante alta, com $p < 0,001$ para todos os casos (comumente adota-se $p < 0,05$), e os valores de VIF estão todos abaixo do esperado (comumente adota-se $VIF < 4$).

A seguir, por meio de modelagem analítica, apresentam-se os procedimentos realizados para a consideração da umidade relativa do ar na modelagem numérica proposta anteriormente. Com base nos resultados encontrados chegou-se a uma equação que, considerando apenas três variáveis, fornece correlação mais significativa que as fornecidas pelas simulações realizadas com os modelos pré-existentes. Assim, como exercício teórico, resolveu-se adaptar a equação obtida por regressão, visando à consideração da umidade relativa do ar. Optou-se, então, pela utilização dos resultados encontrados por outro modelo, para posterior verificação de sua validade por meio dos dados levantados considerados em termos de umidade absoluta, que não apresentam colinearidade com a temperatura do ar, pois, ao contrário da umidade relativa, não dependem dela. Considerando-se a equação geral apresentada por Nikolopoulou (2004) para a Europa, utilizou-se a variação no voto atual de sensação induzida por variação nos valores de umidade relativa do ar, para contemplar essa na equação obtida a partir da regressão linear com três variáveis. Ainda que se assumia que o efeito da umidade na sensação de conforto é distinto em diversas regiões, devido à aclimação das pessoas, pode-se realizar um exercício teórico, uma vez que os valores encontrados são utilizados apenas como referência, já que na continuidade dos estudos são considerados os dados de umidade absoluta para a devida calibração do modelo. Desta forma, partindo-se da variação de

valores encontrada para o modelo apresentado pela autora, iterativamente acrescentaram-se e diminuíram-se pequenos incrementos na constante da equação proposta e no coeficiente da nova variável independente, obtendo-se uma nova equação que apresenta correlação com os dados observados da mesma ordem que a equação original. Assim, obtém-se a equação seguinte.

$$\text{Sens} = -2,457 + 0,0544 \cdot t_{\text{ar}} + 0,0687 \cdot t_{\text{rm}} + 0,0134 \cdot \text{UR} - 0,304 \cdot v_{\text{ar}} \quad (5)$$

Contudo, considerando-se o estudo experimental comparativo com os dados de umidade absoluta, verifica-se a aplicabilidade apenas parcial dos resultados encontrados com esse exercício teórico, uma vez que a correlação encontrada a partir desses dados foi de 0,917, com $p < 0,001$. Assim, por esse valor não estar muito próximo ao da correlação original de 0,934, optou-se por realizar nova regressão com base, inicialmente, nos dados de umidade absoluta, para então convertê-los em umidade relativa na equação proposta, que é apresentada na seqüência.

$$\text{Sens} = -3,557 + 0,0632 \cdot t_{\text{ar}} + 0,0677 \cdot t_{\text{rm}} + 0,0105 \cdot \text{UR} - 0,304 \cdot v_{\text{ar}} \quad (6)$$

Considerando-se a correlação entre essa equação e a equação originalmente regredida, obtém-se um valor de 0,997, com $p < 0,001$ (mais precisamente, p é da ordem de 10^{-35}), indicando a validade preditiva da nova equação proposta. Com relação à correlação dessa com os dados empíricos, obteve-se um valor de 0,928, com $p < 0,001$. Deste modo, resolveu-se tomá-la como definitiva, uma vez que possíveis ganhos com novas modelagens seriam deveras restritos, não sendo possível melhorar a correlação da regressão linear múltipla anteriormente apresentada (0,934), considerando-se os resultados com duas casas significativas (0,93).

4 TEMPERATURA EQUIVALENTE PERCEBIDA

Para a proposição de uma equação que fornece valores de temperatura equivalente, assumiram-se aqui as seguintes condições para o ambiente de referência: temperatura radiante média igual à temperatura do ar: $t_{\text{rm}} = t_{\text{ar}}$; velocidade do ar aproximadamente igual a zero: $v_{\text{ar}} = 0,1$ m/s; umidade relativa igual a cinquenta por cento: $\text{UR} = 50\%$. Baseando-se essas assunções, a relação entre a temperatura equivalente a ser proposta e as sensações previstas pela equação anteriormente apresentada é dada pelas equações seguintes.

$$t_{\text{ar}} = 23,395 + 7,639 \cdot \text{Sens} \quad (7)$$

Desta forma, correlacionando-se as variáveis ambientais das setenta e duas situações levantadas e o valor médio de percepção de sensação térmica verificado em cada uma delas (tendo como base os resultados dos 1750 questionários aplicados), e realizando-se as considerações teóricas e adaptações numéricas apresentadas ao longo deste artigo, tem-se, para pessoas em pé e paradas, com vestimentas escolhidas por elas próprias, a proposição da equação seguinte, onde TEP = temperatura equivalente percebida.

$$\text{TEP} = -3,777 + 0,4828 \cdot t_{\text{ar}} + 0,5172 \cdot t_{\text{rm}} + 0,0802 \cdot \text{UR} - 2,322 \cdot v_{\text{ar}} \quad (8)$$

Em resumo, a temperatura equivalente percebida de um dado ambiente pode ser sucintamente definida como uma escala de sensação térmica que apresenta valores numericamente iguais aos da temperatura do ar de um ambiente de referência ($t_{\text{ar}} = t_{\text{rm}}$,

UR=50% e $v_{ar}=0$) em que se verifica o mesmo valor médio de percepção de sensação térmica que no ambiente em questão. Ressalta-se que a equação foi obtida a partir de dados compreendidos em determinadas situações ambientais e que a utilização em outras situações depende da verificação de correlação de resultados de possíveis extrapolações com dados observados. Os limites verificados no levantamento de variáveis ambientais são apresentados na Tabela 7 junto com os limites para a temperatura equivalente percebida.

Tabela 7: Valores-limite das variáveis envolvidas na TEP

variável	valor mínimo	valor máximo
t_{ar}	15,1	33,1
UR	30,9	94,7
v_{ar}	0,1	3,6
t_{rm}	15,5	65,5
TEP	13,7	45,3

Ainda que a vantagem de temperaturas equivalentes seja a possibilidade de interpretação intuitiva de seus valores, é também interessante a existência de escalas interpretativas, uma vez que a interpretação intuitiva só é possível após a exposição a vários ambientes e o conhecimento de suas respectivas temperaturas equivalentes. Deste modo, apresenta-se na Tabela 8 as faixas para interpretação do índice de temperatura equivalente percebida, em função dos valores médios de sensação térmica. Conforme pode ser verificado na penúltima equação apresentada, a temperatura do ar de neutralidade de sensação térmica para o caso do ambiente de referência é, teoricamente, de 23,4°C, valor central da faixa de neutralidade, ou seja, temperatura equivalente percebida de neutralidade (TEP_n).

Tabela 8: Faixas interpretativas para a temperatura equivalente percebida (TEP).

TEP	Sensação
> 42,4	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
< 4,4	muito frio

4 MODELO ADAPTATIVO

Para a proposição de um modelo adaptativo é considerada neste item a adaptação em função da exposição a condições climáticas prévias, utilizando-se, além dos resultados dos levantamentos empíricos, dados climáticos de séries temporais de estações meteorológicas. A seguir, apresentam-se dados climáticos para os anos de 2004, 2005 e 2006. Ressalta-se que em 2004 foram realizados apenas pré-testes, tendo sido utilizados efetivamente os dados coletados nos anos de 2005 e 2006. Contudo, a totalidade dos dados climáticos do período é considerada para melhor caracterização das condições climáticas prévias aos levantamentos. Finalmente, são considerados, ainda, os valores do ano climático de referência para a cidade de São Paulo. Assim, consideraram-se os dados, mensais e anuais, da média, máxima e mínima temperatura do ar observada; considerou-se os mesmo dados para a umidade relativa e ainda os dados, mensais e anuais, da média e máxima velocidade do ar registrada a 10m do solo. Esses dados foram registrados pela Estação Meteorológica da Seção Técnica de Serviços Meteorológicos do Instituto de Astronomia, Geofísica e

Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, registrada junto à Organização Meteorológica Mundial sob o número 83004 e situada no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga, no bairro da Água Funda, à latitude 23°39'S e à longitude 46°37'W (IAGUSP, 2007a). Os dados, mensais e anuais, da média e máxima radiação solar incidente no plano horizontal foram registrados pela Plataforma Micrometeorológica do Laboratório de Micrometeorologia pertencente ao Grupo de Micrometeorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, situada no *campus* da Cidade Universitária, no bairro do Butantã, à latitude 23°24'S e à longitude 46°42'W (IAGUSP, 2007b). Os dados do ano climático de referência (TRY: Test Reference Year) considerado são apresentados por Goulart *et al.* (1997). O ano climático de referência é constituído por meio da eliminação de anos cujos dados contenham temperaturas médias mensais altas ou baixas, até que se obtenha apenas um ano de dados médios, sendo, portanto, um ano sem extremos de temperatura, constituindo-se em uma situação referencial do clima em questão. Por ter sido a variável utilizada para a proposição do modelo adaptativo a seguir, apresenta-se na Tabela 6 os valores de temperatura do ar para a cidade de São Paulo.

Tabela 9: Temperatura do ar (°C) - São Paulo

Média	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
2004	20,7	20,8	20,3	20,6	16,7	16,0	16,0	16,3	19,9	18,6	20,2	20,6	18,9
2005	22,0	21,4	21,7	21,4	18,7	18,0	16,0	18,2	17,1	20,0	19,6	20,4	19,5
2006	22,6	22,4	22,6	19,7	16,1	16,2	16,9	17,4	17,4	19,1	20,1	22,0	19,4
TRY	22,5	22,4	21,2	18,5	16,7	16,7	16,0	17,2	18,1	17,9	18,9	20,0	18,8
Máxima													
2004	31,9	32,5	32,0	30,0	28,4	25,8	27,0	30,6	34,4	31,8	33,0	32,2	34,4
2005	33,0	32,4	32,7	31,9	29,0	27,1	27,0	32,3	29,9	34,7	31,8	32,1	34,7
2006	34,8	33,4	33,6	29,0	27,4	26,4	29,7	31,2	34,3	31,9	33,4	31,9	34,8
TRY	32,5	32,8	31,0	28,8	27,0	25,0	27,1	27,9	32,0	31,0	32,6	31,4	32,8
Mínima													
2004	14,6	13,2	12,3	13,2	7,0	6,6	5,1	4,1	9,6	8,1	12,4	12,3	4,1
2005	15,2	13,6	15,2	12,6	11,0	9,1	5,2	7,6	9,4	14,1	11,5	13,6	5,2
2006	15,3	16,7	16,1	12,4	8,1	7,9	7,8	5,0	4,3	9,9	11,3	15,9	4,3
TRY	15,5	16,5	15,0	11,5	9,2	8,7	9,1	7,5	9,4	10,0	12,5	12,4	7,5

Considerando-se os valores de temperatura equivalente percebida de neutralidade para os dias de verão e inverno dos dois anos em que foram realizados os levantamentos e as temperaturas médias dos trinta dias anteriores a cada dia de levantamento, obtém-se a equação a seguir.

$$TEP_n = 20,033 + 0,1742 \cdot t_m \quad (9)$$

Ressalta-se que devido aos levantamentos terem sido realizados apenas em dias de verão e inverno de dois anos consecutivos, a equação apresentada baseia-se em dados deveras escassos. Assim, a mesma é considerada com o objetivo de apresentar uma possível abordagem que considere a adaptação às condições climáticas prévias. Uma maior quantidade de levantamentos, realizados ao longo de todo o ano e ao longo de diversos anos, faz-se necessária para a devida verificação das condições adaptativas de uma dada população face às variações climáticas. Reconhecendo-se as limitações levantadas, a Figura 1 apresenta o gráfico da temperatura equivalente percebida de neutralidade em função das temperaturas médias mensais, abarcando os limites constantes no ano climático de referência para a cidade de São Paulo, conforme apresentado na Tabela 9.

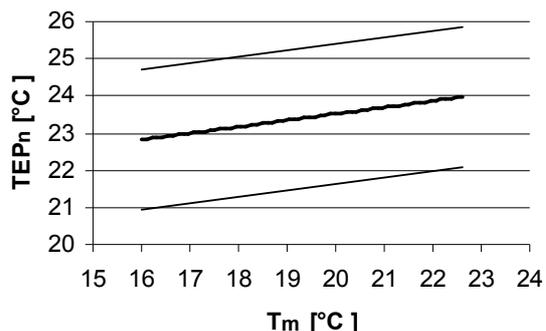


Figura 1: Temperatura equivalente percebida de neutralidade em função da temperatura do ar média dos trinta dias anteriores

Com base nos resultados apresentados, pode-se propor uma correção nos valores de TEP em função da média horária da temperatura do ar nos trinta dias anteriores, conforme equação que se segue.

$$\Delta TEP = 3,362 - 0,1742 \cdot t_m \tag{10}$$

Ressalta-se que, quando não houver disponibilidade de dados em base horária, é possível a utilização da temperatura média mensal, passível ainda de ponderação com a média mensal do mês anterior, proporcionalmente ao número de dias transcorridos em cada mês, totalizando-se trinta dias. Utilizando-se a equação geral da temperatura equivalente percebida, obtém-se a equação seguinte.

$$TEP = -0,4149 + 0,4828 \cdot t_{ar} + 0,5172 \cdot t_{m} + 0,0802 \cdot UR - 2,322 \cdot v_{ar} - 0,1742 \cdot t_m \tag{11}$$

com: $r = 0,937$; $r^2 = 0,878$; $r^2_{aj} = 0,868$; $ep = 0,315$; $p < 0,001$

Observa-se que o ganho correlativo com a consideração da temperatura média do ar, em comparação com a TEP sem consideração dessa variável, não é significativo, uma vez que o ganho é notado apenas na terceira casa decimal. Contudo, acredita-se que quando houver dados disponíveis para essa variável, é justificável seu emprego na medida em que possibilita a adoção de valores de neutralidade de TEP mais baixos para situações de frio e mais altos para situações de calor. Mais uma vez ressalta-se a limitação da presente proposição acerca da adaptação, necessitando-se de levantamentos mais extensivos para sua devida verificação. Por fim, para se observar a representatividade dos dados levantados e a sua utilização como parâmetro de verificação da adaptação ao clima, apresenta-se a Tabela 10, que, considerando os valores do ano climático de referência, traz frequências de ocorrência anual das variáveis microclimáticas observadas nos levantamentos empíricos.

Tabela 10: Frequências de ocorrência anual das variáveis microclimáticas

		t_{ar}	UR	v_{ar}	I_g
valor mínimo		15,1	30,9	0,1	0
valor máximo		33,3	94,7	3,6	1074
24 horas do dia	< valor mínimo	12%	1%	0%	0%
	abrangência	88%	83%	99%	100%
	> valor máximo	0%	16%	1%	0%
das 06h às 22h	< valor mínimo	7%	1%	0%	0%
	abrangência	93%	92%	99%	100%
	> valor máximo	0%	7%	1%	0%

Considerando-se todo o conjunto de situações microclimáticas, para o total de horas do ano compreendidas entre as 6h e as 22h, horários em que comumente se tem o uso de espaços abertos, observa-se que os dados levantados abrangem 92% das situações microclimáticas constantes do ano climático de referência. Ressalta-se que dos 8% restantes, referentes a situações não abrangidas, a maior parte refere-se a temperaturas do ar mais baixas e, conseqüentemente, a umidades relativas mais altas do que as verificadas.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho de pesquisa, por meio do índice de temperatura equivalente percebida (TEP), utilizou-se da correlação entre as variáveis microclimáticas urbanas e a variável subjetiva de percepção de sensação térmica, para observar que a predição de conforto térmico em espaços abertos varia com a calibração e validação específicas para dada população adaptada a determinadas condições climáticas. A nova modelagem proposta, representativa das situações urbanas específicas estudadas na cidade de São Paulo, é derivada de tratamento estatístico da base empírica, análise de modelos e referida temperatura equivalente percebida. Com base nos resultados dos trabalhos de Monteiro e Alucci (2007), verifica-se que a correlação dos resultados preditivos modelares encontrados (0,93) são mais significativos que de qualquer outro modelo, mesmo calibrado. Tem-se, ainda, com base nos diversos critérios e procedimentos desenvolvidos ao longo da pesquisa, o cumprimento do objetivo da mesma, com a proposição de um método e a quantificação das correlações propostas, entre variáveis microclimáticas urbanas e variável subjetiva de percepção de sensação térmica, apontando ainda para a adaptação às condições climáticas como um processo dinâmico face às mudanças sazonais. Desta forma, cumpriu-se o objetivo de verificar a questão mais específica da adaptação em função da exposição às condições climáticas prévias, levando à proposição de um modelo adaptativo por meio do índice de temperatura equivalente percebida (TEP), propiciando predições adaptativas de conforto térmico em espaços urbanos abertos.

6 REFERÊNCIAS

- Goulart, S., Lamberts, R., Firmino, S. (1997). **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Florianópolis: UFSC.
- IAGUSP (2007). **Laboratório de Micrometeorologia**. São Paulo: IAGUSP. Disponível em <http://www.iag.usp.br/meteo/labmicro/>. Acesso em 27/07/2007.
- ISO International Organization Standardization (1998). **ISO 7726**. Ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. Genève: ISO.
- Nikolopoulou, M. (org) (2004). **Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach**. Atenas: CRES.
- Monteiro, L. M.; Alucci, M. P. (2007). Conforto térmico com diferentes abrangências microclimáticas. In: IX ENCAC e V ELACAC, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Antac.
- Monteiro, L. M.; Alucci, M. P. (2005). Índices de conforto térmico em espaços abertos. In: VIII ENCAC e IV ELACAC, 2005, Maceió. **Anais...** Antac.

7 AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).